

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS ROSSO LOPES

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO SÍSMICO MASW NA
PROSPECÇÃO DE CARVÃO: UM ESTUDO DE CASO NA MINA DE
CANDIOTA/RS**

**Caçapava do Sul
2023**

LUCAS ROSSO LOPES

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO SÍSMICO MASW NA
PROSPECÇÃO DE CARVÃO: UM ESTUDO DE CASO NA MINA DE
CANDIOTA/RS**

Dissertação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima.

Caçapava do Sul

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L864e Lopes, Lucas Rosso

Estudo da aplicabilidade do método sísmico MASW na prospecção de carvão: um estudo de caso na mina de Candiota/RS / Lucas Rosso Lopes. – 2023.

Orientador: Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pampa, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Campus Caçapava do Sul, 2023.

1. Geofísica. 2. Geociências. 3. Engenharia Mineral. I. Lucas Rosso Lopes. II. Estudo da aplicabilidade do método sísmico MASW na prospecção de carvão: um estudo de caso na mina de Candiota/RS.

Lucas Rosso Lopes

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO SÍSMICO MASW NA
PROSPECÇÃO DE CARVÃO: UM ESTUDO DE CASO NA MINA DE CANDIOTA/RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em 08 de janeiro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Felipe Guadagnin

UNIPAMPA

Prof. Dr. Everton Frigo

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/01/2024, às 18:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE GUADAGNIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/01/2024, às 08:41, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EVERTON FRIGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/02/2024, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1354154** e o código CRC **11158F70**.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Nelma Rosso Lopes e José Carlos Lopes,
que não mediram esforços para que eu
chegasse até aqui.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima pela orientação e apoio durante cada etapa de trabalho desenvolvida.

Um agradecimento especial aos meus pais, Nelma Rosso Lopes e José Carlos Lopes, pelo apoio incondicional, além de todo incentivo que me deram ao longo de meus estudos.

Aos colegas de trabalho da empresa AFC Geofísica pelo apoio sempre que necessário.

Agradeço também uma das pessoas que mais me apoiou, seja me incentivando ou escutando eventuais reclamações e frustrações. Obrigado a minha esposa Gabriela Correa Silva Rosso.

Aos professores membros da banca pelas contribuições.

Aos meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para que hoje mais essa etapa fosse vencida.

“Minha energia é o desafio,
minha motivação é o impossível,
e é por isso que eu preciso
ser, à força e a esmo, inabalável”.

Augusto Branco

RESUMO

As principais reservas de carvão do Brasil estão localizadas na região sul, onde está inserida a jazida mais importante, a mina de Candiota. Os programas de pesquisa mineral e planejamento de lavra de empresas que operam nesses depósitos de carvão são geralmente restritos a dados de perfuração e testemunhos de sondagem, apesar do potencial exploratório dos métodos geofísicos na prospecção de carvão. Este trabalho teve como objetivo investigar a capacidade do método sísmico conhecido como *Multichannel analysis of Surface Waves* (MASW) em identificar camadas de carvão na área de Candiota. O método MASW permite a obtenção de um modelo de camadas composto por uma camada de baixa velocidade (camada cega) e/ou camada relativamente fina (camada oculta) a partir das curvas de dispersão das ondas superficiais. Os problemas das camadas oculta e cega são limitações do método tradicional de refração sísmica e o cenário geológico relacionado às camadas de carvão pode abranger ambos os problemas. Além disso, a mina de Candiota apresenta condições favoráveis à aplicação do método MASW devido à baixa profundidade das ocorrências de carvão. O estudo foi baseado na análise de dados sísmicos sintéticos gerados a partir de um modelo conceitual de 3 camadas do depósito Candiota. As curvas de dispersão do modo fundamental das ondas de superfície Rayleigh foram geradas e os efeitos de cada um dos parâmetros do modelo sísmico foram avaliados, bem como a relação entre os parâmetros através de testes de função objetivo. Um novo algoritmo de inversão capaz de obter o modelo verdadeiro foi implementado. Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de inversão demonstraram o potencial do método MASW na identificação de camadas de carvão a partir de perfis de onda S e provou ser uma ferramenta poderosa para programas de exploração mineral de carvão.

Palavras-chave: Carvão; *Multichannel analysis of Surface Waves*; Exploração mineral.

ABSTRACT

The main coal reserves in Brazil are located in the southern region, where the most important coalfield, the Candiota mine, is inserted. The mineral research and mine planning programs of the companies operating in these coal deposits are generally restricted to drilling data and cores, despite the exploratory potential of geophysical methods in coal prospecting. This work aimed to investigate the ability of the seismic method known as Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) to identify coal seams in the Candiota area. The MASW method allows obtaining a layer model composed of a low-velocity (blind layer) and/or relatively thin layer (hidden layer) from the surface wave dispersion curves. The hidden and blind layer problems are pitfalls of the traditional seismic refraction method and the geological setting related to coal seams may encompass both problems. In addition, the Candiota mine has favorable conditions for applying the MASW method due to the shallow depths of the coal seams. The study was based on the analysis of synthetic seismic data generated from a 3-layer conceptual model of the Candiota deposit. The dispersion curves of the fundamental mode of the Rayleigh surface waves were generated and the effects of each of the parameters of the seismic model were evaluated, as well as the relationship between the parameters through objective function tests. A new inversion algorithm capable of obtaining the true model was implemented. The results obtained from the application of the inversion algorithm demonstrated the potential of the MASW method in identifying coal seams from S-wave profiles and proved to be a powerful tool for coal mineral exploration programs.

Keywords: Coal; Multichannel analysis of Surface Waves; Mineral exploration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Mapa fisiográfico do sul do Brasil e países vizinhos destacando a localização das jazidas de carvão mineral (feições amarelas). A área representada pelo contorno retangular vermelho aponta para a localização da Jazida de Candiota. O mapa inserido mostra o sul do Brasil no contexto do continente sul-americano; e (b) Mapa de contexto geológico da mina de Candiota mostrando as formações da Bacia do Paraná e o embasamento cristalino presente na área de estudo. A divisa do município de Candiota e a reserva carbonífera são representadas por polígonos com contornos lisos preto e amarelo, respectivamente.....	19
Figura 2 - Perfil esquemático do furo de sondagem MVI-39.....	21
Figura 3 - Movimentação das partículas associada a passagem de ondas sísmicas de corpo, onde λ é o comprimento de onda.....	25
Figura 4 - Movimentação das partículas associada a passagem de ondas sísmicas de superfície: (a) componentes horizontal e vertical da onda S (SH e SV respectivamente); (b) movimentação descrita pelas partículas em propagação de ondas <i>Rayleigh</i> e (c) movimentação descritas pelas partículas em propagação de ondas <i>Love</i>	27
Figura 5 – Espectro F-K de um dado sísmico apresentando as curvas de dispersão do modo fundamental e segundo modo.....	29
Figura 6 – Figura representativa do processamento de dados sísmicos através do método MASW. (a) Registro sísmico de campo; (b) obtenção de curvas de dispersão; (c) inversão da curva de dispersão obtida e (d) modelo obtido a partir de inversão.....	31
Figura 7 - Diagrama esquemático do algoritmo CRS ilustrando o procedimento de busca para uma função objetivo bidimensional arbitrária, onde são parâmetros do modelo ($n = 2$). Neste exemplo utilizamos um conjunto de 5 pontos ($N = 5$ modelos) delimitados pelo domínio de busca V (retângulo vermelho tracejado).....	35
Figura 8 - Fluxograma do algoritmo de inversão CRS de (Price 1977).....	36
Figura 9 - Análise de sensibilidade das curvas de dispersão de <i>Rayleigh</i> contra	

parâmetros de camada: modo fundamental das curvas de dispersão das ondas de *Rayleigh* em termos de velocidade de fase (eixo de ordenadas) por frequência (eixo de abcissas) para um modelo sísmico de 3 camadas variando individualmente densidade e espessura de cada camada do modelo (perfis inseridos no canto esquerdo inferior). Os modelos e suas respectivas curvas de dispersão são representados por cores distintas. O índice sobrescrito representa o número da camada.....39

Figura 10 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - a') Mapas da função objetivo (semelhantes a "cartas topográficas") resultantes da combinação das 3 camadas com todos os parâmetros do modelo. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.....42

Figura 11 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - r) Mapas da função objetivo (semelhantes a mapas topográficos) resultantes da combinação das 3 camadas com as densidades e espessuras do modelo. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.....43

Figura 12 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - j) Mapas da função objetivo (semelhantes a mapas topográficos) resultantes da combinação das densidades e

espessuras dos modelos. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.....44

Figura 13 - Gráficos de dispersão dos parâmetros densidade e espessura de cada camada da população de modelos (eixo vertical) em função do número de iterações do algoritmo de inversão (eixo horizontal). A linha preta sólida é a linha de referência no valor verdadeiro do parâmetro. As cores dos pontos estão relacionadas ao valor da função objetivo do modelo relacionado.....47

Figura 14 - (a) Ajuste das curvas de dispersão correspondentes ao modelo sintético de referência (cruzes azuis) e ao melhor modelo (linha preta). (b)(c) e (d) perfis de densidade resultantes do melhor modelo (linhas pretas) em relação aos perfis do modelo sintético alvo (linha azul).....48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição litológica do furo de sondagem MVI-39.....	20
Tabela 2 - Parâmetros físicos do modelo sísmico sintético de 3 camadas com faixas de variação descritas entre colchetes.....	37
Tabela 3 - Comparação dos valores dos parâmetros do modelo sintético e do melhor modelo obtido a partir do algoritmo CRS implementado.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo Geral.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	18
2.1 Propriedades do Carvão.....	21
3 ESTADO DA ARTE.....	23
4 MÉTODO.....	24
4.1 Ondas Sísmicas.....	24
4.1.1 Ondas de corpo.....	24
4.1.2 Ondas superficiais.....	26
4.2 Curvas de Dispersão.....	27
4.3 <i>Multi-channel Analysis of Surface Waves</i>.....	29
4.4 Problema Direto.....	31
4.5 Problema Inverso.....	32
4.6 Função Objetivo.....	33
4.7 Algoritmo de Inversão CRS.....	34
5 MODELO SÍSMICO CONCEITUAL.....	37
6 RESULTADOS.....	38
6.1 Análise das Curvas de Dispersão.....	38
6.2 ANÁLISE DA FUNÇÃO OBJETIVO.....	40
6.3 ALGORITMO DE INVERSÃO.....	45
7 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é um combustível fóssil abundante e relativamente barato, com reservas amplamente distribuídas ao redor do mundo que o tornam uma das bases da matriz energética global (Daemen, 2004). Há indícios de uso do carvão para fins energéticos desde 1500 a.C quando foi descoberto na China, porém só passou a ser explorado e utilizado em grande escala a partir dos séculos XVIII e XIX com a revolução industrial. Desde então o mercado do carvão mineral se expandiu e continuou a crescer (Paul, 2004).

Hoje, o carvão ainda desempenha um papel vital na demanda de energia primária do mundo, sendo responsável por cerca de 39% da produção de energia elétrica mundial. A crescente demanda por fontes de energia tornam o carvão um recurso natural importante e estratégico, garantindo a estabilidade de preço em países emergentes (Miller, 2005; Thomas, 2020).

No Brasil, o carvão é utilizado principalmente como complemento em sua matriz energética. Os depósitos de carvão mineral estão localizados no sul do Brasil, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O Rio Grande do Sul conta com 88% da reserva brasileira, com 38% da produção de carvão nacional proveniente da mina de Candiota (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008).

A prospecção e o planejamento da lavra do carvão é tradicionalmente realizado a partir de modelos criados com base em sondagens geológicas que têm custo relativamente alto e fornecem informações pontuais sobre o depósito, ao contrário de resultados de perfis geofísicos. A integração com dados geofísicos possibilita uma modelagem detalhada da jazida com custos mais baixos (Krey, 1963; Buchanan, 1981; Gochioco; Cotten, 1989; Gochioco, 1990; Gochioco, 2000). A perfilagem geofísica de poços é comumente utilizada na prospecção de carvão, por possibilitar a identificação da camada e estimativa da qualidade do carvão (Webber *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2010). Dentre os principais perfis utilizados destacam-se o uso de *logs* de eletrorresistividade, gama natural e densidade (gama-gama) (Christoffel; Kayal, 1989; Webber *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2010).

O contraste de propriedades físicas do carvão favorece o uso de métodos geofísicos na caracterização litológica destas camadas de subsuperfície. Por exemplo, as sequências carboníferas são geralmente caracterizadas por baixos valores de velocidade sísmica e densidade em relação às demais rochas

sedimentares (Dresden; Ruter, 1994).

Como resultado, os métodos sísmicos têm sido amplamente empregados na exploração de carvão desde a década de 60 (Krey, 1963; Mason; Buchanan; Booer, 1980; Gochioco; Cotten, 1989; Pan *et al.*, 2016). Por exemplo, o método de reflexão sísmica de alta resolução tem se mostrado eficiente no mapeamento de jazidas carboníferas e identificação de falhas geológicas (Greenhalgh; Suprajitno; King, 1986; Palmer, 1987). Contudo, a baixa velocidade sísmica que caracteriza o carvão mineral limita o uso de métodos mais tradicionais como a sísmica de refração na identificação destas camadas.

O método sísmico conhecido como *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) permite resolver modelos descritos por uma camada de baixa velocidade (camada oculta), que consiste em uma das limitações da aplicação do método de refração sísmica. Além disso, o método fornece modelos de onda S a partir de dados de fontes predominantemente compressivas registrados apenas por sensores verticais. Por esta razão, MASW é um das ferramentas geofísicas mais adequadas de superfície para prospecção de carvão devido ao alto contraste de densidade e velocidade sísmica do mesmo com camadas vizinhas (Dresden; Rüter, 1994).

