



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS SÍSMICOS PARA DELIMITAÇÃO DE
UMA DESCONTINUIDADE EXPOSTA EM UM CORTE DE ESTRADA
NA ROTATÓRIA DO COLORADO, BRASÍLIA-DF, BRASIL**

MONOGRAFIA DO TRABALHO FINAL

Discente: 160118123 / Douglas Carvalho Muniz

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha

Banca avaliadora:

Prof. Dr. Elder Yokoyama

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

BRASÍLIA
Fevereiro de 2023

DOUGLAS CARVALHO MUNIZ

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS SÍSMICOS PARA DELIMITAÇÃO DE UMA
DESCONTINUIDADE EXPOSTA EM UM CORTE DE ESTRADA NA ROTATÓRIA
DO COLORADO, BRASÍLIA-DF, BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à banca examinadora do
Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília, como requisito para obtenção do
grau de bacharel em Geofísica.

**BRASÍLIA
2023**

DOUGLAS CARVALHO MUNIZ

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS SÍSMICOS PARA DELIMITAÇÃO DE UMA
DESCONTINUIDADE EXPOSTA EM UM CORTE DE ESTRADA NA ROTATÓRIA
DO COLORADO, BRASÍLIA-DF, BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à banca examinadora do
Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília, como requisito para obtenção do
grau de bacharel em Geofísica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha (IGD/UnB)

Prof. Dr. Elder Yokoyama

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força que me foi dada, pela coragem recebida e pelo cuidado que eu recebi ao longo da vida e de todo o curso.

A minha mãe, Rosimar Carvalho da Silva, por toda a dedicação e esforço que teve para cuidar e educar a mim e meus irmãos, nos permitindo a chance de fazermos caminhos diferentes e alcançar nossos objetivos, mesmo em meio a tantas dificuldades.

Aos meus amigos mais próximos, que sempre estiveram comigo em momentos bons e ruins, em especial, a Zenaide Lopes dos Santos, uma amiga quem considero uma segunda mãe e quem sempre me incentivou a ser a minha melhor versão, persistir nos estudos, em ter uma mente curiosa e uma alma livre; a Lyara Villanova Silverio, quem me puxava de volta quando queria mudar de curso e me incentivava a manter o foco e a me dedicar naquilo que gosto.

Ao Prof.º Dr. Marcelo Peres Rocha pela paciência, amizade e por todos os ensinamentos e aprendizados adquiridos pela trajetória no curso e pelo presente trabalho.

A Phygeo – Soluções em Geofísica e Tecnologia por ter me apresentado o quão vasto é a Geofísica através de aplicações práticas, tendo um peso significativo na minha permanência do curso, por me ajudar a conhecer colegas do curso quem hoje são grandes amigos e por ter me introduzido ao Movimento Empresa Júnior, movimento esse que tenho muito amor e que aprendi e cresci bastante.

Aos professores do Instituto de Geociências por toda a aprendizagem adquirida no curso.

Aos amigos de curso, em especial a Ádlla Silva Souza, que tornaram a minha trajetória até aqui mais leve e menos pesada.

Ao meu companheiro, Lucas Eduardo França de Rezende, pelo apoio, suporte, cuidado, carinho e amor em momentos difíceis e nos passos que dei no fim dessa jornada.

A todos aqueles que amo e tenho admiração e que me impulsionaram a sempre ir mais longe.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para que esse sonho se tornasse possível.

Muito Obrigado!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo imagear uma descontinuidade exposta entre duas camadas de um talude, com localização ao lado da Rotatória do Colorado, na BR-020, em Brasília-DF, como também comparar os resultados obtidos entre os métodos aplicados na área de estudos. As metodologias de aquisição sísmica empregadas para cumprir com esse objetivo foram a Análise Multicanal de Ondas de Superfície Ativa (MASW-A) e a Sísmica de Refração. Os dados de ambos os métodos foram adquiridos ao longo de um perfil com geometria linear, paralelo a borda do talude, utilizando 48 canais com equidistância de 0,5 metros e utilizou-se, como fonte de energia ativa, uma marreta de 10 Kg. Ao todo, foi levantado um perfil sísmico com 36 metros de comprimento. Os resultados obtidos do processamento para o caso da sísmica de refração, se deram através da inversão das primeiras chegadas de ondas sísmicas geradas na superfície e que foram refratadas em subsuperfície, para o caso da sísmica de refração. Já os do MASW-A, se deram pela análise e inversão das curvas de dispersão obtidas no levantamento. Desse modo, para a refração, obteve-se um perfil 2D de velocidades de ondas compressivas (V_p) para um modelo de duas camadas, com variação entre 228 m/s e 567 m/s, o que corresponde uma camada de solo com presença de alteração e com níveis de consolidação aumentando do topo para a base. Desse perfil, pôde-se definir a interface entre camadas variando de 0,5 m a 1m de profundidade, para as partes menos espessas, e de 2 m para as mais espessas. Para o MASW-A, após inversão dos dados, obteve-se um perfil de velocidade das ondas cisalhantes (V_s) com variação entre 114 m/s e 384 m/s, onde pôde-se perceber um intervalo de solo inconsolidado e algo grau de intemperismo no topo do modelo, seguido de um intervalo de transição mais acentuado entre 1 e 3 m de profundidade. A partir desses resultados, pôde-se avaliar que o MASW-A conseguiu representar a interface entre camadas vista em campo do que a sísmica de refração, embora, esta última, também tenha apresentado resultados bem próximos dos de MASW-A.

Palavras-chave: Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW-A); Sísmica de Refração; Primeiras Chegadas; Curvas de Dispersão; Inversão de Dados; Perfis de V_p e V_s .

ABSTRACT

This work aimed to image an exposed discontinuity between two layers of an artificial slope, located next to the Rotatória do Colorado, in the BR-020, Brasília-DF, as well as to compare the results obtained between the methods applied in the study area. The seismic acquisition methodologies utilized to accomplish this objective were Multichannel Analysis of Active Surface Waves (MASW-A) and Seismic Refraction. Data from both methods were acquired along a section with linear geometry, parallel to the edge of the slope, using 48 channels with an equidistance of 0.5 meters and using a 10 kg sledgehammer as an active energy source. In the end, a seismic profile measuring 36 meters in length was surveyed. The results obtained, in the case of seismic refraction, from the processing, took place through the inversion of the first arrivals of seismic waves generated on the surface and which were refracted in the subsurface. As for the MASW-A, it was done by analyzing and inverting the dispersion curves obtained in the survey. Thus, for refraction, a 2D section of compressive wave velocities (V_p) was obtained for a model between two layers, with variation between 228 m/s and 567 m/s, which corresponds to a soil layer with the presence of alteration and with levels of consolidation is increasing from top to bottom to hard rock. From this section, it was possible to define the interface between layers ranging from 0.5 m to 1 m deep, for the less thick parts, and from 2 m for the thickest ones. For the MASW-A, after inverting the data, a section of shear wave velocity (V_s) was obtained with a variation between 114 m/s and 384 m/s, where an interval of unconsolidated soil and some degree of weathering at the top of the model, followed by a more pronounced transition interval between 1 and 3 m depth. Based on these results, it was possible to assess that the MASW-A was able to represent, in terms of depth, the interface between layers which it was seen in the field than the seismic refraction, although these one also presented results very close to those of MASW-A.