A fim de resolver os problemas de ambiguidade inerentes ao método geofísico e superar algumas limitações dos *softwares* disponíveis, principalmente no que se refere a determinação correta das espessuras das camadas de baixa velocidade, como no caso de sequências carboníferas, foi implementado um algoritmo de inversão conhecido como *Controlled Random Search* (CRS) de Price (1977). Dessa forma se torna possível a identificação de camadas finas com inversão de velocidade associadas as camadas de carvão.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral verificar a aplicabilidade do método sísmico MASW na prospecção de carvão utilizando dados sísmicos sintéticos gerados a partir de um modelo elaborado através de informações de testemunhos de sondagem da mina de Candiota.

1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- a) Definição do modelo sísmico sintético a partir de informações de testemunhos de sondagem realizados na área de estudos e parâmetros físicos de referência para cada litologia da seção;
- b) Realização de testes de sensibilidade dos parâmetros físicos do modelo sísmico e avaliação dos efeitos de cada parâmetro na curva de dispersão;
- c) Implementação do algoritmo de inversão CRS para uso em dados sísmicos do método MASW;
- d) Análise do comportamento da função objetivo e correlação entre parâmetros físicos do modelo sísmico;
- e) Avaliação do processo de convergência algoritmo de inversão em termos de eficiência, precisão e incerteza a partir de gráficos de dispersão dos modelos obtidos a cada iteração;
- f) Obtenção de um modelo de inversão sísmica representativo da configuração geológica da mina Candiota.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

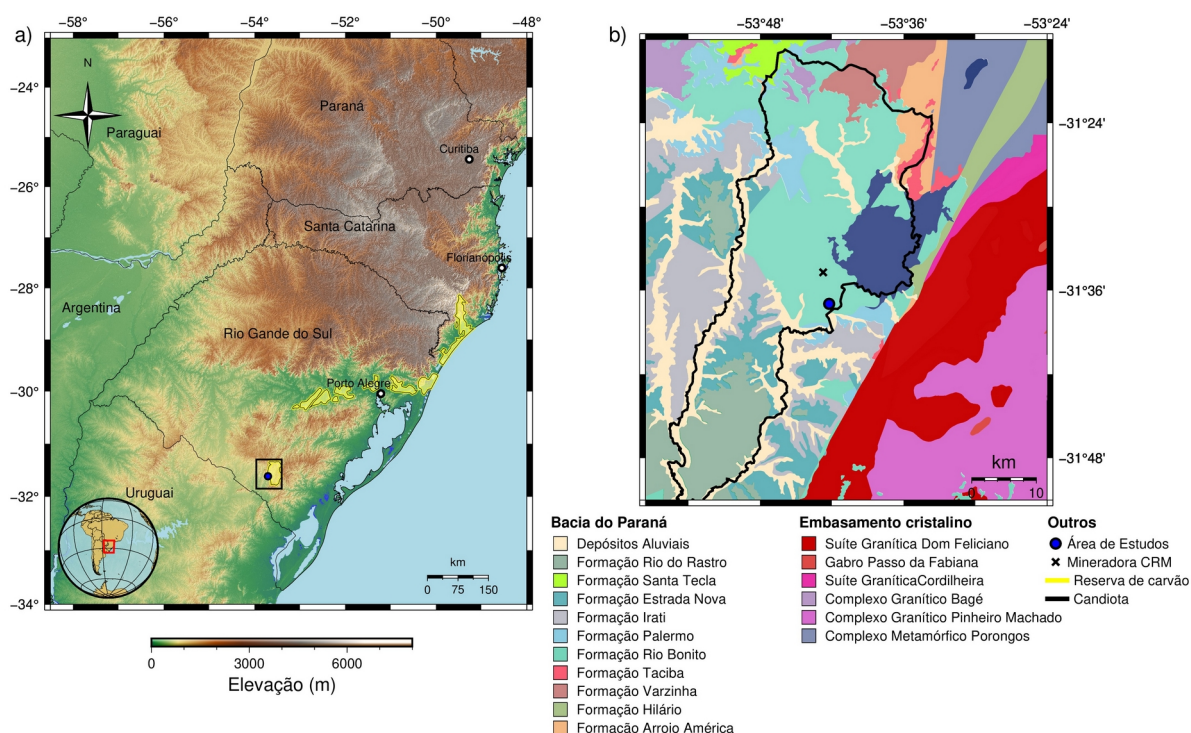
A área de estudo está inserida na porção sul do Brasil, situada no município de Candiota, Rio Grande do Sul (Figura 1).

De acordo com Zalán *et al.* (1990), as camadas de carvão em Candiota são atribuídas à formação Rio Bonito na Bacia do Paraná. White (1908) realizou seus primeiros estudos sobre a Formação Rio Bonito, seguido de Machado e Castanho (1956), que utilizaram o termo Formação Rio Bonito para descrever todos os sedimentos de carácter continental flúvio-lacustres, com intercalações de leitos carbonosos compreendidos entre o Grupo Itararé e Formação Palermo (*apud* Rossi, 2008). De acordo com a análise estratigráfica da sequência de Holz, Vieira e Kalkreuth (2000), as camadas de carvão de importância econômica da Formação Rio Bonito estão associadas a um sistema deposicional laguna barreira.

A Formação Rio Bonito é marcada inicialmente por um trato de sistemas de mar baixo seguido por um trato de sistemas transgressivo, no qual as mais importantes camadas de carvão foram depositadas (Holz; Kalkreuth, 2004). O trato de sistemas transgressivos pode ser dividido em quatro para-sequências: a primeira composta por arenitos que estão em *onlap* sobre o trato de sistemas de mar baixo, a segunda é formada por tempestitos de um sistema de ilha barreira-laguna onde foram formados os carvões das camadas inferiores, a terceira para-sequência composta por ciclos tempestíticos que formaram as camadas de carvão Banco Louco, Candiota Superior e Candiota Inferior, na quarta para-sequência não houve a deposição de turfa suficiente para a formação de carvão (Holz; Kalkreuth, 2004).

O depósito Candiota corresponde a uma sequência de finas camadas de carvão intercaladas por arenitos, argilitos e folhelhos. A espessura média do pacote de camadas de carvão é de 4,5 m, localmente ultrapassando 6 m (Gomes *et al.*, 1998). Silva e Kalkreuth (2005) classificaram o carvão Candiota como sub-betuminoso (baixo rank A) de acordo com a classificação internacional (UN-ECE). Atualmente a jazida de Candiota está sendo lavrada pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM) e pela Seival Sul Mineração (SSM).

Figura 1 - (a) Mapa fisiográfico do sul do Brasil e países vizinhos destacando a localização das jazidas de carvão mineral (feições amarelas). A área representada pelo contorno retangular preto aponta para a localização da Jazida de Candiota. O mapa inserido mostra o sul do Brasil no contexto do continente sul-americano; e (b) Mapa de contexto geológico da mina de Candiota mostrando as formações da Bacia do Paraná e o embasamento cristalino presente na área de estudo. A divisa do município de Candiota e a reserva carbonífera são representadas por polígonos com contornos lisos preto e amarelo, respectivamente.



Fonte: *Shapefile* de limites estaduais proveniente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006); modelo digital de elevação SRTM3 extraído de *Consulative Group for International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information*, (CGIAR-CSI, 2004); *shapefile* de limites geológicos adaptado de Serviço Geológico do Brasil (2010); *Shapefile* da reserva de carvão brasileira adaptado de Süffert (1997)

A Figura 2 mostra um perfil estratigráfico do furo MVI-39 (UTM 243567 mE 6498956 mN, zona 22) realizado pela CRM em Candiota. Na localização do furo o depósito Candiota corresponde a três camadas de carvão de poucos metros de espessura: Banco Louco corresponde a uma camada com menos de 1 m de espessura, sendo a camada de carvão mais rasa, seguida das camadas Candiota Superior e Candiota Inferior, ultrapassando os 2,5 m de espessura localizadas a cerca de 20 m de profundidade na área estudada intercaladas por finos pacotes de rochas estéreis.

Como mostrado na figura 2, os estratos do topo da sequência são compostos por arenitos, folhelhos e argilitos, enquanto que a base da sequência sedimentar é

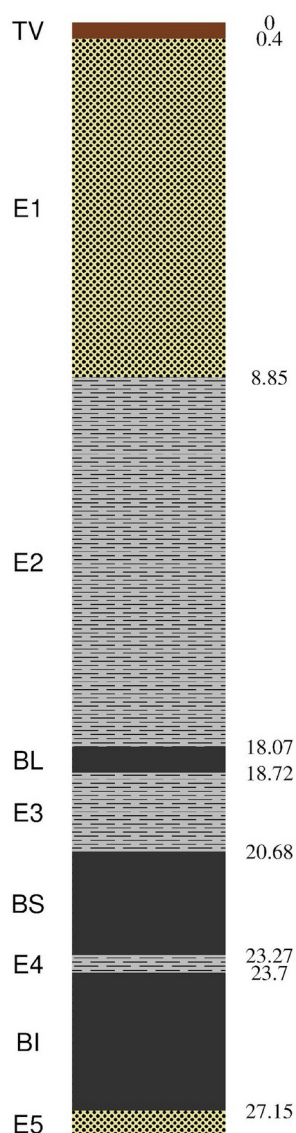
composta predominantemente por arenitos (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição litológica do furo de sondagem MVI-39.

Sigla	Profundidade (m)	Litologia
TV	0 – 0,40	Solo orgânico
E1	0,40 – 8,85	Arenitos da formação Palermo (estéril 1)
E2	8,85 – 18,07	Folhelhos e argilitos (estéril 2)
BL	18,07 – 18,72	Camada de carvão (Banco Louco)
E3	18,72 – 20,68	Argilitos (estéril 3)
BS	20,68 – 23,27	Camada de carvão (Candiota Superior)
E4	23,27 – 23,70	Argilitos (estéril 4)
BI	23,70 – 27,15	Camada de Carvão (Candiota Inferior)
E5	27,15 – 27,80	Estéril abaixo da camada Candiota

Fonte: dados fornecidos pela Companhia Riograndense de Mineração em 2017.

Figura 2 - Perfil esquemático do furo de sondagem MVI-39



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela Companhia Riograndense de Mineração em 2017.

2.1 Propriedades do Carvão

O carvão é um combustível fóssil, sólido, proveniente de uma rocha sedimentar que se formou a partir de plantas terrestres (*Embryophyta*) crescendo profusamente em zonas úmidas antigas. Após a deposição, a turfa é coberta por sedimentos, geralmente argila e areia, onde processos diagenéticos agiram sobre o material causando um enriquecimento geral de carbono (coalificação) (Pohl, 2011).

O alto teor de carbono do carvão gera um contraste de propriedades físicas

com as demais litologias de uma sequência carbonífera tradicional (Dresden; Rüter, 1994), respondendo bem a certos métodos geofísicos. O carvão de forma geral é marcado por baixa densidade, baixa velocidade sísmica (ondas P e S), baixa susceptibilidade magnética, alta resistividade elétrica e baixa radioatividade em relação às rochas adjacentes típicas (Dresden; Rüter, 1994; Thomas, 2020).

Os valores de velocidade sísmica e densidade do carvão apresentam grandes intervalos de variações de acordo com sua composição e qualidade (*rank*) (Morcote; Mavko; Prasad, 2010). O carvão é classificado com base em parâmetros como matéria volátil, carbono fixo e poder calorífico (Speight, 2015). Categorias e parâmetros de qualidade do carvão podem apresentar nomenclaturas diferentes em diferentes países, mas em geral, são classificados em ordem crescente de qualidade em linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito (Speight, 2015).

De acordo com Morcote, Mavko e Prasad (2010) a velocidade sísmica do carvão sofre um aumento com o aumento do *rank*. Grandes variações de velocidade sísmica de rochas sedimentares também estão associadas a profundidade da rocha e o seu tempo geológico, sendo maiores com o aumento da profundidade e do tempo de deposição (Faust, 1951).

3 ESTADO DA ARTE

O contraste de propriedades físicas entre o carvão e as camadas adjacentes fez com que os métodos geofísicos tenham sido amplamente explorados na mineração. Devido a baixa densidade do carvão, métodos sísmicos vem sendo utilizados desde a década de 60 e estão cada vez mais presentes no setores de pesquisa e exploração. Krey (1963) utilizou registros de ondas superficiais na identificação de descontinuidades laterais em camadas de carvão em uma mina na Alemanha.

Gochioco (1990) utilizou do método sísmico de reflexão com fonte de alta frequência (*vibroseis*) na verificação da continuidade de uma camada de carvão. Com os dados sísmicos associados aos furos de sondagem foi possível a identificação de falhas e paleocanais na região entre os furos que geram uma descontinuidade lateral na camada de carvão (Gochioco, 1990)

Gochioco (2000) com um levantamento sísmico 3D de alta frequência foi capaz de mapear uma camada irregular de cavão em meio a arenitos e folhelhos e a identificação de falhas.

Tselentis e Paraskevopoulos (2002) combinaram dados de um levantamento sísmico de alta resolução a dados de sondagem para obtenção de um modelo 3D da Bacia Domeniko, trazendo informações estruturais e de geometria mais completas sobre o depósito utilizadas no planejamento de lavra da mina.

Cai *et al.* (2014) combinou tomografia sísmica ativa e passiva em minas de carvão subterrâneas na China. Com o método ativo foi possível a detecção de descontinuidades geológicas e outras estruturas antes da extração dos painéis *longwall*. A sísmica passiva foi utilizada no monitoramento contínuo das mudanças de tensão e potencial de ruptura da rocha durante o processo de extração do minério.