Keywords: Multichannel Surface Wave Analysis (MASW-A); Refraction Seismic; First Arrivals; Dispersion Curves; Data Inversion; V_p and V_s Sections.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. ÁREA DE ESTUDO	3
2.1. Localização da Área de Estudo	3
2.2. Características Geológicas Regionais	4
2.2.1. Características Geológicas Locais	6
2.3. Características Pedológicas	7
2.4. Caracterização geomecânica da área de estudos	8
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1. Ondas mecânicas	10
3.2. Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW)	11
3.3. Sísmica de Refração	12
4. METODOLOGIA	13
4.1. Equipamentos	13
4.2. Aquisição	14
4.3. Processamento	19
4.3.1. Análise Multicanal de Ondas de Superfície - MASW	19
4.3.2. Sísmica de Refração	24
5. RESULTADOS	27
5.1. Resultados do Ensaio Sísmico 2D - MASW	27
5.2. Análise dos Resultados do Ensaio Sísmico 2D - MASW	29
5.3. Resultados do Ensaio Sísmico 2D – Sísmica de Refração	31
5.4. Análise dos Resultados do Ensaio Sísmico 2D – MASW	32
5.5. Comparação entre os resultados obtidos do MASW e Refração	34
6. CONCLUSÕES	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudos. Em verde, está a região administrativa a qual a área de estudo pertence. Sistema de Coordenadas utilizada foi a UTM, SIRGAS 2000, Zona 23S.	3
Figura 2 - Área de estudos localizada entre o entroncamento da DF-001 e a BR-450.....	4
Figura 3 - Área de interesse geofísico e objeto de estudo desta pesquisa. A linha pontilhada e o limite amarelo são marcações visuais, respectivamente, de possíveis horizontes de solo e da posição e forma da descontinuidade.	4
Figura 4 - Mapa geológico simplificado do Distrito Federal (atualizado de Freitas-Silva & Campos, 1999).	5
Figura 5 - Coluna litoestratigráfica da Unidade S (modificado de Faria, 1995).	6
Figura 6 – Área de estudos geomecânicos apresentado por Cuartas (2018). O local de interesse deste trabalho está no Trecho 2, Área 2. A figura superior apresenta a divisão feita por Cuartas (2018) dos Trechos 1 e 2. A figura inferior, no Trecho 2, área 2, representa a área estudada no presente trabalho (Adaptado de Cuartas, 2018).	7
Figura 7 - Modelos matemáticos da refração (extraído do manual do programa Seisimager, Apêndice A).	12
Figura 8 - Sismograma da linha adquirida com tiro realizado a 1,5 metros de distância do primeiro geofone, onde as ondas representadas, respectivamente, são (1) aéreas, (2) direta e (3) refratada.	13
Figura 9 - Equipamentos e instrumentos utilizados em campo.	14
Figura 10 - Mapa de localização da linha sísmica. Sistema de Coordenadas UTM, SIRGAS 2000, Zona 23S.	15
Figura 11 - Área de investigação sísmica de campo com a linha de aquisição sísmica configurada em geometria linear registrada em 18 de agosto de 2022, com as imagens a e b) representando a área de estudos, c e d) o início e fim do perfil sísmico na borda do talude e e) espaçamento fixo entre os geofones.	16
Figura 12 - Esquema de aquisição sísmica de MASW e Sísmica de Refração utilizando uma geometria linear e com o uso de uma fonte ativa (extraído de EIKMEIER (2018), e adaptado de Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (2018)).	16
Figura 13 - Representação do início e fim da linha sísmica, totalizando 36 m de aquisição. As numerações 1, 2 e 3, representam estacas cravadas, respectivamente, na posição do primeiro e último geofone para georeferenciar a seção, a) é o início da linha, b) o fim da linha antes do	

deslocamento entre geofones e ponto central após a realocação dos geofones, c) fim da seção adquirida.	18
Figura 14 - Sismograma obtido com energizações realizadas com offset em 13 m.	19
Figura 15 - Exemplo de pré-análise do sismograma e identificação de ruídos utilizando a função Edit do Surface Wave, onde em a) é demonstrado dois traços bem ruidosos (em vermelho) e em b) o dado com os traços editados após identificação do ruído.....	20
Figura 16 - Definição das famílias CMPs após a aquisição em campo, onde a) é a geometria linear fixa utilizada, b) o resultado do empilhamento entre traços de espaçamento iguais e c) o sismograma gerado antes da construção das curvas de velocidade Vs e com os traços resultantes do empilhamento no domínio do tempo (HAYASHI e SUZUKI, 2004).	21
Figura 17 - Após o empilhamento das famílias CMPCC, os resultados obtidos são: a) o espectro de frequência gerado e b) as curvas de dispersão que serão analisadas.	22
Figura 18 - Representação das curvas de dispersão da aquisição sísmica de MASW com uso de fonte ativa.	23
Figura 19 - Sismograma multicanal para a fonte localizada na posição 1.5 metros. Em vermelho está a marcação manual feita no módulo Pickwin. A linha vermelha contínua mostra a conexão entre as marcações definindo as curvas de tempo de percurso.	24
Figura 20 - Apresentação das curvas de tempo de chegada pela distância. Resultado obtido após a picagem de dados no Pickwin onde a) são as curvas brutas e b) as curvas separadas por stack ou tiro.	25
Figura 21 - Curvas de velocidade da onda P obtidas de marcações feitas manualmente.	26
Figura 22 - Perfil de velocidades da onda S (Vs) obtidos após a inversão dos dados de campo, com alcance de penetração em profundidade próximo dos 4 metros.	28
Figura 23 - Perfil de Velocidade da onda S obtido com o uso de fonte ativa na borda do talude.	28
Figura 24 - Domínio ou zonas de velocidade da onda S, obtidos pelo método ativo de MASW.	30
Figura 25 - Modelo de duas camadas adquirida na borda do talude estudado. Os valores indicados representam a velocidade de propagação da onda P no meio em metros por segundo. Perfil com exagero vertical.	31
Figura 26 - Tomografia sísmica obtida do modelo de refração. As variações de cores demonstram o gradiente da velocidade em função da profundidade e distância.	32
Figura 27 - Comparação entre os resultados obtidos no levantamento, onde a) é a descontinuidade observada em campo, b) o perfil tomográfico e c) o perfil de Vs.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das rochas quanto ao grau de coerência (Adaptado de Lucas (2006), Guidicini e Nieble (1984)).	8
Tabela 2 – Grau de alteração das rochas classificada por ISRM (1981).	9
Tabela 3 – Classificação dos afloramentos rochosos na área de aquisição dos dados sísmicos.	10
Tabela 4 - Perfis de solo ou classificação de substratos de solo de acordo com o padrão estabelecido pela UBC Site Classifications e EC8 para velocidades superficiais que alcançam até 30m de profundidade (VS, 30) (apresentado por Kanli et al 2006; adaptado de Sêco e Pinto 2002; Dobry et al. 2000; Sabetta & Bommer 2002).	29

1. INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades físicas de materiais geológicos em subsuperfície nos permite identificar o tipo de solo de uma região, como também imagear estruturas e descontinuidades geológicas em profundidade. Entre os principais parâmetros físicos normalmente estudados, temos: densidade, resistividade elétrica, susceptibilidade magnética e velocidade de ondas.

Para auxiliar na determinação dessas propriedades físicas e por terem uma boa relação de custo-benefício (SOUZA, 2021) os levantamentos geofísicos empregam um conjunto de técnicas de aquisições indiretas de dados e utilizam a propagação de ondas dos materiais em estruturas em subsuperfície (FERNÁNDEZ, 2017).

A propagação de ondas dos materiais em subsuperfície é um campo de estudos para diversos fins, como por exemplo para a engenharia civil, onde é podem fornecer informações das características mecânicas do meio, as quais são utilizadas em construções. No estudo de Souza (1998) ele propôs a classificação desse conjunto de técnicas em métodos ativos (A) e passivos (P).

Os métodos passivos utilizam como parâmetro de aquisição de dados os campos naturais (KEAREY *et al.*, 2009) ou fontes não controladas, como os métodos gravimétricos, magnetométricos e a sísmica passiva. Já os métodos ativos, utilizam fontes artificiais e controladas (NOGUEIRA, 2014) com o objetivo de gerar perturbações ondulatórias no meio a ser investigado. Fazem parte desse grupo as aquisições eletrorresistivas e a sísmica de refração.

O *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) ou Análise Multicanal de Ondas de Superfície (AMOS), assim como a Sísmica de Refração, é um dos métodos definido como indireto e o qual se pode utilizar de uma fonte ativa, como a maretá, para sondagens geofísicas e cada vez mais presente em muitos estudos geotécnicos (STOKOE *et al.*, 1994). O crescente uso do MASW em obras de engenharia, principalmente os da construção civil, é justificado por permitir obter informações de velocidade de ondas de superfície (V_s) ou de cisalhamento (PARK *et al.*, 1999). Com o uso dos dados de V_s é possível dizer o nível de rigidez (MEIRA, 2022) ou compactação do solo no local de estudo e, quando posto em conjunto com os resultados de velocidades de ondas de corpo (V_p) obtidos pela Sísmica de Refração, torna-se possível o imageamento de topos rochosos (EIKMEIER, 2018), como também a delimitação das descontinuidades entre camadas em subsuperfície (NOGUEIRA, 2014) utilizando o gradiente de velocidades.

Além disto, possibilita a análise de outras informações mecânicas e elásticas do meio (PARK *et al.*, 2015) como o módulo de Young (E), o módulo de cisalhamento (μ ou G) e a razão de Poisson (ν), os quais, ambos os coeficientes podem ser definidos utilizando os resultados de Vs quanto de Vp (SHERIFF e GELDART, 1982).

Com base na aplicação geotécnica dos métodos de Sísmica de Refração e MASW-A, o presente trabalho propõe uma breve revisão bibliográfica sobre esses métodos bem como os resultados da aplicação deles em um corte de estrada. Com os perfis sísmicos gerados através do imageamento de uma descontinuidade exposta entre uma camada de solo e de rocha, pelas sondagens de velocidade de Vp e Vs, será verificado se os resultados obtidos coincidem com as informações topográficas obtidas em campo da descontinuidade observada assim como se são suficientes para identificar a sua profundidade e extensão.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como principal objetivo o imageamento de uma descontinuidade entre duas camadas distintas por meio da aplicação de métodos sísmicos. Dessa forma, buscou-se identificar a profundidade entre os limites dos substratos em questão, assim como a determinação do nível de rigidez e compactação do solo, a partir de velocidades Vp e Vs obtidas no local de estudo. A **Figura 3** representa a região de interesse, com uma indicação do contato entre as duas camadas.

1.1.2. Objetivos Específicos

Com vista em viabilizar o objetivo geral deste trabalho, tem-se como objetivos específicos:

- A caracterização do grau de compactação do solo em subsuperfície utilizando o método MASW-A e a Sísmica de Refração;
- Correlacionar dados sísmicos com as informações de estudos geotécnicos disponíveis em relação ao local de estudos e/ou próximas a ele;
- Imagear o limite entre o solo e o bloco de rocha expostos.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização da Área de Estudo

O local de investigação está situado na latitude $15^{\circ}41'15.80''S$ e longitude $47^{\circ}51'39.05''O$, sobre um corte de estrada (**Figuras 1 e 2**) na saída da rotatória do Colorado no sentido Sobradinho – Brasília, onde, ao norte, tem-se o viaduto que dá início a bifurcação da rodovia DF-001 em DF-150 e BR-010 e, ao sul, a bifurcação coincide com a Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA), atual DF-003, com a BR-450.

A margem direita da área de aquisição tem-se o trecho que dá acesso à rodovia EPIA no sentido Brasília e, no lado oposto, paralelo ao talude, tem-se o trecho da BR-450, sentido Sobradinho. A linha sísmica discutida no presente trabalho está posicionada na borda da margem esquerda do talude. A **Figura 3** representa a região de interesse, com uma indicação do contato entre as duas camadas.

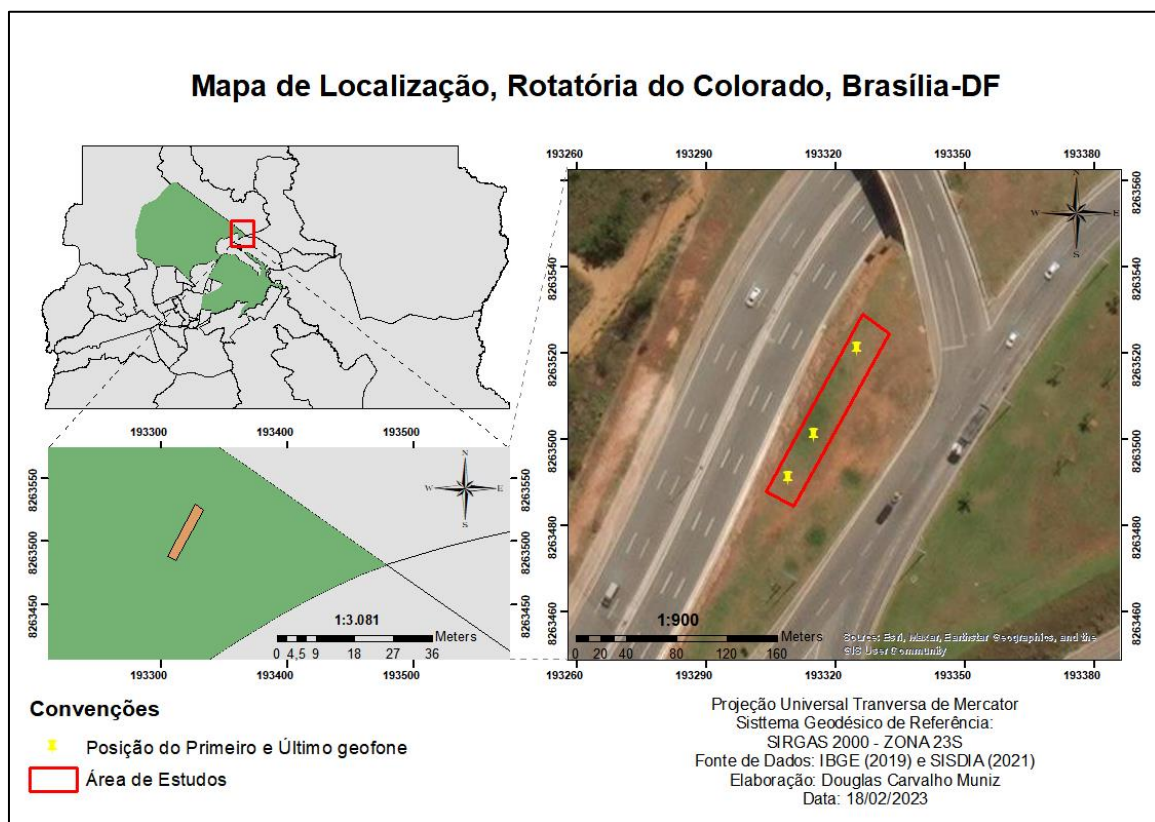


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudos. Em verde, está a região administrativa a qual a área de estudo pertence. Sistema de Coordenadas utilizada foi a UTM, SIRGAS 2000, Zona 23S.

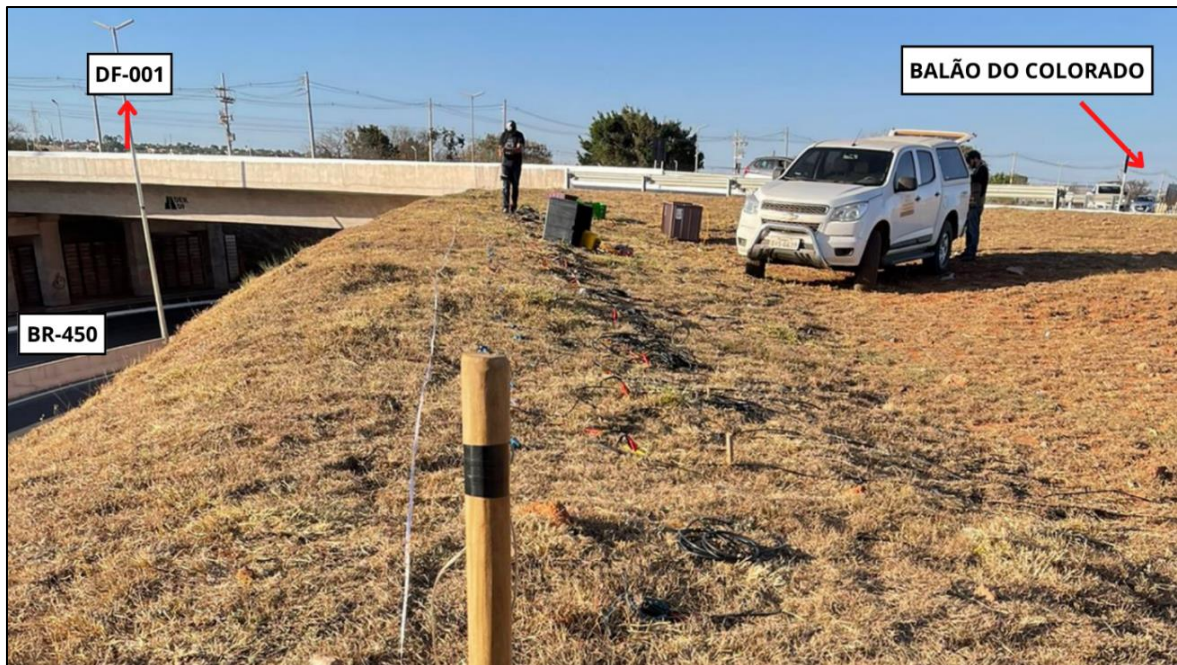


Figura 2 - Área de estudos localizada entre o entroncamento da DF-001 e a BR-450.



Figura 3 - Área de interesse geofísico e objeto de estudo desta pesquisa. A linha pontilhada e o limite amarelo são marcações visuais, respectivamente, de possíveis horizontes de solo e da posição e forma da descontinuidade.