Métodos sísmicos também podem ser utilizados na redução de riscos de desastres geológicos da mina. Jingbin *et al.* (2016) utilizaram técnicas de análise de atributos sísmicos em dados de reflexão de alta resolução para identificação de pequenas falhas, áreas de possível colapso, túneis e colunas de subsidência em uma mina no leste da China a mais de 500m de profundidade.

Apesar do grande número de estudos já desenvolvidos, o desenvolvimento tecnológico dos métodos e de novos *softwares* trazem novas pesquisas a serem desenvolvidas no setor mineral.

4 MÉTODO

4.1 Ondas Sísmicas

Os métodos sísmicos fundamentam-se nos conceitos de propagação de ondas elásticas. Ondas sísmicas consistem em pacotes de energia de deformação elástica que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica (Sengbush, 1983) e são classificadas em dois tipos principais: ondas de corpo, que se propagam através do volume de um meio; e ondas superficiais, que se propagam ao longo de uma superfície entre meios com propriedades elásticas contrastantes (Sheriff; Geldart, 1995).

4.1.1 Ondas de corpo

Ondas de corpo são subdivididas em ondas compressivas (ondas P) e cisalhantes (ondas S). As ondas P propagam-se por deformação uniaxial (compressão e expansão) das partículas na direção de propagação da onda (Figura 3a) (Sengbush, 1983), apresentam velocidade de propagação maior que as ondas cisalhantes, sendo as primeiras a serem registradas (Sengbush, 1983). A velocidade de propagação das ondas P em determinado meio é dada pela Equação 1:

$$V_p = \sqrt{\frac{E + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

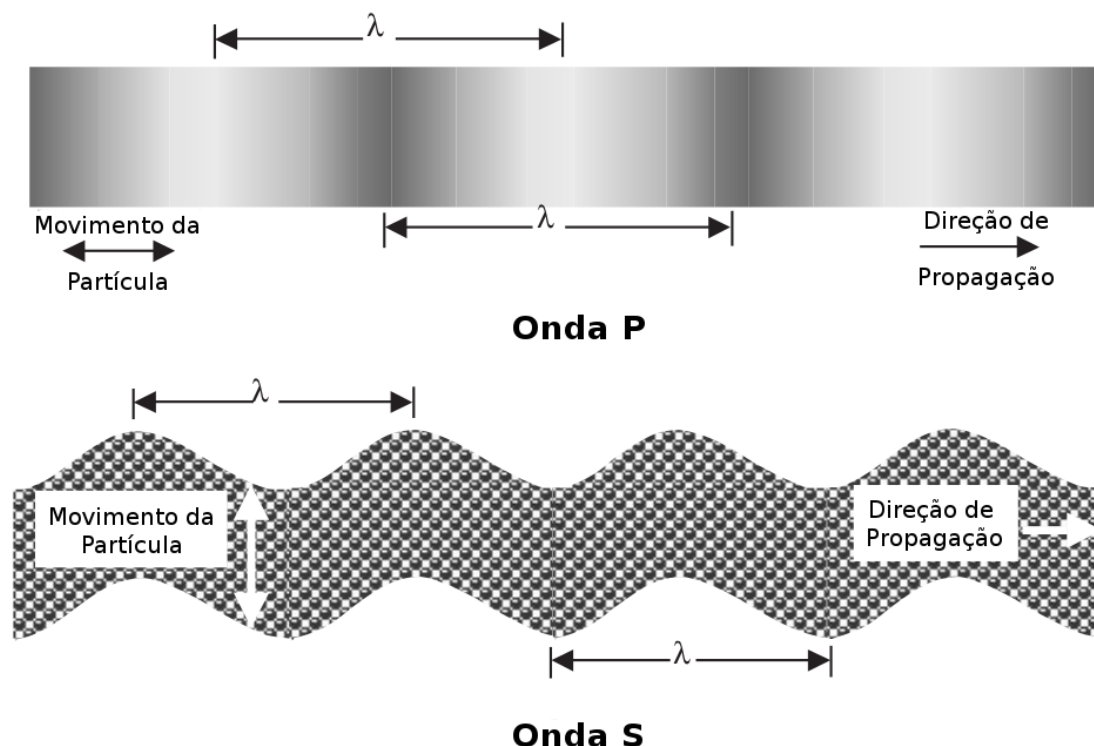
no qual V_p é a velocidade de propagação da onda P, E o módulo de Young, μ a constante de rigidez e ρ a densidade do material em que a onda se propaga.

As ondas S propagam-se por cisalhamento puro, onde as partículas se movimentam em um plano perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 3b). Ondas cisalhantes não se propagam em meios fluidos por não resistirem a mudança de forma ($\mu=0$) (Sengbush, 1983). A velocidade de propagação das ondas S é dada pela Equação 2:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

no qual V_s é a velocidade de propagação da onda S, μ a constante de rigidez e ρ a densidade do material em que a onda se propaga.

Figura 3 - Movimentação das partículas associada a passagem de ondas sísmicas de corpo, onde λ é o comprimento de onda.



Fonte: extraído de Gadallah e Fisher (2005).

A velocidade sísmica das rochas depende de diferentes fatores, incluindo porosidade, litologia, cimentação, profundidade, presença de fluidos, dentre outros (Sheriff; Geldart, 1995). No entanto, a razão de velocidades V_p/V_s é uma medida adimensional relacionada ao conteúdo de sílica das rochas, que possibilita classificá-las segundo sua composição mineral em félsica, intermediária ou máfica (Gajewski; Rabbel, 1999).

A partir da razão V_p/V_s , é possível determinar o valor da razão de *Poisson* de uma rocha (Equação 3). A razão de *Poisson* é uma constante elástica que define a relação entre a deformação transversal e longitudinal sofrida por um corpo quando aplicada uma tensão unidirecional (Sengbush, 1983).

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (3)$$

Na qual σ é a razão de *Poisson*, V_p e V_s as velocidades de propagação das onda P e S, respectivamente.

A razão de *Poisson* apresenta valores de 0 a 0,5 sendo que nas rochas este

coeficiente pode variar de acordo com propriedades como a anisotropia, pressão do poro e composição mineral (Zandt; Ammon, 1995).

4.1.2 Ondas superficiais

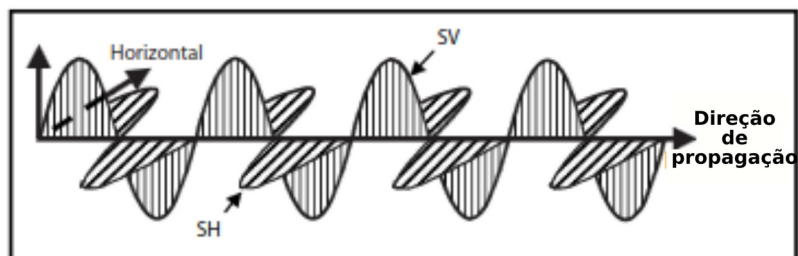
Ondas superficiais se propagam ao longo da superfície de meios sólidos, sendo divididas em ondas *Rayleigh* e ondas *Love* (Sheriff; Geldart, 1995). São resultantes da combinação de movimentos compressivos das partículas com as componentes horizontal e vertical da onda S (SH e SV respectivamente – Figura 4) (Sheriff; Geldart, 1995).

A primeira foi denominada em homenagem a Lord Rayleigh, um cientista britânico do século XIX que descreveu o fenômeno. As ondas *Rayleigh* são caracterizadas por um movimento elíptico retrógrado das partículas, gerado pela combinação do movimento compressivo na direção de propagação com a componente vertical da onda S (SV) (Figura 4b) (Sheriff; Geldart, 1995).

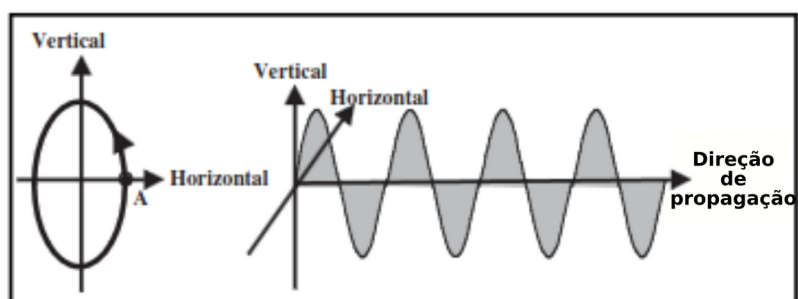
O *ground-roll*, um tipo de ruído frequentemente encontrado em registros sísmicos, é um registro de ondas *Rayleigh*. O *ground-roll* é o evento de maior amplitude num registro sísmico e mascara os eventos refletidos desejados (Gadallah; Fisher, 2005).

O segundo tipo de ondas de superfície são as ondas *Love*, que consistem em um movimento essencialmente SH restrito à superfície do meio (Sheriff; Geldart, 1995). A velocidade de propagação da onda *Love* é ligeiramente mais lenta que a velocidade da onda *Rayleigh*.

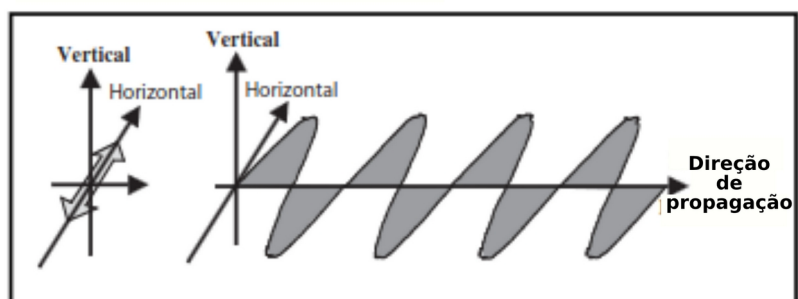
Figura 4 - Movimentação das partículas associada a passagem de ondas sísmicas de superfície: (a) componentes horizontal e vertical da onda S (SH e SV respectivamente); (b) movimentação descrita pelas partículas em propagação de ondas *Rayleigh* e (c) movimentação descritas pelas partículas em propagação de ondas *Love*.



a) Ondas SV e SH



b) Ondas Rayleigh



c) Ondas Love

Fonte: extraído de Gadallah e Fisher (2005).

4.2 Curvas de Dispersão

Num meio estratificado, com contraste vertical de velocidade sísmica, ondas superficiais se propagam com velocidades distintas para cada frequência (velocidade de fase), conseqüentemente um comprimento de onda diferente, essa propriedade é denominada dispersão (Nazarian; Stokoe; Hudson, 1983).

Ondas de superfície de comprimentos de onda variados atingem diferentes profundidades e viajam com a velocidade dos meios que estão percorrendo (Dobrin,

1951). Comprimentos de onda maiores (menores frequências) atingem profundidades maiores que comprimentos de onda mais curtos (maiores frequências) para um determinado modo, em geral apresentam maior velocidade de fase e são mais sensíveis a propriedades elásticas de camadas mais profundas (Babuska; Clara, 1991).

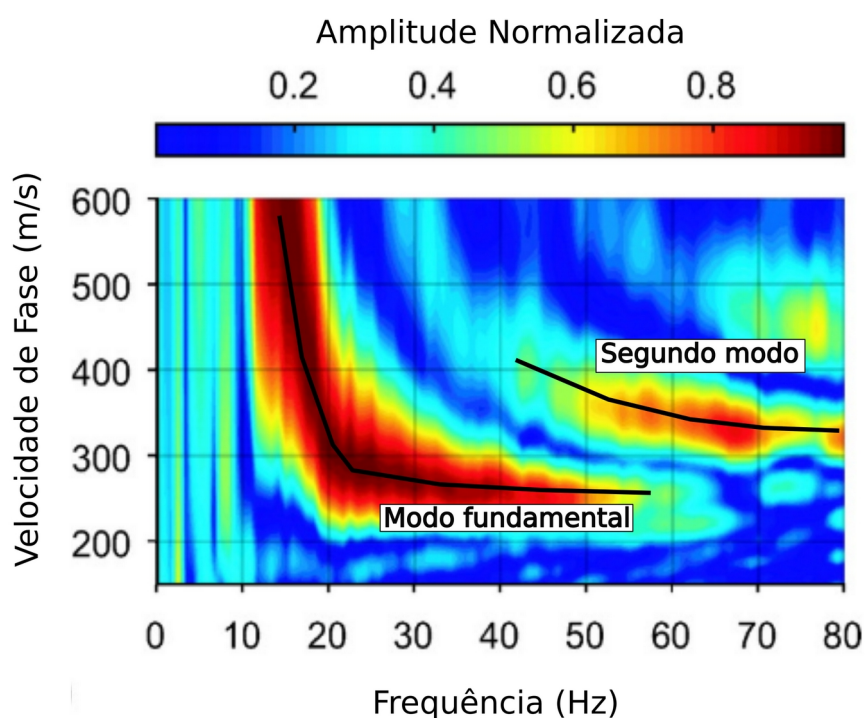
A forma com que o fenômeno de dispersão ocorre, fornece informações elásticas sobre o meio, que começaram a ser desenvolvidas em estudos de geofísica aplicada no início da década de 1980. A curva de dispersão é tradicionalmente apresentada em um gráfico de velocidade *versus* frequência ou comprimento de onda e é obtida através de um gráfico da energia de dispersão no domínio F-V de um registro *ground-roll*.