2.2. Características Geológicas Regionais

O Distrito Federal (DF) está localizado no setor oriental da Província do Tocantins e na porção centro-sul da Faixa de Dobramentos Brasília (ALMEIDA; HASUI, 1984; MARINE *et al.*, 1984). A geologia regional é composta por rochas metassedimentares e divididas em quatro grupos geológicos (**Figura 4**), formados pelos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, (FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

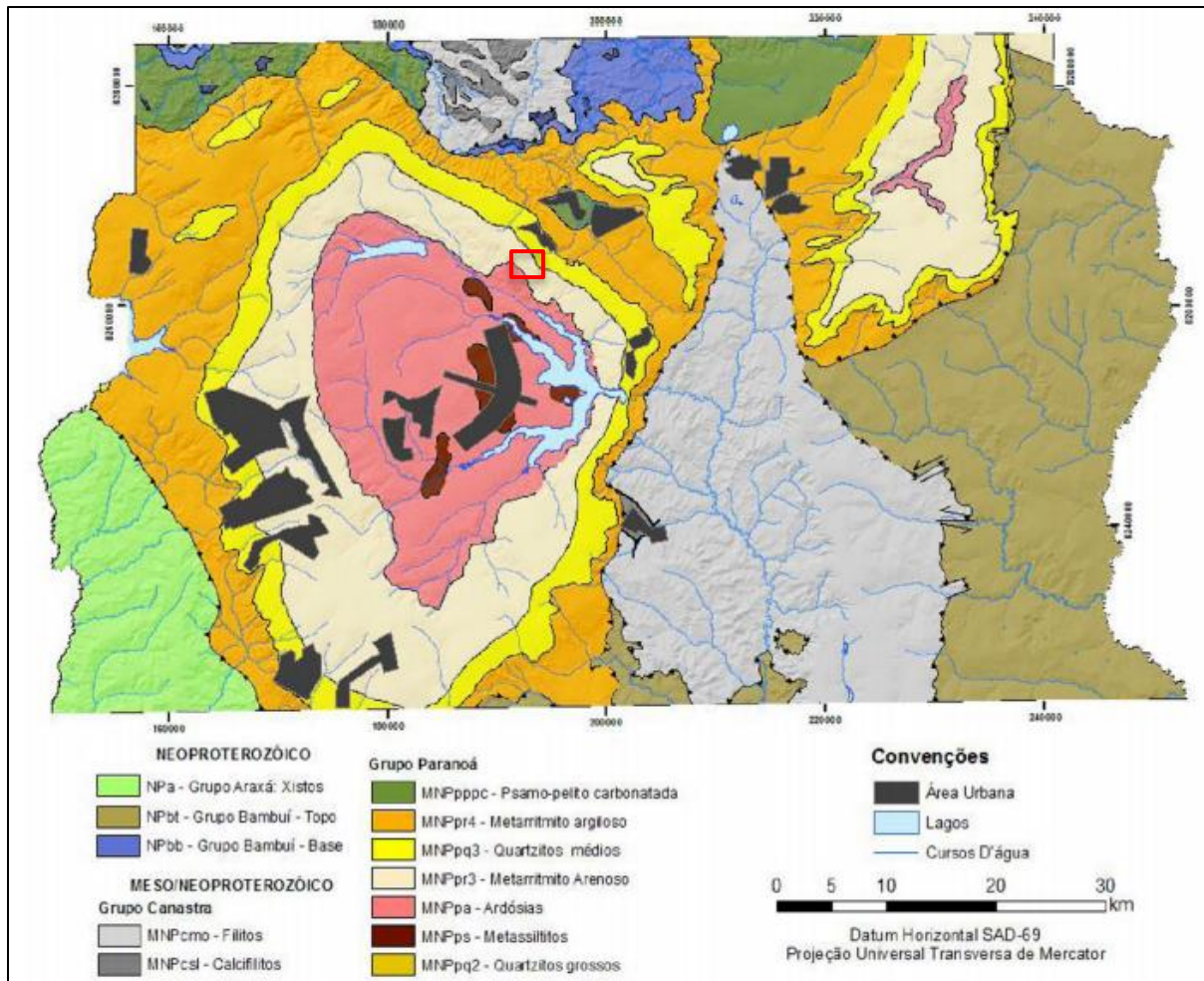


Figura 4 - Mapa geológico simplificado do Distrito Federal (atualizado de Freitas-Silva & Campos, 1999).

A área de estudo deste trabalho está situada no Grupo Paranoá, o qual corresponde a uma sucessão psamo-pelito-carbonatada depositada em condições plataformais (CAMPOS *et al.*, 2013). O grupo Paranoá, de acordo com Faria (1995), é estratigraficamente separado em onze unidades correlacionadas e descritas informalmente por letras-códigos da base para o topo: *SM, R₁, Q₁, R₂, Q₂, S, A, R₃, Q₃, R₄* e *PC*.

A Unidade S, compartimento onde situa-se o local de aquisição dos dados sísmicos deste projeto, é subdividida em cinco litofácies (**Figura 5**), sendo composta por um conjunto de metassilitos argilosos homogêneos com coloração cinza esverdeada quando fresca e tons avermelhados com o aumento do intemperismo que podem conter intercalações arenosas. Sua área de exposição é muito restrita, sendo encontrados raros afloramentos. Esta unidade representa à base da estratigrafia do Grupo Paranoá no DF e que devido à sua variabilidade, pode alcançar espessuras superiores a 500 m. Além das ocorrências típicas, ainda podem ser

encontrados metarritmitos com bancos de quartzitos arcoseanos, rochas carbonáticas na forma de lentes, camadas decimétricas de quartzitos médio a grossos (CAMPOS *et al.*, 2013).

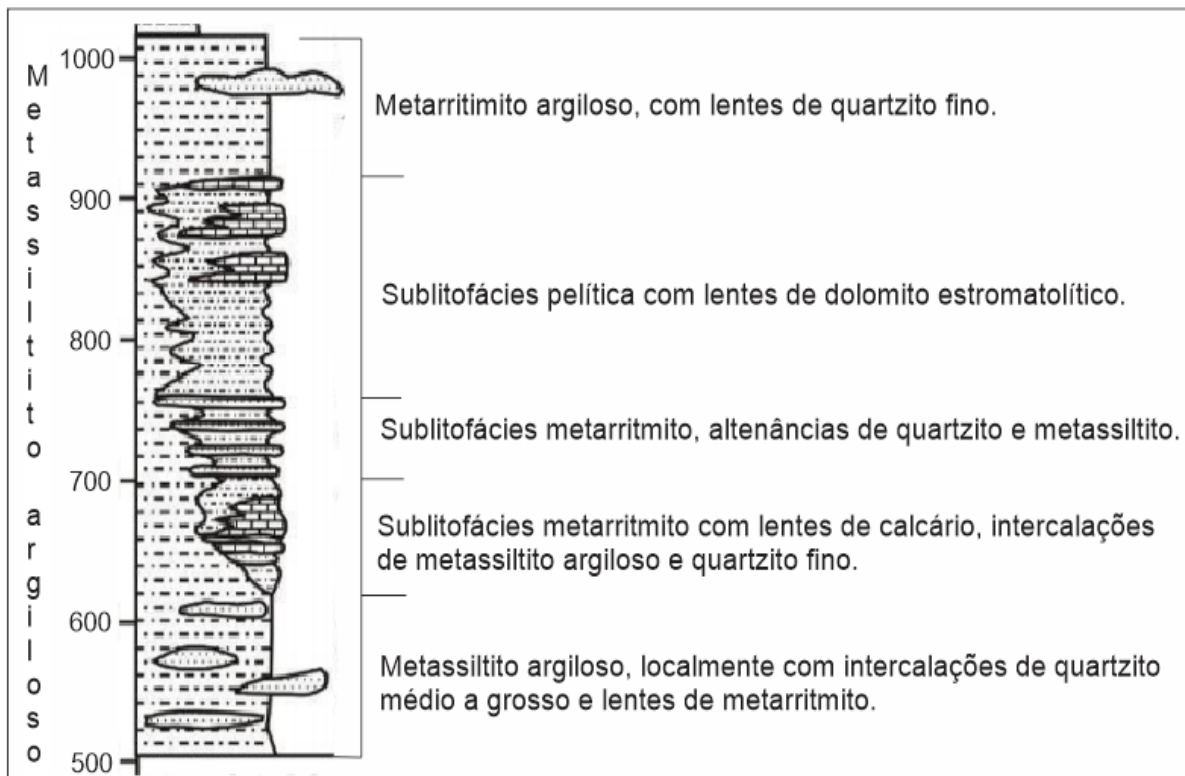


Figura 5 - Coluna litoestratigráfica da Unidade S (modificado de Faria, 1995).

2.2.1. Características Geológicas Locais

No estudo de Cuartas (2018), foi realizado o levantamento das propriedades geomecânicas das rochas aflorantes no setor próximo a entrada da região administrativa do Taquari (Trecho 1), e na rotatória do Colorado (Trecho 2), que é subdividido em duas áreas, conforme apresentado na **Figura 6**. O local de estudos do presente trabalho foi situado no Trecho 2, Área 2.

No trecho em questão, na saída da rotatória do Colorado no sentido de Brasília, observam-se afloramentos rochosos com alternância entre quartzito arenoso e metassiltitos (metarritmitos). Na sequência, pôde-se observar uma rocha sedimentar composta por intercalações de quartzitos finos-esverdeados e metassiltitos avermelhados, de granulometria centimétrica e textura variando desde areia fina até siltosa (CUARTAS, 2018).



Figura 6 – Área de estudos geomecânicos apresentado por Cuartas (2018). O local de interesse deste trabalho está no Trecho 2, Área 2. A figura superior apresenta a divisão feita por Cuartas (2018) dos Trechos 1 e 2. A figura inferior, no Trecho 2, área 2, representa a área estudada no presente trabalho (Adaptado de Cuartas, 2018).

2.3. Características Pedológicas

O solo do Distrito Federal mapeado pelo Serviço Nacional de Levantamentos de Solos (Embrapa, 1978) e revisado por Embrapa (2004), pode ser classificado em dois núcleos. O primeiro, constitui os chamados solos dominantes, os quais são o Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (C), cobrindo cerca de 90% da área do Distrito Federal. O segundo núcleo cobre aproximadamente 10% do território do Distrito Federal, que abrangem os demais tipos de solos, sendo eles o Nitossolo, Chernossolo, Gleissolo, Neossolo Quartzarênico, Argissolo, Neossolo Flúvico e Neossolo Litólico e Plintossolo.

A área de estudo deste projeto está localizada na porção do Latossolo Vermelho. Embrapa (2006), caracteriza o Latossolo Vermelho como uma evolução muito avançada de

processo de latolização, que resulta numa intemperização intensa dos minerais primários e, conseqüentemente, numa maior concentração de minerais secundários mais resistentes como a hematita, goethita, gibbsita, quartzo. Este último, por apresentar característica físico-químicas mais resistentes à ação do intemperismo, permanece como mineral primário residual.

2.4. Caracterização geomecânica da área de estudos

Motivado pela duplicação das vias que contornam a rotatória do Colorado, estudos geotécnicos foram realizados com o objetivo de descrever a estabilidade dos taludes criados artificialmente pelo corte das estradas e propor medidas de segurança voltadas para a contenção sistêmica deles.

Para a área de estudos deste trabalho, Cuartas (2018) classifica as rochas aflorantes baseado em índices geotécnicos para maciços rochosos e descritos sucintamente a seguir.

a) *Coerência*

Lopes (2006) classifica a coerência de rochas a partir de características físicas como resistência ao impacto, resistência ao risco (dureza), friabilidade. Para Guidicini e Nieble (1984), a classificação do grau de coerência entre as rochas varia em uma escala entre muito coerente até friável. A **Tabela 1** apresenta a descrição dos parâmetros utilizados para descrever os níveis de coerência de uma rocha, variando de C1 a C4.

Tabela 1 - Classificação das rochas quanto ao grau de coerência (Adaptado de Lucas (2006), Guidicini e Nieble (1984)).

Rocha	Símbolo	Características
Muito Coerente	C1	- Quebra com dificuldade ao golpe de martelo. - Fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina - Superfície dificilmente riscada por lâmina de aço.
Coerente	C2	- Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. - Fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço. - Superfície riscável por lâmina de aço.
Pouco Coerente	C3	- Quebra facilmente ao golpe do martelo. - Bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos. -Lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.
Friável	C4	- Esfarela ao golpe do martelo. - Desagrega sob pressão dos dedos.

b) Alteração:

Ojima (1982) define a alteração, sob o ponto de vista geotécnico, como o conjunto de modificações que conduzem à degradação das características mecânicas da rocha e, desse modo, tornando o maciço rochoso cada vez mais enfraquecido. A **Tabela 2** traz a classificação do grau de alteração definido pelo ISRM (1981).

Tabela 2 – Grau de alteração das rochas classificada por ISRM (1981).

Sigla	Denominação	Descrição
W1	Rocha Sã	Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho original e cor. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.
W2	Rocha Pouco Alterada	Descoloração na matriz rochosa e nas descontinuidades. Alteração mineralógica perceptível e perda de brilho. Resistência original da rocha parcialmente afetada pela alteração.
W3	Rocha Moderadamente Alterada	A matriz apresenta-se descolorida, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das descontinuidades. Resistência afetada pelo intemperismo.
W4	Rocha Muito Alterada	Matriz totalmente oxidada e cores muito modificadas. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência muito afetada pela alteração.
W5	Rocha Completamente Alterada	Todo material rochoso é decomposto em solo estruturado. A estrutura original do maciço é ainda largamente intacta.
W6	Solo Residual	Material totalmente transformado em solo. Estruturação da rocha matriz destruída.

c) Fraturamento:

De acordo com Amaral (2019), o grau de fraturamento está relacionado à persistência da descontinuidade observada em atividade de campo, ou seja, com o comprimento observado de uma descontinuidade no maciço rochoso e com origens estruturais.

A partir das classificações referenciadas acima e da testagem de amostras ainda em campo, Cuartas (2018) realizou a descrição das rochas localizadas no local de estudos do presente trabalho conforme descritos na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Classificação dos afloramentos rochosos na área de aquisição dos dados sísmicos.

Índice Geotécnico	Sigla	Denominação Rocha	Descrição
Coerência	C2	Coerente	- Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. - Fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço. - Superfície riscável por lâmina de aço.
Alteração	W2/W3	Rocha pouco alterada a moderadamente alterada	- Descoloração na matriz rochosa e nas discontinuidades. - Alteração mineralógica perceptível e perda de brilho. - Resistência original da rocha parcialmente afetada pela alteração.
Fraturamento	-	Rocha fraturada a muito fraturada.	-

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Ondas mecânicas

As ondas mecânicas são formadas a partir do movimento forçado de uma porção de um meio deformável e são caracterizadas pelo transporte de energia através de movimentos de partículas sobre uma posição de equilíbrio (ACHENBACH, 1984). À medida que os elementos do meio são deformados, a perturbação gerada é transmitida de um ponto a outro em todas as direções na forma de onda, a qual se propaga através do meio (HALLIDAY *et al*, 2009). A energia pode ser transmitida a distâncias consideráveis pelo movimento das ondas, embora ela

dependa da densidade e dos módulos elásticos dos materiais geológicos em subsuperfície (KEAREY *et al.*, 2009).

Os métodos sísmicos são fundamentados pelo fato das ondas mecânicas geradas na superfície se propagarem em profundidade até ocorrer uma variação abrupta das propriedades elásticas do meio, fazendo assim que as ondas retornem para a mesma superfície (KNODEL *et al.*, 2007).

3.2. Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW)

Muitos estudos na área de engenharia civil, meio ambiente e águas subterrâneas utilizam dos efeitos de propagação da onda de cisalhamento (onda S) em materiais próximos à superfície.

A análise espectral de ondas de superfície (*spectral analysis of surface waves* - SASW) apresentada por Stokoe e Nazarian (1994) e Nazarian *et al.* (1983) é bastante utilizada na engenharia, onde as chamadas curvas de dispersão são processadas para produzir perfis de velocidade de onda S próximos à superfície.

A partir do desenvolvimento do método e da utilização de multicanais, o método passou a ser mais conhecido como análise multicanal de ondas de superfície (*Multichannel Analysis of Surface Waves* - MASW). O método ativo utiliza ondas de superfície geradas através de uma fonte, por exemplo, uma marreta, enquanto o método passivo utiliza de ondas geradas passivamente, como o tráfego de carros ou movimento de marés. As profundidades de investigação são menores que 30 m no método ativo, enquanto o método passivo pode alcançar algumas centenas de metros (PARK, MILLER e XIA, 2007).

As ondas transmitidas diretamente entre a fonte e os receptores são registradas pelo sismógrafo, para assim se obter os valores das ondas P e S. Após, é calculado os módulos de elasticidade dinâmicos, como o módulo de Young dinâmico (E_{din}). Além desses módulos, pode-se obter a razão V_P/V_S , determinada pelo coeficiente de Poisson, conforme a equação:

$$V_P/V_S = \left[\frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

O coeficiente de Poisson é dado pela razão da deformação transversal pela longitudinal. A razão V_P/V_S para os materiais, conforme definida pela equação (3.1), é definida apenas pelo valor do coeficiente de Poisson para aquele material. Esta razão por ser independente da densidade pode ser usada como um indicador litológico (KEAREY *et al.*, 2009).

3.3. Sísmica de Refração

O método sísmico de refração faz uso do princípio de que uma onda, ao atravessar meios diferentes, é capaz de mudar a direção e o seu trajeto de acordo com o contraste de velocidade entre as camadas é descrito pela Lei de Snell (Equação 3.2 - REYNOLDS, 1997).

$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.2)$$

O método de refração depende do aumento da velocidade conforme aumenta a profundidade, onde é necessário que a camada inferior possua velocidade maior do que a camada superior ($V_2 > V_1$). Pode-se observar graficamente esse comportamento na **Figura 7**.