Uma série de ondas superficiais de frequências diferentes podem apresentar a mesma velocidade de fase. Estas ondas são conhecidas como modos e são caracterizadas pelo seu diferente número de planos nodais horizontais (Garland, 1979). Em outras palavras, uma determinada frequência pode estar associada a mais de uma velocidade de fase da onda *Rayleigh*, simplesmente porque estas ondas podem viajar em velocidades diferentes para uma determinada frequência. A velocidade mais baixa para qualquer frequência é chamada de velocidade do modo fundamental (primeiro modo). A próxima velocidade superior à velocidade de fase do modo fundamental é denominada velocidade de fase do segundo modo e assim sucessivamente (Figura 5) (Garland, 1979).

Os algoritmos classicamente utilizados para o cálculo dos espectros de energia de dispersão de um registro sísmico são: a transformação F-K, a transformada TAU-P e a mudança de fase (*phase shift*) (Park; Miller; Xia, 1998).

Após obtenção da curva de dispersão, um processo de inversão das ondas superficiais é utilizado para a obtenção das propriedades elásticas de subsuperfície (Park; Miller; Xia, 1999). A precisão da curva de dispersão pode ser aprimorada com uma análise preliminar de pré-processamento (Park; Miller; Xia, 1999).

Figura 5 – Espectro F-K de um dado sísmico apresentando as curvas de dispersão do modo fundamental e segundo modo.



Fonte: adaptado de Olafsdottir, Erlingsson e Bessason (2018).

4.3 Multi-channel Analysis of Surface Waves

Nazarian, Stokoe e Hudson (1983) desenvolveram um método sísmico que utiliza o registro de ondas superficiais para gerar um perfil de V_s para o meio próximo à superfície a partir da dispersão de ondas superficiais, denominado *Spectral Analysis of Surface Waves* (Análise Espectral de Ondas de Superfície - SASW). O SASW usa a análise espectral do *ground-roll* gerado por uma fonte ativa e registrado por um par de receptores. Os modelos de V_s obtidos a partir do *ground-roll* possibilitam a identificação de mudanças litológicas e/ou petrofísicas de subsuperfície (Park; Miller; Xia, 1999).

No SASW há a necessidade de realizar múltiplos registros de tiro para obtenção de dados num determinado local, aumentando a mão de obra e tempo de aquisição de dados para obtenção do perfil de V_s (Nazarian; Stokoe; Hudson, 1983).

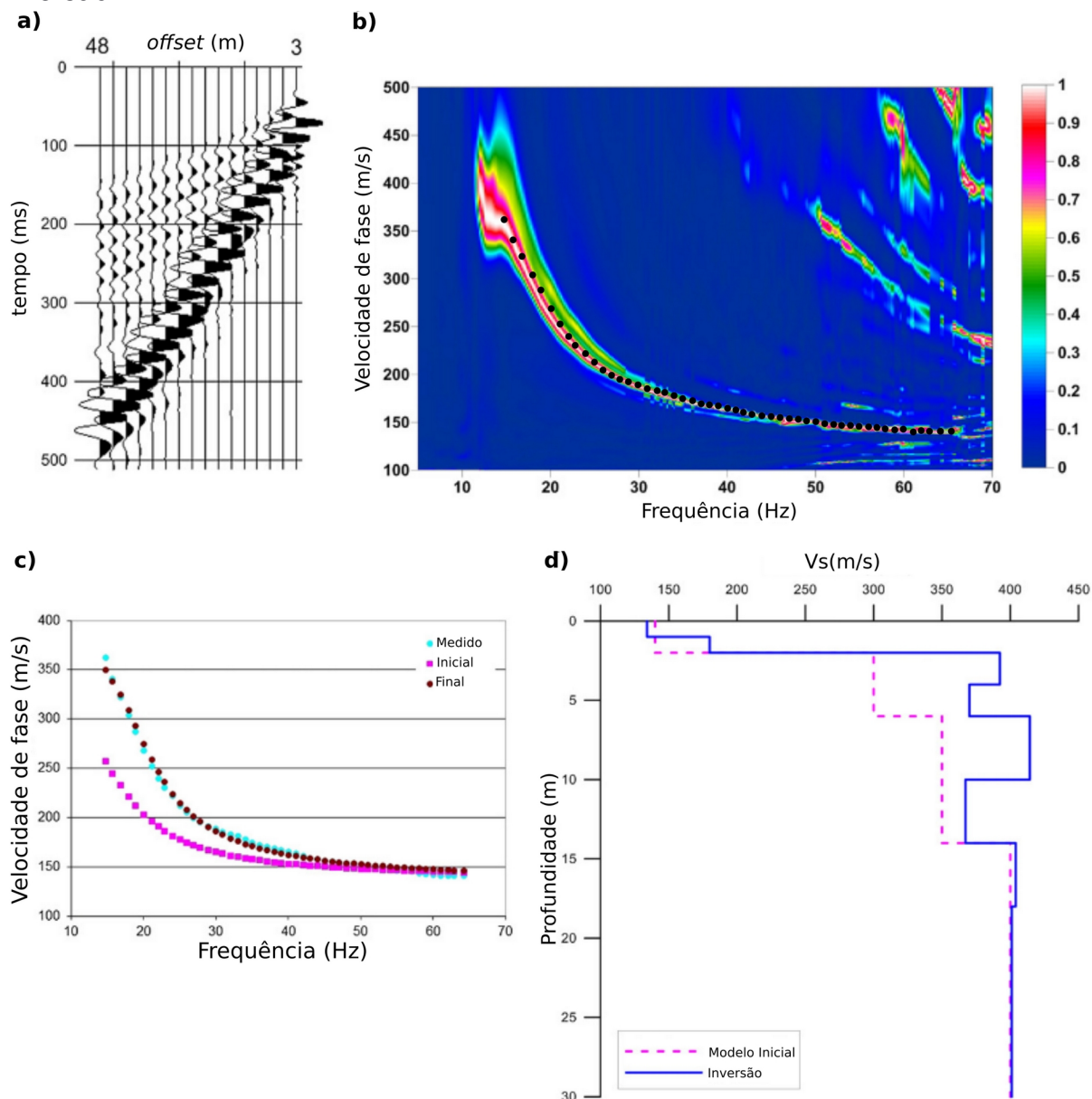
No final da década de 1990 foi introduzido por Park, Miller e Xia (1999) o método da Análise Multicanal de Ondas de Superfície, do inglês *Multi-channel*

Analysis of Surface Waves (MASW), um aprimoramento do SASW. O MASW busca eliminar a necessidade de múltiplos registros para obtenção do perfil de V_s através do uso de múltiplos receptores (geofones) na aquisição sísmica de campo.

O MASW torna capaz a identificação de estruturas próximas à superfície que dificilmente podem ser identificadas por métodos sísmicos tradicionais. Por exemplo, o método de reflexão sísmica de alta resolução que pode falhar na identificação de alvos muito rasos ou abaixo do limite de resolução do levantamento.

O processo utilizado para obter um perfil de V_s através da análise espectral de ondas superficiais envolve basicamente três etapas: aquisição do *ground-roll* com uso de múltiplos receptores (Figura 6a), construção da curva de dispersão (Figura 6b) e inversão do perfil a partir da curva de dispersão para obtenção de modelos de velocidade (Figuras 6c e 6d) (Park et al., 1999). Esse tipo de análise fornece parâmetros fundamentais para avaliação da rigidez do meio de subsuperfície utilizados em estudos geotécnicos.

Figura 6 – Figura representativa do processamento de dados sísmicos através do método MASW. (a) Registro sísmico de campo; (b) obtenção de curvas de dispersão; (c) inversão da curva de dispersão obtida e (d) modelo obtido a partir de inversão.



Fonte: Adaptado de Xia (2014).

4.4 Problema Direto

O processo de inversão é diretamente relacionado a resolução dos problemas direto e inverso. A distinção entre problema direto e inverso para um dado fenômeno trata-se do que se interpreta como causa e efeito do mesmo. Problema direto é aquele que contém informações suficientes e exatas em relação à um determinado fenômeno físico, para o qual podemos encontrar uma solução única, estável e bem

definida (Groetsch, 1999).

Um problema é dito como direto quando satisfeitos três requisitos essenciais (Engl; Hanke; Neubauer, 1996):

- a) Existência – problema deve apresentar solução;
- b) Unicidade – a solução deve ser única;
- c) Estabilidade – a solução deve exibir dependência contínua em relação aos dados que a originou.

Quando não satisfeito um dos requisitos acima temos um problema inverso. A solução de um problema inverso consiste em determinar as causas baseada na observação dos seus efeitos (Engl; Hanke; Neubauer, 1996).

Na sísmica tratamos do problema direto quando fazemos uso de algoritmos de modelagem, onde é possível calcular o sismograma sintético a partir da distribuição de propriedades elásticas do meio em subsuperfície.

Em estudos de cunho geofísico comumente tratamos do problema inverso, onde é buscado um modelo físico capaz de reproduzir a assinatura de dados adquiridos em campo.

4.5 Problema Inverso

No problema inverso as observações não são suficientes para determinação de todos os parâmetros desconhecidos, dessa forma não temos um solução única (Engl; Hanke; Neubauer, 1996). A teoria de inversão permite-nos fazer inferências sobre determinado sistema físico a partir dos dados observados. Dados amostrais estão sujeitos a incerteza da medida, o que torna essas inferências, portanto, estatísticas (Groetsch, 1999).

O processo de inversão consiste resumidamente em inferir os parâmetros do modelo que descreve o meio físico, cuja solução do problema direto para este modelo propicie valores calculados os mais próximos possíveis dos dados observados. Para isso é calculado o problema direto para um número grande de modelos até que se obtenha um que represente adequadamente os dados amostrais (Groetsch, 1999).

Geralmente, este processo é complexo, em virtude de todas as incertezas inerentes ao problema inverso, tais como (Groetsch, 1999):

- a) Domínio experimental e teórico dos processos envolvidos;
- b) Possibilidade de modelamento matemático do processo;
- c) Domínio experimental e teórico do problema direto;
- d) Entendimento das informações relacionadas ao problema inverso;
- e) Desenvolvimento de algoritmos para solução numérica do problema inverso.

Métodos matemáticos altamente sofisticados de otimização de busca são necessários na obtenção de um melhor ajuste para um conjunto de dados e assim a obtenção de um resultado consistente para o problema.

O método de inversão é escolhido de acordo com o número de equações e incógnitas que são fornecidos para resolução do sistema que descreve o fenômeno físico (Colton; Kirsch, 1996). Com isso, diferentes algoritmos de inversão foram desenvolvidos buscando a obtenção de modelos consistentes mesmo em espaços de parâmetros multidimensionais (Olson; Nelson, 1975; Price, 1977). A partir da implementação computacional destes algoritmos, vários *softwares* de inversão de dados geofísicos têm sido criados.

4.6 Função Objetivo

A função objetivo, também conhecida como função custo, perda ou desajuste, desempenha um papel fundamental em algoritmos de otimização aplicados a problemas inversos (Steven, 1993). O objetivo do algoritmo é encontrar os valores dos parâmetros que minimizam ou maximizam a função objetivo. A formulação matemática que define a função objetivo é geralmente descrita pela norma-Lp. Na prática, a norma mede a distância (diferença) entre os dados observados e os dados calculados a partir da modelagem direta usando um vetor de parâmetros escolhidos arbitrariamente no espaço de modelos (Steven, 1993).

Neste trabalho, a função objetivo utilizada considerou a norma L2, também chamada de norma euclidiana, que é representada pela Equação 5 (Steven, 1993):

$$f_{obj} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nf} \frac{(v_{di} - v_{ci})^2}{nf_i}} \quad (5)$$

onde f_{obj} é o valor da função objetivo que representa a distância entre uma curva de dispersão calculada e uma curva observada, v_{di} é a velocidade da curva de dados na frequência f_i , v_{ci} é a velocidade da curva calculada na frequência f_i e nf é o número amostras de frequência consideradas (Steven, 1993).