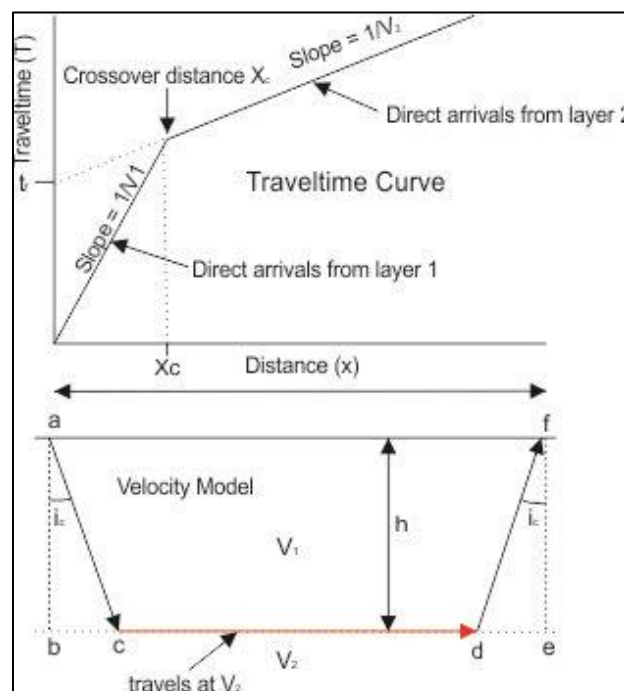


Figura 7 - Modelos matemáticos da refração (extraído do manual do programa Seisimager, Apêndice A).

Onde, i_c é o ângulo (chamado de total ou crítico) que define a direção de propagação da onda direta, V_1 a velocidade da camada superior e V_2 a velocidade da camada inferior.

Um levantamento de sísmica de refração rasa consiste na construção de uma linha composta por um número significativo de geofones (registradores do sinal sísmico) capazes de captar o sinal da onda sísmica, gerada pela ação de uma marreta golpeando a superfície (NOGUEIRA, 2014).

A partir dos parâmetros presentes na **Figura 7**, obtidos através da aquisição, e a Lei de Snell, é possível calcular a profundidade (h) da interface entre a camada de maior e menor velocidade aplicando (3.3):

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(V_2 - V_1)}{(V_2 + V_1)}} x_c \quad (3.3)$$

As variáveis necessárias para o cálculo da profundidade estão presentes no sismograma, que consiste no sinal (ondas sísmicas) em função do tempo e distância (**Figura 8**). Entre duas camadas, a onda refratada é vista através das primeiras chegadas, as quais geram uma reta com inclinação menor que a reta produzida pelos sinais da onda direta.

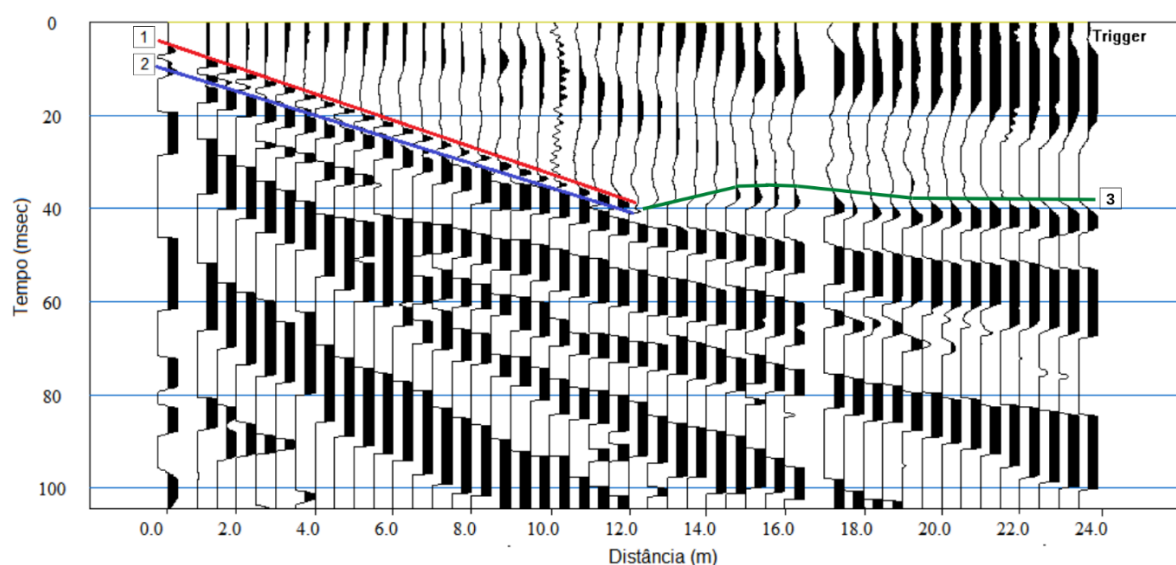


Figura 8 - Sismograma da linha adquirida com tiro realizado a 1,5 metros de distância do primeiro geofone, onde as ondas representadas, respectivamente, são (1) aéreas, (2) direta e (3) refratada.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os materiais e procedimentos de campo, e a descrição do processamento de dados utilizados para os dois métodos sísmicos.

4.1. Equipamentos

Os equipamentos e instrumentos necessários para a aquisição sísmica de MASW-A e Refração estão representados pela **Figura 9**. O levantamento contou com o uso de uma unidade de controle (notebook) conectada a um inversor e uma bateria de 12 Volts (**Figura 9a**), 2

sismógrafos do tipo GEODE (Geometrics, San Jose, CA, EUA) (**Figura 9b**), 4 cabos de comunicação sanfonado entre geofones (**Figura 9c**), 3 baterias de 12 Volts (**Figura 9d**), 48 geofones de 14 Hz (**Figura 9e**), e também 2 cabos de comunicação entre os GEODES e com a unidade de controle, uma marreta de 10 kg acoplada com *trigger* para ativar a aquisição dos dados, uma placa de metal conectada em circuito com o *trigger*, uma trena de 50 m e um multímetro.

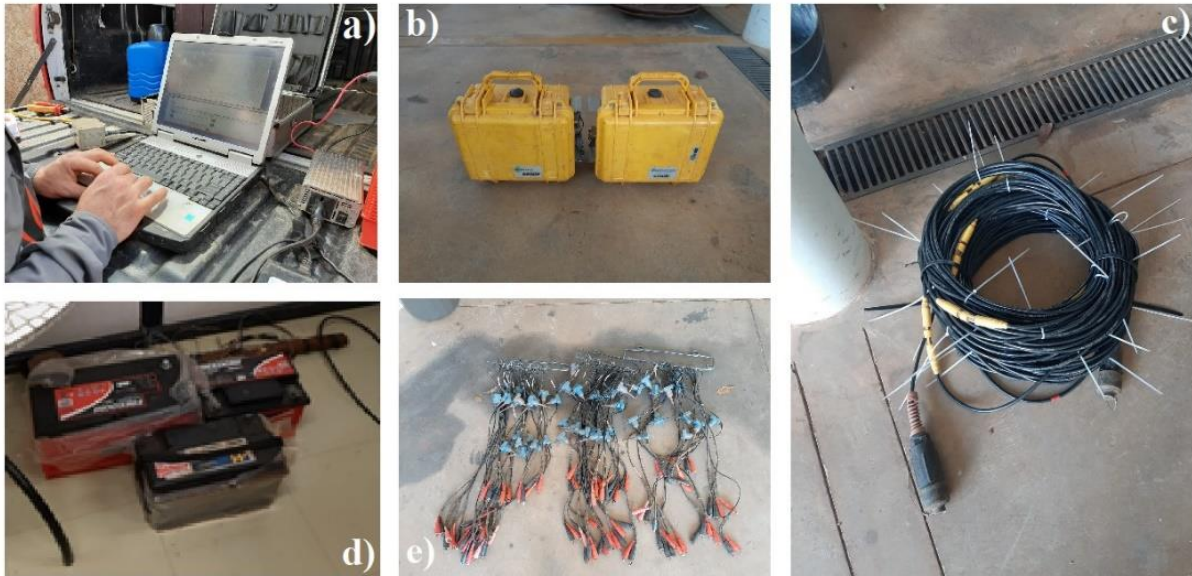


Figura 9 - Equipamentos e instrumentos utilizados em campo.

4.2. Aquisição

Neste trabalho, as metodologias de aquisição sísmica empregadas foram a Análise Multicanal de Ondas de Superfície Ativa (MASW-A) e a Sísmica de Refração, ambas adquiridas simultaneamente ao longo de duas seções com geometria linear. As **Figuras 10, 11a** e **b**, apresentam a localização da seção sísmica levantada.