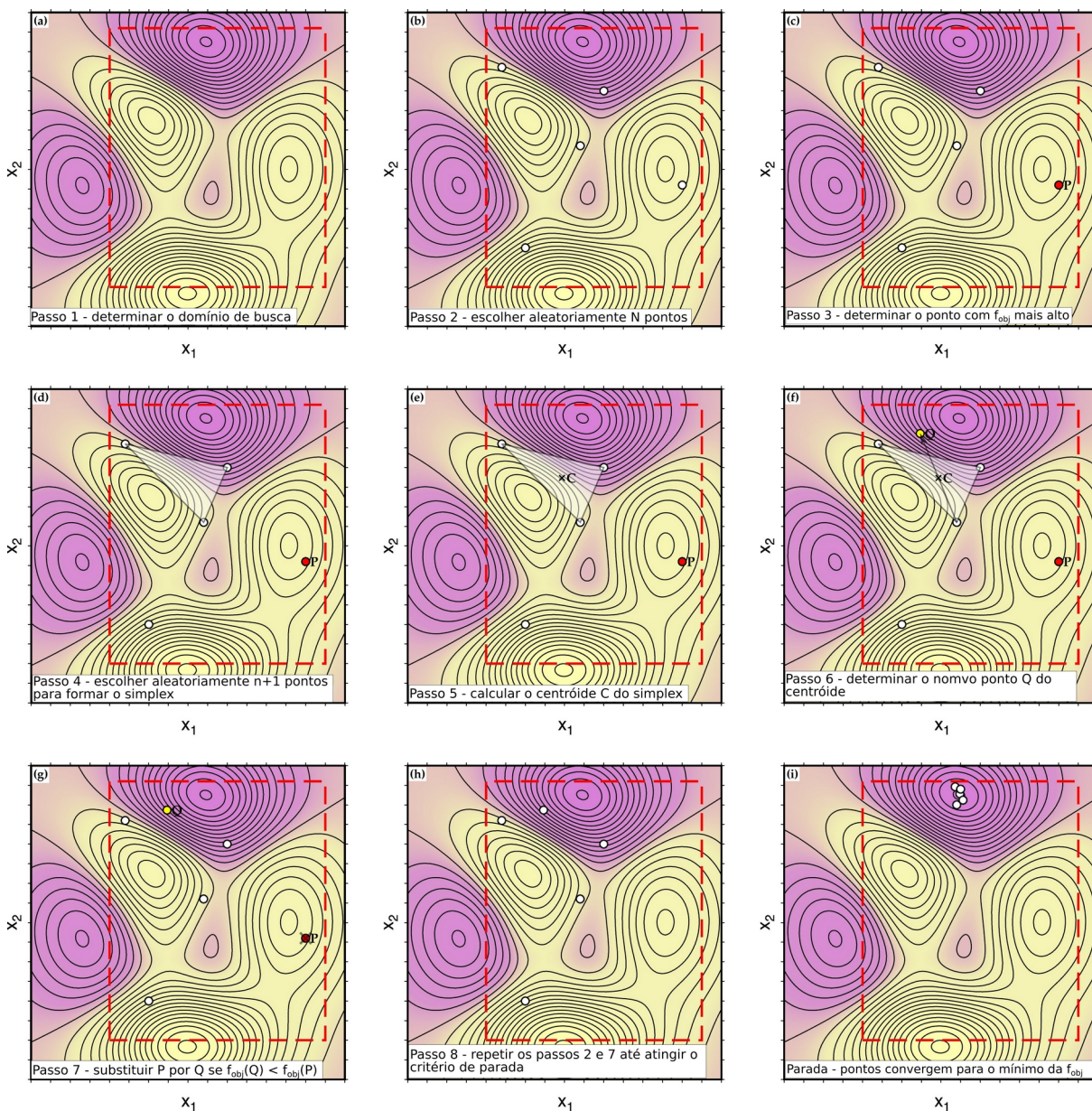
4.7 Algoritmo de Inversão CRS

O algoritmo de inversão *Controlled Random Search* (CRS) de Price 1977 consiste numa ferramenta efetiva de busca por mínimos globais de funções multimodais. Os principais aspectos do algoritmo são apresentados na Figura 7. O algoritmo consiste inicialmente na definição dos limites de busca de um domínio V para cada uma das n variáveis do modelo e dos N pontos aleatórios de busca no domínio V . Em seguida, é calculado o valor da função objetivo para cada ponto aleatório e armazenado num vetor A e determinado o ponto P com maior valor da função objetivo $f_{obj}(P)$. A cada iteração do algoritmo são escolhidos $n+1$ pontos aleatoriamente para a construção de um *simplex*, onde um novo ponto Q será determinado através do rebatimento de ponto $n+1$ (H) em relação ao centróide (C) do *simplex*, conforme a seguinte equação (Price, 1977):

$$Q = 2C - H \quad (4)$$

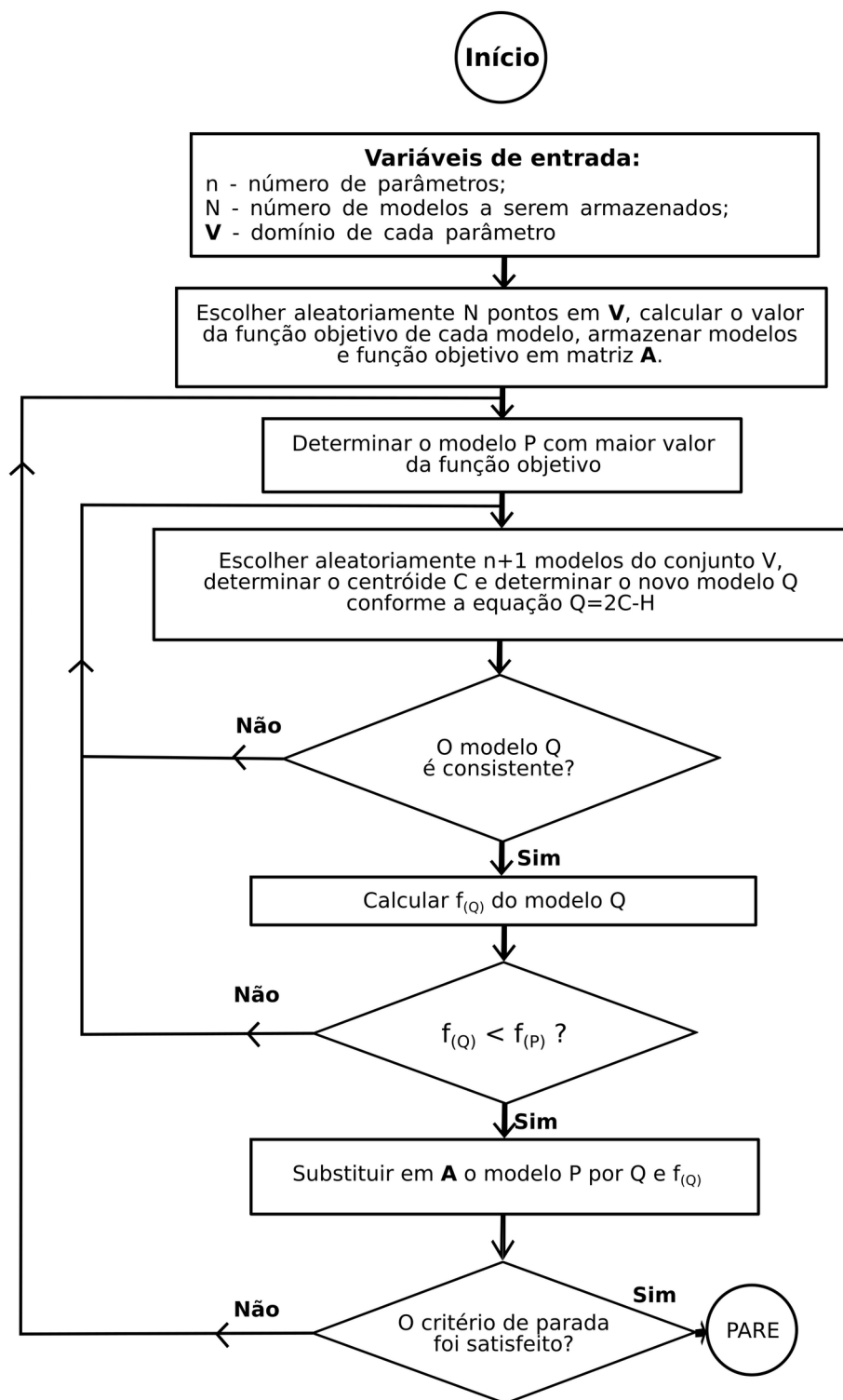
Após, é verificado se o novo ponto Q está inserido no domínio V e então é calculada sua função objetivo $f_{obj}(Q)$. Se $f_{obj}(Q)$ for menor que $f_{obj}(P)$, P é substituído por Q em A . Se $f_{obj}(Q)$ for maior que $f_{obj}(P)$, o ponto Q é descartado e realizada uma nova iteração do algoritmo. São realizadas as iterações até que seja satisfeito o critério de parada, conforme fluxograma da figura 8 (Price, 1977).

Figura 7 - Diagrama esquemático do algoritmo CRS ilustrando o procedimento de busca para uma função objetivo bidimensional arbitrária, $f_{obj}(x_1, x_2)$, onde x_1 e x_2 são parâmetros do modelo ($n = 2$). Neste exemplo utilizamos um conjunto de 5 pontos ($N = 5$ modelos) delimitados pelo domínio de busca V (retângulo vermelho tracejado).



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 8 - Fluxograma do algoritmo de inversão CRS de (Price 1977).



Fonte: adaptado de Price (1977).

5 MODELO SÍSMICO CONCEITUAL

Com base no contexto geológico local da mina de Candiota e nos valores de referência para a velocidade da onda P das camadas de carvão (Kokowski; Szreder; Pilecka, 2019) foi construído um modelo sísmico sintético de 3 camadas. A velocidade da onda S foi definida a partir de valores típicos da razão de *Poisson* (Gercek, 2007).

O modelo consiste numa camada sedimentar de 20 m de espessura sobreposta a uma camada de 2 m de carvão, representando a camada do Candiota Superior, ambas sobrepostas a outra camada sedimentar. Inicialmente é proposto um modelo mais simples sem incorporar as camadas de estéril 4 e Candiota Inferior uma vez que a camada de estéril é muito fina e as três camadas (Candiota Superior, estéril 4, Candiota Inferior) seriam interpretadas como uma única camadas de carvão mais espessa. Dessa forma podemos avaliar a capacidade de recuperação de uma camada mais fina.

A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros e intervalos do modelo sintético investigado. A geometria do modelo é relativamente simples, rocha-carvão-rocha, de forma a permitir uma análise imparcial da relação entre os parâmetros sísmicos. As faixas de parâmetros foram definidas com base nas velocidades mínima e máxima da razão de *Poisson* admissível e também para produzir uma ampla variedade de tipos de modelos para os testes realizados.

Tabela 2 - Parâmetros físicos do modelo sísmico sintético de 3 camadas com faixas de variação descritas entre colchetes.

Camada	Espessura <i>h</i> (m)	V_P (m/s)	V_S (m/s)	Densidade (kg/m ³)	Razão de <i>Poisson</i>
1	20	1400	770	2100	0,28
2	[10 - 30]	[1200 – 1600]	[570 – 970]	[1900 – 2300]	[0,15 - 0,35]
	2	1200	600	1700	0,32
3	[1 - 3]	[1000 – 1400]	[400 – 800]	[1500 – 1700]	[0,10 - 0,44]
	-	1400	770	2100	0,28
		[1200 – 1600]	[570 – 970]	[1900 – 2300]	[0,15 - 0,35]

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

6 RESULTADOS

6.1 Análise das Curvas de Dispersão

Testes de resolução e sensibilidade foram realizados avaliando o efeito de cada parâmetro do modelo nas curvas de dispersão do modo fundamental da onda *Rayleigh*. A partir do modelo sintético (Tabela 2), os parâmetros de cada camada do modelo (V_p , V_s , ρ e h) foram alterados individualmente para análise da influência dos mesmos nas curvas de dispersão (Figura 9). A ferramenta **gpdc** do *software Geopsy* foi usada para o cálculo da curva de dispersão para um intervalo de frequência de 1 a 150 Hz.

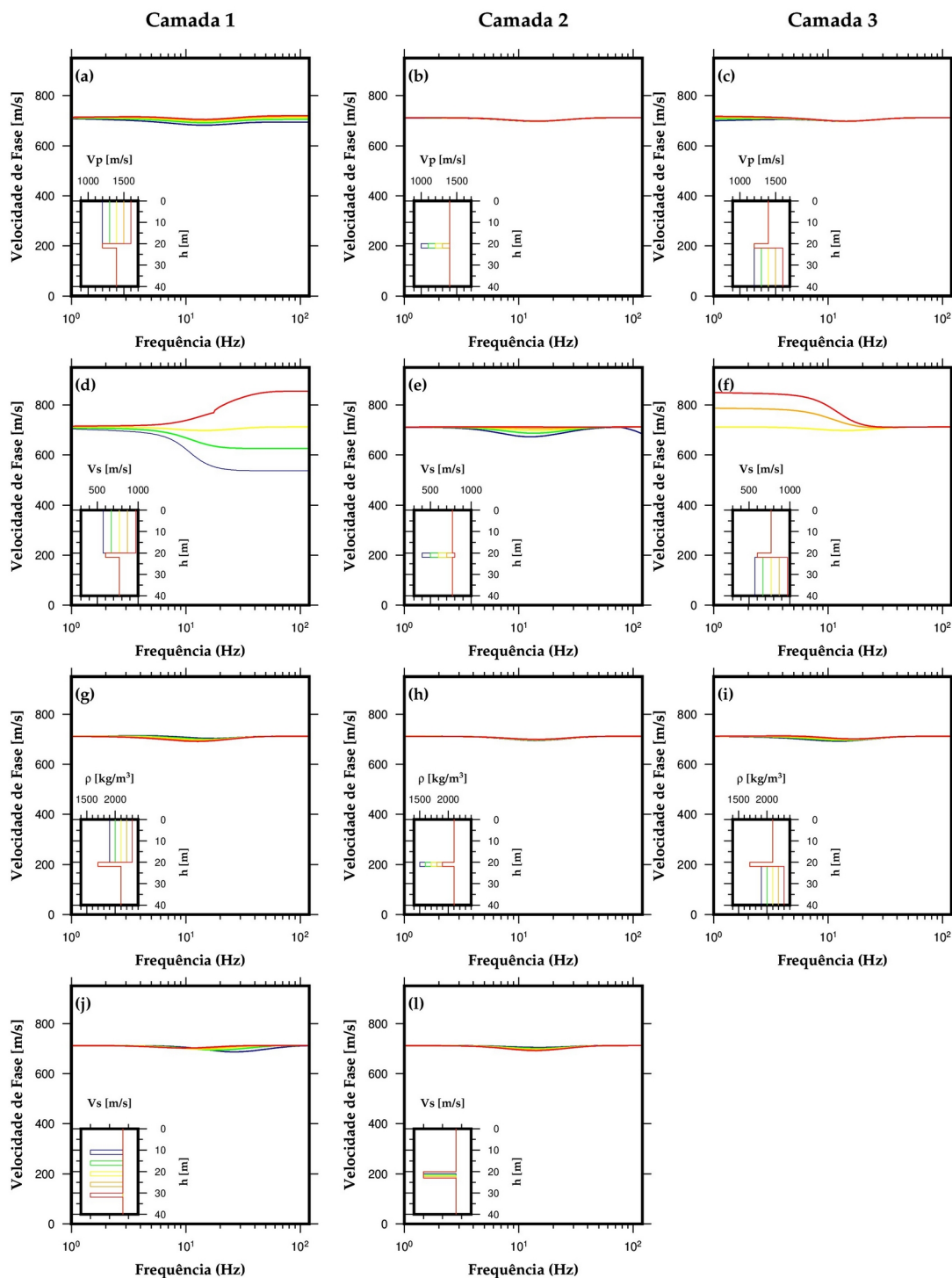
Na Figura 9a-c foram analisados inicialmente o caso da influência de V_p com os demais parâmetros fixados no valor original. Variando V_{p1} e V_{p3} entre 1200 e 1600 m/s e V_{p2} entre 1000 e 1400 m/s, percebe-se que V_{p1} causa apenas pequenas variações nas frequências mais altas das curvas, enquanto V_{p3} gera pequenas variações nas frequências mais baixas. Assim, variações no perfil V_p têm influência desprezível nas curvas de dispersão, ou seja, o contraste das camadas em termos de V_p não afeta diretamente a dispersão das ondas superficiais.