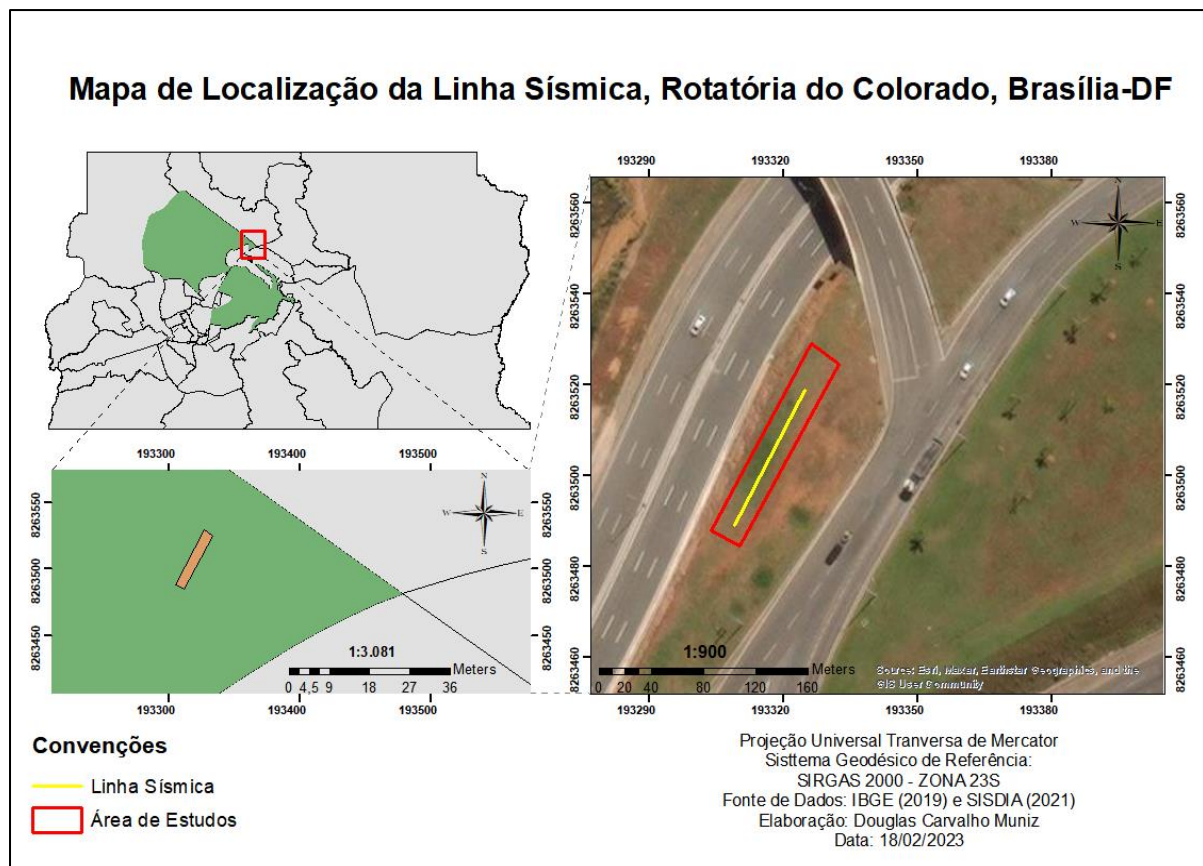


Figura 10 - Mapa de localização da linha sísmica. Sistema de Coordenadas UTM, SIRGAS 2000, Zona 23S.

O levantamento sísmico consiste no estudo das ondas acústicas, neste caso, geradas através de uma marreta de 10 kg golpeando uma superfície metálica. O sinal sonoro gerado percorre os substratos em subsuperfície e é registrado pelos geofones, que são receptores do sinal acústico. Estes, foram espalhados linearmente (**Figuras 10 e 11, c e d**) com equidistância de **0,5 metros** (**Figura 11e**) e interligados pelos cabos de comunicação sanfonado que envia o sinal captado para o sismógrafo e o converte no formato digital. Esse formato é enviado para a unidade de controle por meio do software de aquisição.



Figura 11 - Área de investigação sísmica de campo com a linha de aquisição sísmica configurada em geometria linear registrada em 18 de agosto de 2022, com as imagens **a** e **b**) representando a área de estudos, **c** e **d**) o início e fim do perfil sísmico na borda do talude e **e**) espaçamento fixo entre os geofones.

Neste trabalho, foram utilizados dois módulos sismográficos, onde cada módulo possui dois cabos de comunicação sanfonado com 24 saídas para conexão dos geofones, totalizando 48 sensores na linha adquirida, um GEODE por módulo e, por fim, o cabo de comunicação entre o sismógrafo e a unidade de controle. Para alimentar o GEODE são utilizadas baterias de 12 Volts. Uma das baterias também é utilizada para alimentar o inversor que fornece energia para o notebook. A **Figura 12**, representa um esquema do arranjo sísmico utilizado em campo.

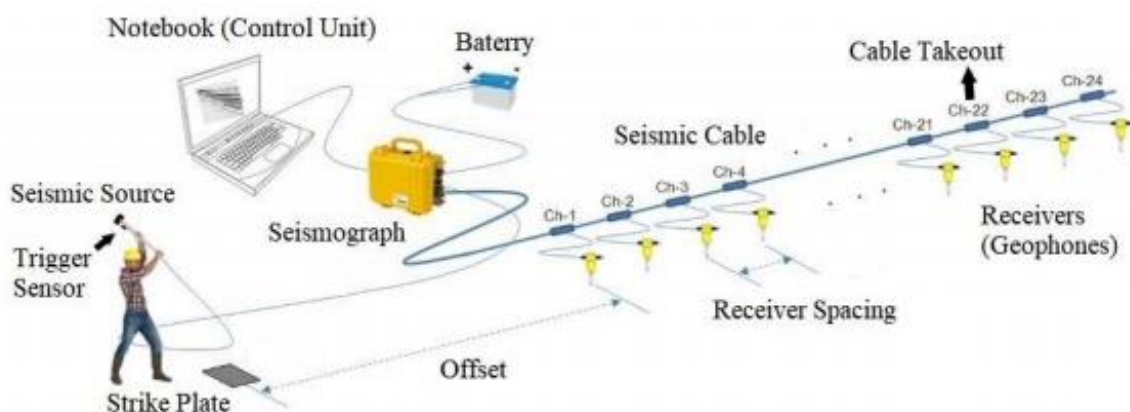


Figura 12 - Esquema de aquisição sísmica de MASW e Sísmica de Refração utilizando uma geometria linear e com o uso de uma fonte ativa (extraído de EIKMEIER (2018), e adaptado de Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (2018)).

Tendo em vista a complexidade da geometria das camadas subterrâneas, realizou-se golpes (tiros) com a marreta equidistantes de **2 metros**, paralelo aos geofones, visando diminuir o ruído da onda sonora gerada pelo choque da marreta com a placa metálica.

Além disso, são feitos diversos tiros por ponto investigado, de forma que se possa somar as ondas correspondentes ao sinal sísmico e, conseqüentemente, melhorar a razão sinal-ruído. Pensando nisso, em cada posição de tiro, foram realizados 10 golpes.

Para este levantamento, utilizou-se a técnica de *roll-along* com o objetivo de cobrir uma área de aquisição maior. Essa técnica, consiste em montar a linha sísmica de tamanho fixo e utilizando os 48 canais. Ao fim da primeira aquisição, move-se os 24 primeiros geofones para a frente dos 24 últimos. Dessa forma, a sondagem geofísica avança no local de estudos, cobrindo uma área maior e que possibilita uma melhor amarração do dado levantado.

A **Figura 13** mostra a área de interesse geofísico, como descrito na seção 2 (**Área de Estudo**), delimitando o início e fim da linha, como também apresenta o aumento da área investigada utilizando o *roll-along*. A **Figura 13a**, no marco 1 (linha tracejada em vermelha), representa o início da linha e onde foi cravado um piquete para georreferenciar o primeiro geofone. Na **Figura 13b**, tem-se as marcações do início e fim (marco 2) da primeira seção levantada e antes do *roll-along*.

Com o fim da aquisição da primeira seção, os primeiros geofones foram deslocados no sentido de norte a sul, e a frente da estaca fixada no marco 2. A **Figura 13c**, representa a área estudada após o uso do *roll-along*, onde 24 geofones estavam posicionados ao norte da estaca fixada no marco 2 e, ao sul deste, estavam os outros 24 canais, com último geofone posicionado no marco 3, onde foi fixado um terceiro piquete.

Ao todo, foram realizadas 26 posições de tiro e 36 m de aquisição sísmica. Para os parâmetros de aquisição, foi configurado um tempo de amostragem de **125 microssegundos**.