Na Figura 9d-f, apenas as variações de V_s são representadas enquanto V_p , densidade e espessuras são mantidas constantes. V_{s1} e V_{s3} está variando de 570 a 970 m/s e V_{s2} variando entre 400 a 800 m/s. É verificado que as curvas em baixa frequência não são influenciadas por V_s da primeira camada, causando mudanças nas curvas em alta frequência. Pelo contrário, os efeitos do V_{s3} desaparecem nas frequências mais altas. A influência de V_{s2} é verificada principalmente nas frequências intermediárias.

A influência das densidades (ρ) é testada na figura 9g-i onde é possível verificar que este parâmetro não afeta consideravelmente a curva de dispersão.

Figura 9 - Análise de sensibilidade das curvas de dispersão de *Rayleigh* contra parâmetros de camada: modo fundamental das curvas de dispersão das ondas de *Rayleigh* em termos de velocidade de fase (eixo de ordenadas) por frequência (eixo de abcissas) para um modelo sísmico de 3 camadas variando individualmente V_p ,

V_s , densidade e espessura de cada camada do modelo (perfis inseridos no canto esquerdo inferior). Os modelos e suas respectivas curvas de dispersão são representados por cores distintas. O índice sobrescrito representa o número da camada.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Por fim, foi investigada a influência da espessura das camadas 1 e 2. No primeiro caso, variações de h_1 alteram a profundidade da segunda camada. Conseqüentemente, os efeitos em altas frequências tendem a aumentar nas curvas à medida que o topo da segunda camada se torna mais raso. A influência de h_2 é restrita a frequências intermediárias. Aumentar a espessura da camada causa um aumento no efeito produzido na curva de dispersão, porém a magnitude dessas mudanças é claramente sutil. Portanto, a resolução deste parâmetro depende da qualidade dos dados experimentais.

De forma geral foi verificado que os parâmetros relacionados a primeira camada geram variações no conteúdo de alta frequência do dado sísmico, enquanto camadas mais profundas atuam sobre as frequências mais baixas. Isso ocorre dado que a Terra atua como um filtro passa-baixa, onde existe uma tendência a atenuação das altas frequências com o aumento da profundidade.

6.2 ANÁLISE DA FUNÇÃO OBJETIVO

A análise da função objetivo é essencial para a compreensão da natureza do problema inverso, especialmente das funções não-lineares. Em nosso caso, como o número de parâmetros do modelo é 11 (V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} , V_{s1} , V_{s2} , V_{s3} , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , h_1 e h_2) a visualização multidimensional do espaço de parâmetros seria fisicamente inviável. Portanto, para realizar um estudo do comportamento da função objetivo, foram gerados hiperplanos (seções transversais do espaço de parâmetros) combinando todos os pares possíveis de parâmetros do modelo, variando os valores de dois parâmetros e definindo para os outros parâmetros os valores corretos. Assim, foram geradas 55 seções correspondentes a cada uma das possíveis combinações de pares dos 11 parâmetros do modelo (Figuras 10, 11 e 12). Os intervalos utilizados nos hiperplanos da função objetivo são os mesmos utilizados na análise das curvas de dispersão da Figura 9.

Esta representação gráfica permite estabelecer a correlação entre pares de parâmetros do modelo sísmico e inferir o grau de ambigüidade e grau de incerteza dos parâmetros do modelo obtido.

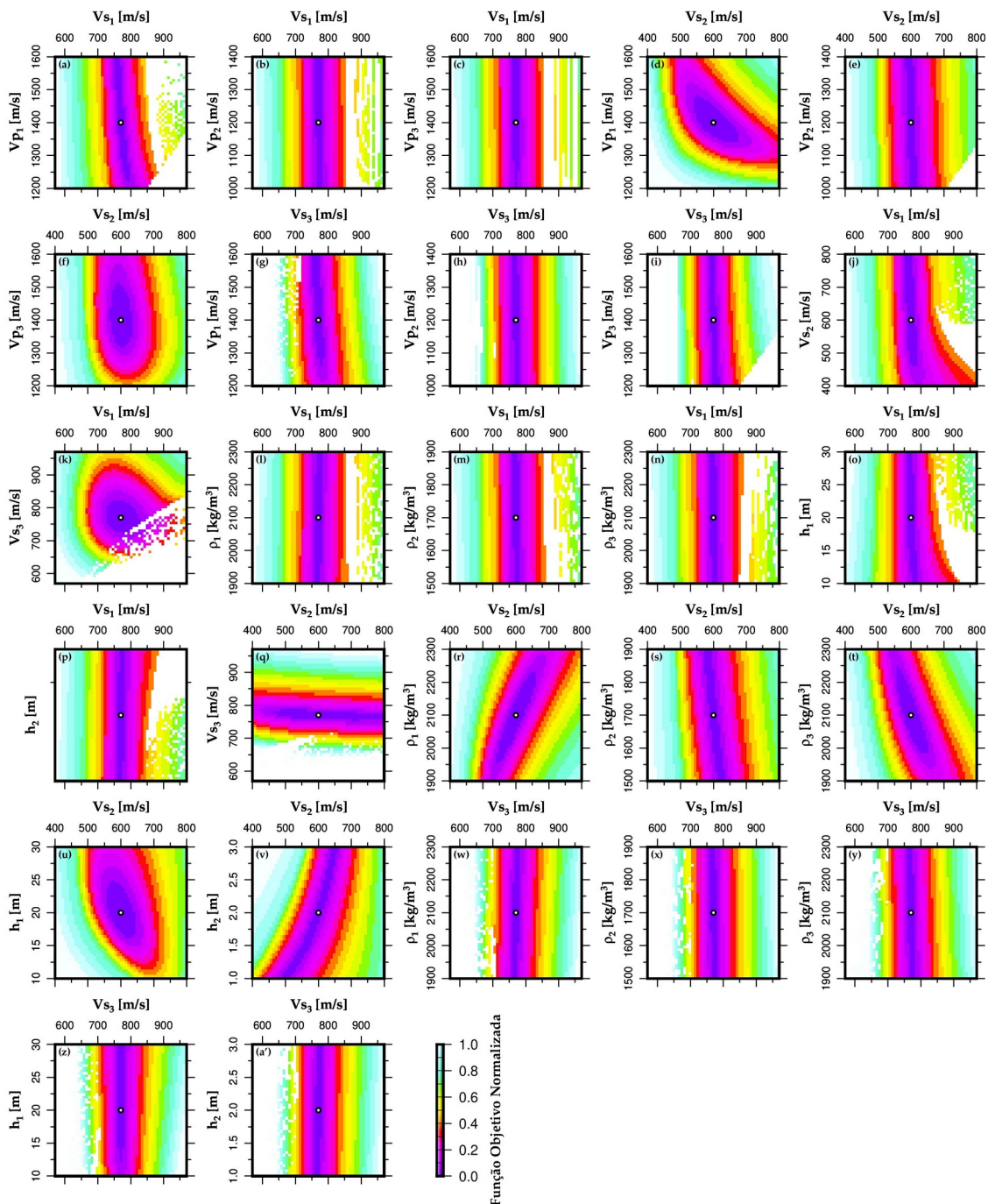
Por analogia, podemos interpretar as seções transversais da função objetivo como mapas topográficos, onde o relevo retrata a complexidade teórica prevista do

problema inverso e os valores de elevação mais baixos indicam possíveis soluções (mínimos locais e globais).

Desta forma, a partir da avaliação visual das seções apresentadas nas Figuras 10, 11 e 12, observa-se que:

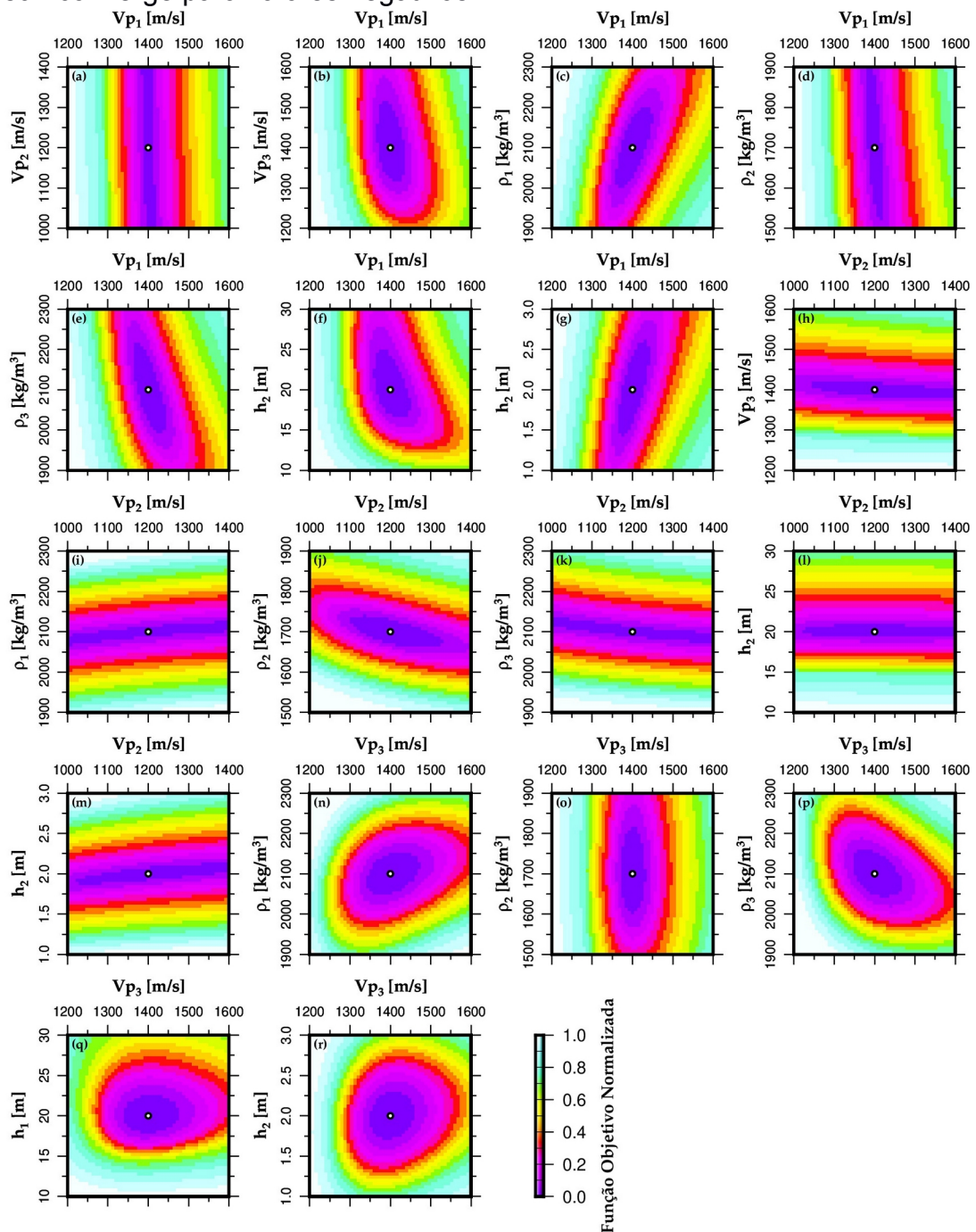
- a) A ausência de mínimos locais isolados nas faixas investigadas;
- b) A presença de um padrão típico em forma de vale nas seções de V_s (Figura 10a, b, c, e, g, h, i, l, m, n, p, w, x, y, z, a'). Este caráter indica que o parâmetro ortogonal ao eixo do vale, por exemplo V_{s1} na Figura 10c, apresenta uma solução única e bem definida para o parâmetro. Por outro lado, não é possível determinar o valor real do parâmetro paralelo ao vale, pois quaisquer pontos ao longo do eixo resultam em valores de função objetivo iguais;
- c) Em geral, os hiperplanos na Figura 10 mostram que V_s é o parâmetro melhor resolvido, particularmente V_{s1} e V_{s3} . V_{s2} tende a ser resolvido, porém a convergência é altamente dependente das espessuras das camadas h_1 e h_2 (Figura 10u-v);
- d) V_{p1} quando associado a densidades, espessuras ou V_{p2} e V_{p3} , apresenta comportamento semelhante ao de V_s . V_{p2} é o parâmetro de maior incerteza (Figura 11h-m), ou seja, a variação dos valores de V_{p2} em relação aos demais parâmetros produz pequenas variações na função objetivo. V_{p3} não apresenta correlação significativa com os demais parâmetros (padrão circular levemente elíptico) (Figura 11n-r);
- e) Aparentemente, a função objetivo depende fracamente dos valores das densidades (Figura 9l, m, n, r, s, t, w, x, y), apresentando maior nível de confiança apenas em relação a V_{p2} (Figura 11i-k);
- f) Apesar da alta incerteza na estimativa das espessuras, h_1 e h_2 influenciam diretamente na determinação de outros parâmetros, principalmente em V_{s2} (Figura 10u-v). Além disso, pode-se observar uma correlação positiva entre h_2 e ρ_3 e uma correlação negativa entre ρ_1 e h_2 (Figura 12i e 12d, respectivamente).

Figura 10 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - a') Mapas da função objetivo (semelhantes a “cartas topográficas”) resultantes da combinação dos V_s das 3 camadas com todos os parâmetros do modelo. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.



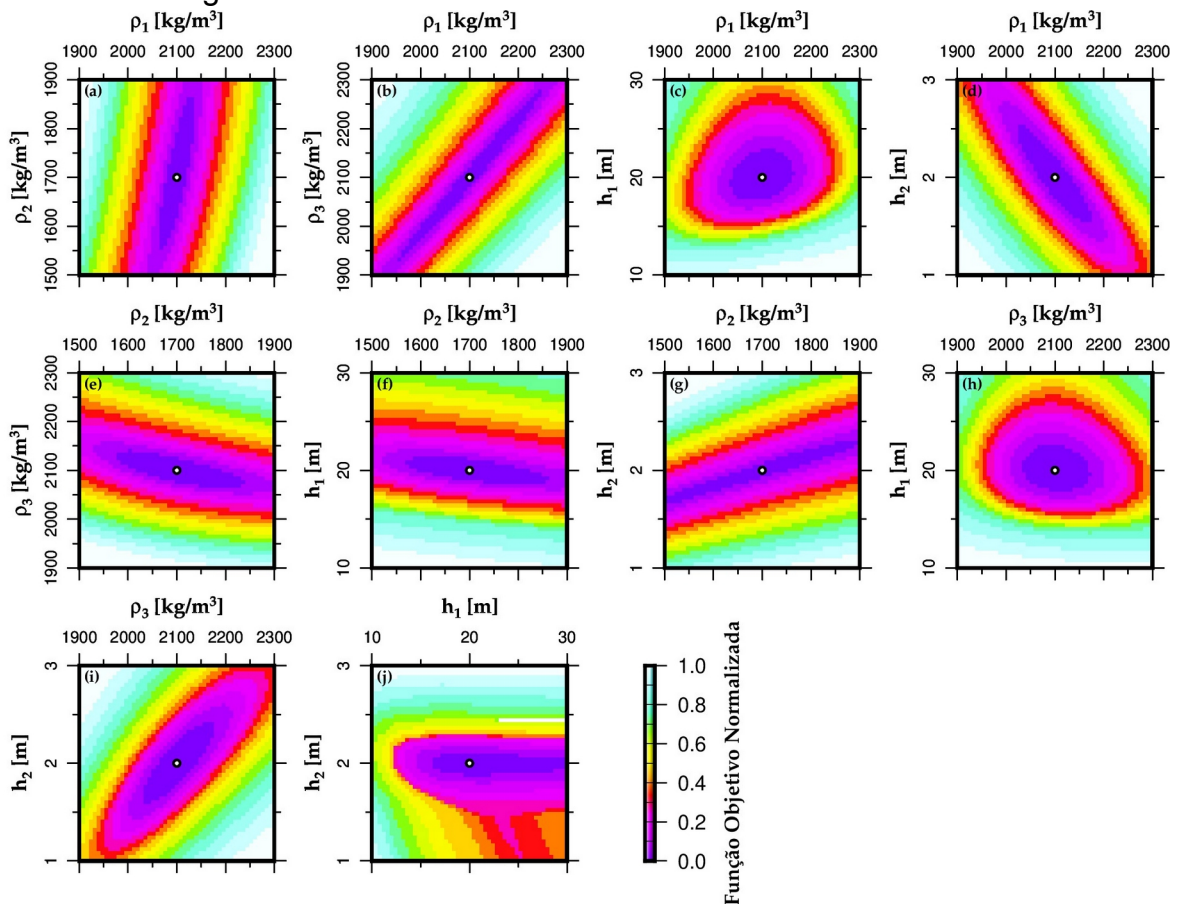
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 11 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - r) Mapas da função objetivo (semelhantes a mapas topográficos) resultantes da combinação do V_p das 3 camadas com as densidades e espessuras do modelo. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 12 - Seções transversais bidimensionais (hiperplanos) do espaço de parâmetros multidimensionais que representam a superfície da função objetivo para um determinado par de parâmetros, enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos: a - j) Mapas da função objetivo (semelhantes a mapas topográficos) resultantes da combinação das densidades e espessuras dos modelos. Os valores reais dos parâmetros são centralizados nos gráficos e indicados por círculos brancos. As áreas dos gráficos que não apresentam valores da função objetivo (área em branco) devem-se à falta de contraste das propriedades físicas para aquela combinação de parâmetros ou quando a razão de *Poisson* converge para valores negativos.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

6.3 ALGORITMO DE INVERSÃO

O algoritmo de inversão CRS foi implementado a partir de um conjunto de *scripts* escritos em *Python* (versão 3), a fim de verificar a capacidade do algoritmo em recuperar o modelo de velocidade representativo do depósito de carvão de Candiota definido pela curva de dispersão.

A ferramenta **gpdc** foi importada como um módulo do sistema no algoritmo para o cálculo iterativo das curvas de dispersão para cada modelo gerado. Para executar o algoritmo, um número de camadas de modelo e um domínio de busca foram inicialmente estabelecidos para cada um dos n (=11) parâmetros. Uma população inicial de N (=110) modelos aleatórios foi criada, e a função objetivo calculada para cada um dos modelos e o modelo com o maior valor da função objetivo definido. Em cada iteração $n+1$ modelos foram escolhidos aleatoriamente para a montagem de um *simplex* e a partir disso, um novo modelo foi gerado com o rebatimento do *simplex* em relação ao ponto $n+1$ e o centróide. Se a função objetivo do novo modelo obtido for menor que o maior valor da população inicial, o modelo é substituído.

O domínio de busca foi limitado aos mesmos intervalos usados nos testes de sensibilidade das curvas de dispersão e nos mapas de função objetivo. O critério de parada do algoritmo foi o valor mínimo de 0,01% da função objetivo ou o número máximo de 10.000 iterações. Este valor máximo de iterações foi definido após diversos testes ao longo do desenvolvimento do algoritmo para não rodar eternamente no caso de não convergência. De forma geral os parâmetros do modelo tendem a se ajustar ao valor correto antes de atingir as 10.000 iterações.

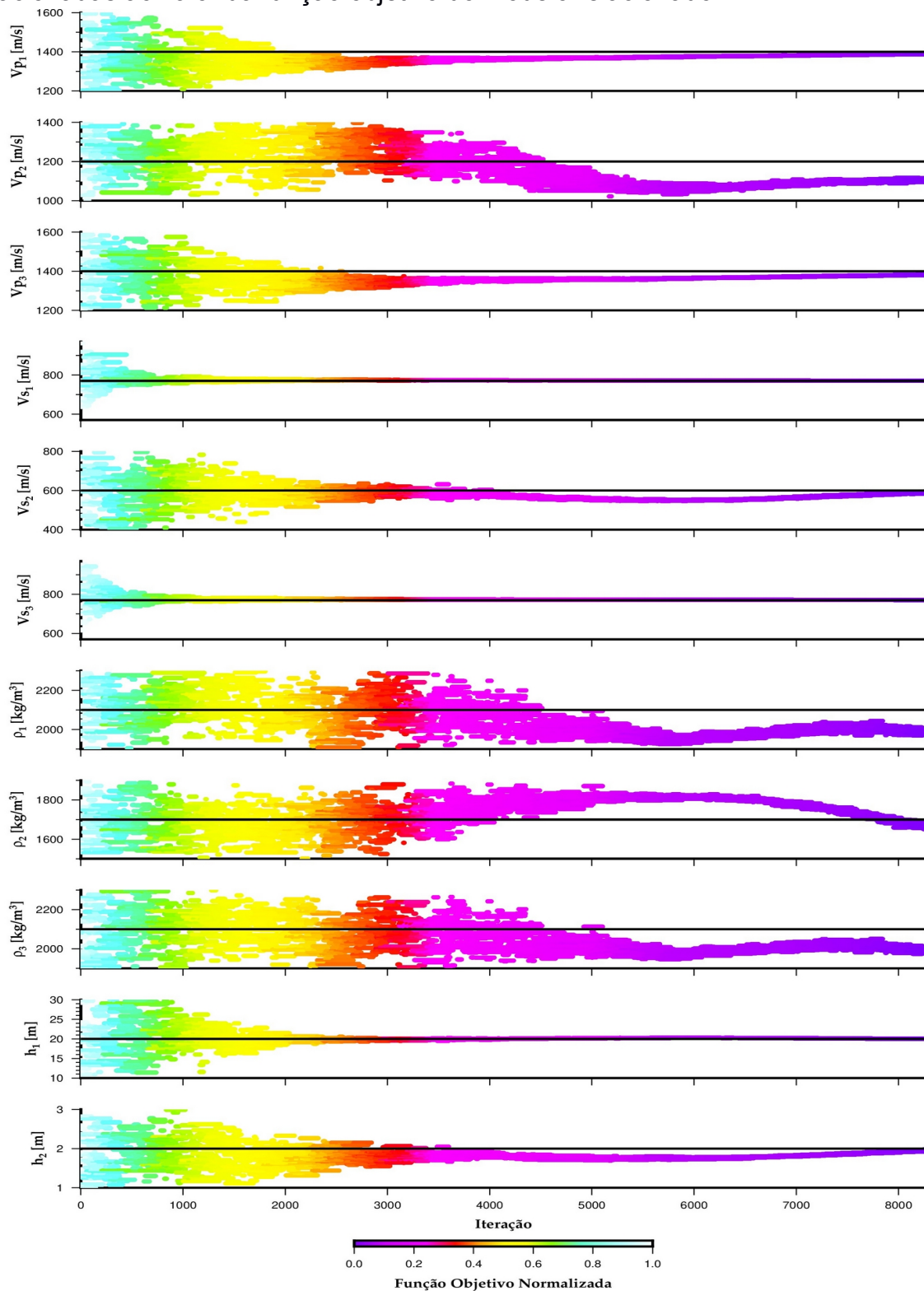
A Figura 13 mostra gráficos de dispersão dos parâmetros sísmicos da população de modelos obtidos em cada iteração durante a execução do algoritmo de inversão. Esses gráficos registram a trajetória da população do modelo em torno do modelo verdadeiro para cada iteração. Desta forma, podemos avaliar o processo de convergência do algoritmo de inversão em termos de precisão (se os parâmetros convergem para os valores corretos), eficiência (velocidade de convergência) e incerteza das estimativas de cada um dos parâmetros (desvio padrão da distribuição de valores da população final de modelos).

O algoritmo atingiu o critério de parada com 8268 iterações. V_{s1} e V_{s3} foram os parâmetros de convergência mais rápidos (cerca de 1000 iterações) seguidos por

h_1 (3000 iterações), e melhor determinados a partir do modelo, conforme estabelecido anteriormente pela análise da função objetivo. V_{s2} e h_2 tendem a convergir após 4000 iterações com a população de modelos oscilando em torno do valor real, indicando a presença de incerteza na estimação dos parâmetros, porém ao final convergem para próximo do valor real. As densidades e V_{p2} são os parâmetros do modelo que mais oscilam, assim são os mais difíceis de ajustar. V_{p1} e V_{p3} convergem lentamente para os valores corretos devido à baixa sensibilidade desses parâmetros nas curvas de dispersão.

De forma geral os parâmetros correspondentes à camada 2 são mais difíceis de ajustar quando comparados às outras camadas.

Figura 13 - Gráficos de dispersão dos parâmetros V_p, V_s , densidade e espessura de cada camada da população de modelos (eixo vertical) em função do número de iterações do algoritmo de inversão (eixo horizontal). A linha preta sólida é a linha de referência no valor verdadeiro do parâmetro. As cores dos pontos estão relacionadas ao valor da função objetivo do modelo relacionado.

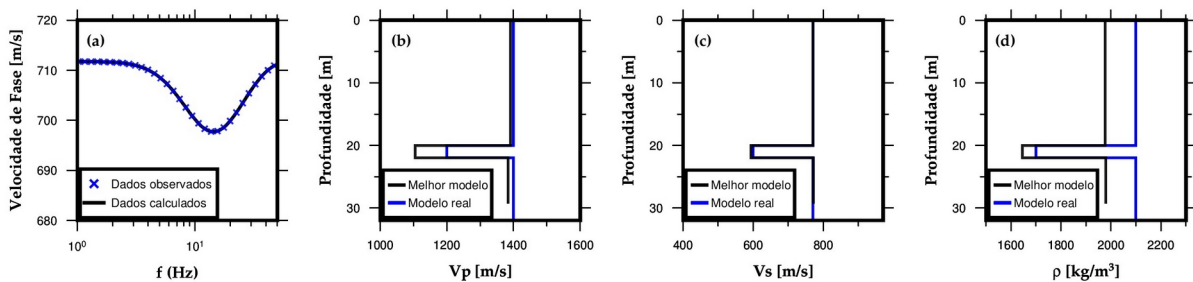


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A Figura 14 mostra o ajuste entre as curvas de dispersão correspondentes ao modelo sintético de referência e o melhor modelo (menor valor de desajuste) obtido após 8268 iterações do algoritmo de inversão. Os parâmetros do modelo sintético, parâmetros do melhor modelo obtido pela inversão e o erro percentual de cada parâmetro obtido em relação ao valor real são apresentados na Tabela (3).

Nota-se que o algoritmo obteve um ajuste satisfatório da curva de dispersão com um modelo estruturalmente bem determinado em termos de V_s e espessura das camadas, com erro inferior a 1,1% nestes parâmetros para quaisquer camadas do modelo. O algoritmo se mostrou capaz de identificar também o contraste de velocidade da onda P e densidade da camada 2 com as adjacentes, porém com valores de V_{p2} e densidades assumindo erros maiores (até 9,33%) em relação aos parâmetros do modelo original como esperado a partir das análises de sensibilidade realizadas anteriormente. V_{p1} e V_{p3} também foram bem recuperados pelo algoritmo. De forma geral verifica-se que os parâmetros na análise da curva de dispersão que se mostraram ter menos influência na curva foram os mais difíceis de ajustar com a inversão de dados e conseqüentemente os maiores erros do modelo obtido.

Figura 14 - (a) Ajuste das curvas de dispersão correspondentes ao modelo sintético de referência (cruzes azuis) e ao melhor modelo (linha preta). (b) V_p , (c) V_s e (d) perfis de densidade resultantes do melhor modelo (linhas pretas) em relação aos perfis do modelo sintético alvo (linha azul).



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 3 - Comparação dos valores dos parâmetros do modelo sintético e do melhor modelo obtido a partir do algoritmo CRS implementado.

Parâmetro	Valor verdadeiro	Melhor modelo	Erro (%)
V_{p1}	1400	1390,69 m/s	0,66
V_{p2}	1200	1104,82 m/s	9,33
V_{p3}	1400	1383,45 m/s	1,18
V_{s1}	770	770,62 m/s	0,08
V_{s2}	600	593,55 m/s	1,08
V_{s3}	770	771,14 m/s	0,15
ρ_1	2100	1976,64 kg/m ³	5,87
ρ_2	1700	1645,91 kg/m ³	3,18
ρ_3	2100	1979,91 kg/m ³	5,72
h_1	20	19,99 m	0,05
h_2	2	1,98	1

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

7 CONCLUSÃO

Estudos de aplicabilidade dos métodos geofísicos constituem o referencial teórico que conhecemos hoje. A partir destes estudos é possível saber quando se torna viável ou não a aplicação de um método em determinado contexto geológico, bem como fornecer informações a respeito da capacidade e limitações de cada técnica.

A integração de dados do furo de sondagem e valores de referência dos parâmetros físicos de cada litologia possibilitou a construção de um modelo sintético representativo da ocorrência mineral local. A partir do modelo sintético foi possível calcular a curva de dispersão no modo fundamental que foi utilizada como dado de entrada no algoritmo de inversão implementado.

Os testes de sensibilidade dos parâmetros do modelo sísmico indicaram que as variações nos valores de V_p e densidade das três camadas do modelo não produzem mudanças significativas nas curvas de dispersão obtidas. O parâmetro V_s foi o principal responsável pelas alterações nas curvas de dispersão. Portanto, o estudo demonstrou que a estruturação de camadas modelo obtido a partir de dados das curvas de dispersão das ondas superficiais é melhor resolvida em termos de velocidade da onda S, bem como, as espessuras das camadas.

A análise dos mapas de função objetivo subsidiou os testes de sensibilidade a partir da visualização da não unicidade de soluções do problema inverso, resolução e relação entre cada parâmetro envolvido no processo de inversão.

O algoritmo de inversão CRS implementado se mostrou capaz de recuperar com precisão um modelo de três camadas representado por inversão de velocidade sísmica e camada delgada, que no contexto geológico local pode estar associada à presença de uma camada de carvão.

Em suma, o estudo demonstrou que o método MASW tem grande potencial na exploração de recursos minerais associados aos sistemas carboníferos presentes no sul do Brasil. Trabalhos futuros devem avançar na aplicação do algoritmo de inversão com dados sísmicos reais adquiridos na região de estudo e correlação com as informações geológicas dos furos de sondagem.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília, 2008.

BABUSKA, V.; CARA, M. **Seismic anisotropy in the Earth**. [s.l.]: Springer Science, 1991.

BUCHANAN, D. J.; DAVIS, R.; JACKSON, P. J.; TAYLOR, P. M. Fault location by channel wave seismology in United Kingdom coal seams. **Geophysics**, v. 46, n. 7, p. 994-1002, 1981.

CAI, W.; DOU, L.; CAO, A.; GONG, S.; LI, Z. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China. **Journal of applied Geophysics**, v. 109, p. 140-149, 2014.

CHRISTOFFEL, D. A.; KAYAL, J. R. Coal quality from geophysical logs: Southland lignite region, New Zealand. **The Log Analyst**, v. 30, n. 05, 1989.

COLTON, D.; KIRSCH, A. A simple method for solving inverse scattering problems in the resonance region. **Inverse problems**, v. 12, n. 4, p. 383, 1996.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Dados do furo de sondagem MVI-39**. Dados fornecidos via correio eletrônico, 2017.

CONSULTATIVE GROUP FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH. Digital Elevation Database. versão 4.1. **Modelo Digital de Elevação**. 2004. Disponível em: <<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

DAEMEN, J. J. K. **Coal industry, history of**. **Encyclopedia of energy**. Amsterdam: Elsevier, 2004.

DOBRIN, M. Dispersion in seismic surface waves. **Geophysics**, v. 16, p. 63-80, 1951.

DRESEN, L.; RUTER, H. **Seismic Coal Exploration Part B: In-Seam Seismics**. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1994.

ENGL, H. W.; HANKE, M.; NEUBAUER, A. **Regularization of inverse problems**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1996.

FAUST, L. Y. Seismic velocity as a function of depth and geologic time. **Geophysics**, v. 16, n. 2, p. 192-206, 1951

GADALLAH, M. R.; FISHER, R. L. **Applied Seismology: A Comprehensive Guide to Seismic Theory and Application**. Oklahoma: Pen Well, 2005.

GAJEWSKI, D.; RABEL, W. **Seismic Exploration of the Deep Continental Crust: Methods and Concepts of DEKORP and Accompanying Projects**. Basel: Birkhäuser Basel, 1999.

GARLAND, G. D. **Introduction to geophysics: Mantle, Core and Crust**. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 2nd edition. 1979.

GERCEK, H. Poisson's ratio values for rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 44, n. 1, p. 1-13, 2007.

GOCHIOCO, L. M. Seismic surveys for coal exploration and mine planning. **The Leading Edge**, v. 9, n. 4, p. 25-28, 1990.

_____. High-resolution 3-D seismic survey over a coal mine reserve area in the U.S.- A case study. **Geophysics**. v. 65, n. 3, p. 712-718, may. 2000.

GOCHIOCO, L. M.; COTTEN, S. A. Locating faults in underground coal mines using high-resolution seismic reflection techniques. **Geophysics**. v. 54, n. 12, p. 1521-1527, 1989.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE, L. F. D.; SÜFFERT, T. Carvão Fóssil. **Estudos Avançados**, vol. 12. n. 33, 1998.

GREENHALGH, S. A.; SUPRAJITNO, M.; KING, D. W. Shallow seismic reflection investigations of coal in the Sydney Basin. **Geophysics**, v. 51, n. 7, p. 1426-1437, 1986.

GROETSCH, C.W. **Inverse Problems – Activities for Undergraduates**. USA: The Mathematical Association of America, 1999.

HOLZ, M.; VIEIRA, P. E.; KALKREUTH, W. The early Permian coal-bearing succession of the Paraná Basin insouthernmost Brazil: depositional model and sequence stratigraphy. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 30, n. 3, p 424-426, 2000.

HOLZ, M.; KALKREUTH, W. Sequence stratigraphy and coal petrology applied to the Early Permian coal-bearing Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. **AAPG Studies in Geology**, vol. 51, p. 147-167, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão política do Brasil. **Base de dados georreferenciada**. 2006. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 28 mar. 2020.

JINGBIN, C.; ZHONGHONG, W.; PING, C.; QUANHU, L.; CHEN, X. The application of seismic attribute analysis technique in coal field exploration. **Interpretation**, v. 4, n. 1, 2016.

KOKOWSKI, J., SZREDER, Z., PILEKA, E. Reference P-wave velocity in coal seams at great depths in Jastrzebie coal mine. **E3S Web of Conferences**, Vol. 133, p. 01011, 2019.

KREY, T. C. Channel waves as a tool of applied Geophysics in coal Mining. **Geophysics**, v. 28, n. 5, p 701-714 1963.

MACHADO, E. R.; CASTANHO, O. S. Pesquisa de carvão mineral na faixa sedimentar do Rio Grande do Sul. **Publicação do Departamento Autônomo de Carvão Mineral**, v. 42, 1956.

MASON, I. M.; BUCHANAN, D. J.; BOOER, A. K. Channel wave mapping of coal seams in the United Kingdom. **Geophysics**, v. 45, n. 7, p. 1131-1143, 1980.

MILLER, B. G. **Coal Energy Sistens**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005.

MORCOTE, A.; MAVKO, G.; PRASAD, M. Dynamic elastic properties of coal. **Geophysics**, v. 75, n. 6, 2010.

NAZARIAN, S.; STOKOE, K. H.; HUDSON, W. R. **Use of spectralanalysis of surface waves method for determination of moduli andthicknesses of pavement systems**. [s.l.:s.n.], 1983

OLAFSDOTTIR, E. A.; ERLINGSSON, S.; BESSASON, B. Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 2, p. 217-233, 2018.

OLSSON, D. M.; NELSON, L. S. The Nelder-Mead simplex procedure for function minimization. **Technometrics**, v. 17, n. 1, p. 45-51, 1975.

PALMER, D. High resolution seismic reflection surveys for coal. **Geoexploration**, v. 24, n. 4-5, p. 397-408, 1987.

PAN, Y.; XIA, J.; XU, Y.; GAO, L. Multichannel analysis of Love waves in a 3D seismic acquisition system. **Geophysics**, v. 81, n. 5, 2016.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J.. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. **SEG technical program expanded abstracts**, 1998

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. Multi-channel analysis of surface waves (MASW): **Geophysics**, v. 64, n. 3, p. 800-808, 1999

PAUL A. D. **Coal, fuel and non-fuel uses**. [s.l.]: Encyclopedia of energy 1, 2004.

POHL, W. L. **Economic geology: principles and practice**. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

PRICE, W. L. A controlled random search procedure for global optimisation. **The Computer Journal**, v. 20, n. 4, p. 367-370, 1977.

ROSSI, A. **Caracterização paleoambiental a partir dos componentes orgânicos particulados em depósitos bioturbados do bloco central da jazida carbonífera do Iruí (Cachoeira do Sul, RS)**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia – PPGeo. UNISINOS, São Leopoldo, 2008.

SENGBUSH, R. L. **Seismic Exploration Methods**. Boston: IHRDC, 1983.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Base de dados shapefile de limites geológicos do Brasil**. Disponível em <<http://geobank.cprm.gov.br>>. 2017. Acesso em 05 de Abril de 2017.

SHERIFF, R.; GELDART, L. **Exploration Seismology**. Segunda Edição. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

SILVA, M. B.; KALKREUTH, W. Petrological and geochemical characterization of Candiota coal seams, Brazil — Implication for coal facies interpretations and coal rank. **International Journal of coal geology**, v. 64, n. 3-4, p. 217-238, 2005.

SOUZA, V.; SALVADORETTI, P.; COSTA, J. F. C. L.; BERETTA, F. KOPPE, J. C.; BASTIANI, G. A.; CARVALHO JÚNIOR, J. A.; GRIGORIEFF, A. Estimativa de qualidade de carvão por meio de perfilagem geofísica de gama natural e resistividade. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 653-660, 2010.

SPEIGHT, J. G. **Handbook of coal analysis**. John Wiley & Sons, 2015.

STEVEN, M. K. **Fundamentals of statistical signal processing**. [s.l.]: PTR Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1993.

SÜFFERT, T. **Carvão nos estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 1997

THOMAS, L. **Coal geology**. Wiley: John Wiley & Sons, 2020.

TSELENTIS, G. A.; PARASKEVOPOULOS, P. Application of a high-resolution seismic investigation in a Greek coal mine. **Geophysics**, v. 67, n. 1, p. 50-59, 2002.

ZÁLAN, P. V., WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, Z. P.; ZANOTTO, O. A. A bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. **Origem e evolução de bacias brasileiras**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990.

WEBBER, T.; SALVADORETTI, P.; KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. Estimativa de parâmetros indicadores de qualidade de carvão a partir de perfilagem geofísica. **REM: R. Esc. Minas**, 2009.

WHITE, D. **Fossil flora of the Coal Measures of Brazil**. [s.l.]: Imprensa nacional, 1908.

XIA, J. Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multichannel analysis of surface-wave methods. **Journal of applied geophysics**, v.

103, p. 140-151, 2014.

YUSHENDRI, Y. F.; SUKOTJO, A.; RUGUWANTI, R.; WIDARTO, D. S.; NURHANDOKO, B. E. B. Seismic rock physics of the South Sumatra basin coal, Indonesia. **Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, Yokohama,** Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013.

ZANDT, G.; AMMON, C. J. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. **Nature**, v. 374, n. 6518, p. 152-154, 1995.