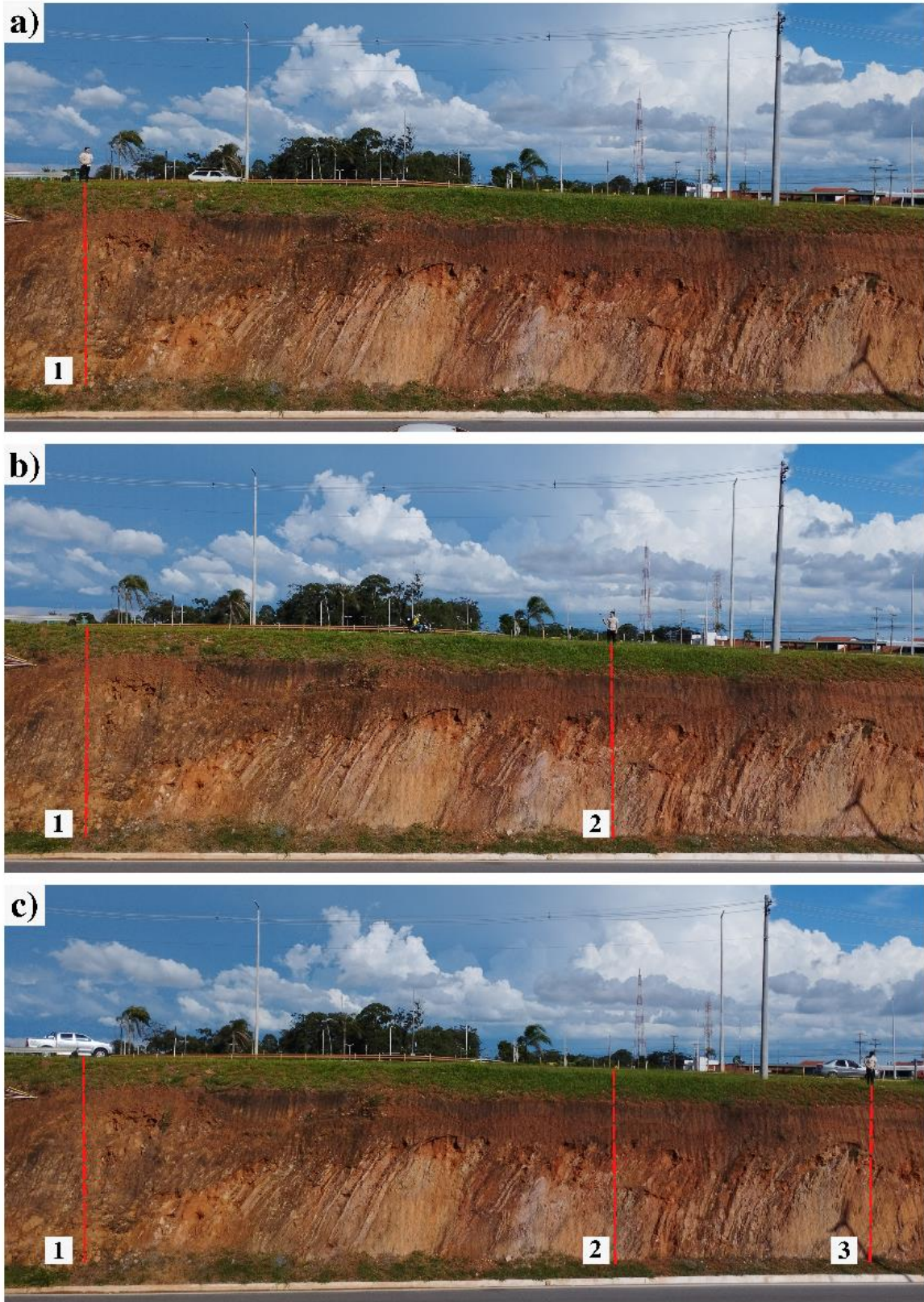


Figura 13 - Representação do início e fim da linha sísmica, totalizando 36 m de aquisição. As numerações 1, 2 e 3, representam estacas cravadas, respectivamente, na posição do primeiro e último geofone para georeferenciar a seção, **a)** é o início da linha, **b)** o fim da linha antes do deslocamento entre geofones e ponto central após a realocação dos geofones, **c)** fim da seção adquirida.

4.3. Processamento

4.3.1. Análise Multicanal de Ondas de Superfície - MASW

Em síntese, ao longo de todo o levantamento, o sinal sísmico registrado pelos geofones é convertido para o meio digital a partir da interface entre o sismógrafo e a unidade de controle. A resposta sísmica captada durante a aquisição, passa pelo processo conhecido como empilhamento vertical (*vertical stacking*), que tem por objetivo melhorar a razão sinal ruído (S/R) dos dados a partir da execução de vários golpes (EIKMEIER, 2018).

Assim, em um arranjo com geometria fixa e linear, como o realizado neste trabalho, muitos golpes foram aplicados durante a aquisição de dados para alcançar uma boa razão sinal ruído. A **Figura 14** demonstra o resultado desse empilhamento traduzido na forma de um sismograma.

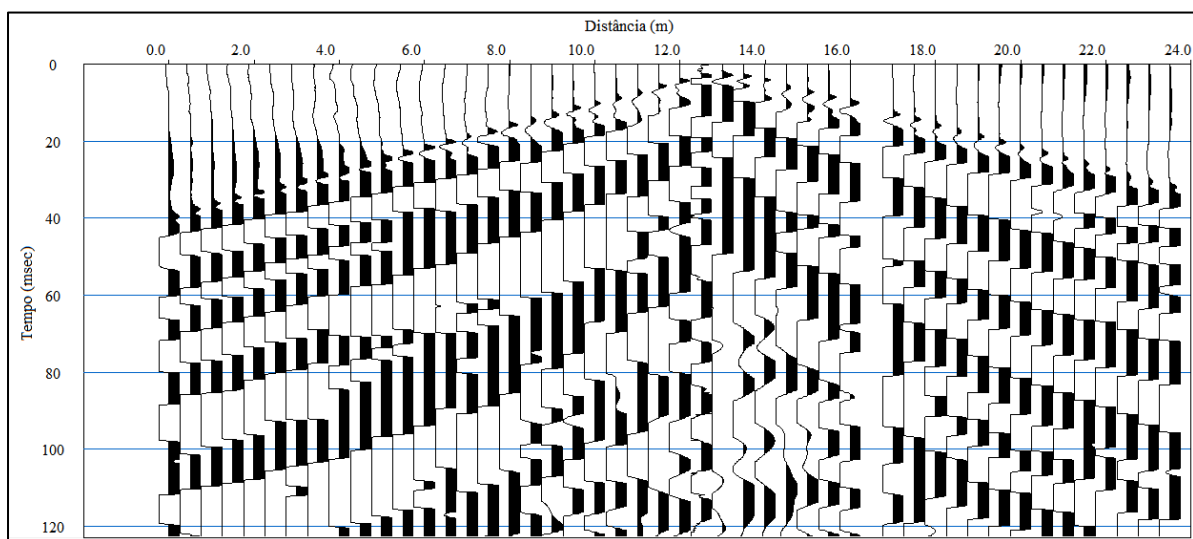


Figura 14 - Sismograma obtido com energizações realizadas com offset em 13 m.

A partir dos sismogramas obtidos, o processamento de dados para o método MASW, tem por objetivo a obtenção de um perfil de velocidade de ondas cisalhantes (V_s), com ênfase nas ondas Rayleigh, por meio da análise e inversão das curvas de dispersão do sinal acústico registrado (PARK *et al.*, 1999).

Para a obtenção dos perfis de V_s , o software utilizado para tratamento e interpretação dos dados foi o *SeisImager 2D* da Oyo Corporation. Este software é um pacote composto por cinco programas integrados e com funções específicas. Os programas utilizados para processamento

dos dados de MASW foram, respectivamente, o *Surface Wave Analysis Wizard*, *WaveEq* (*Surface Wave Analysis*), *GeoPlot* (*Visualize Data*) e *Plotrefa* (*Refraction Analysis*).

Desse modo, o primeiro passo para o processamento dos dados de campo é a abertura dos sismogramas utilizando o programa *Surface Wave Analysis Wizard* (SW) para seções 2D de fontes ativas. A partir daí, é possível ver o empilhamento vertical do sinal sísmico captado ao longo de todo o levantamento, sendo possível avaliar a presença de ruídos significantes visualmente, e que permaneceram após o empilhamento.

No caso desses ruídos, eles podem ser removidos previamente durante a primeira observação do sismograma. A **Figura 15** representa um exemplo simples de pré-análise e a retirada de traços que apresentam informações ruidosas no sismograma.

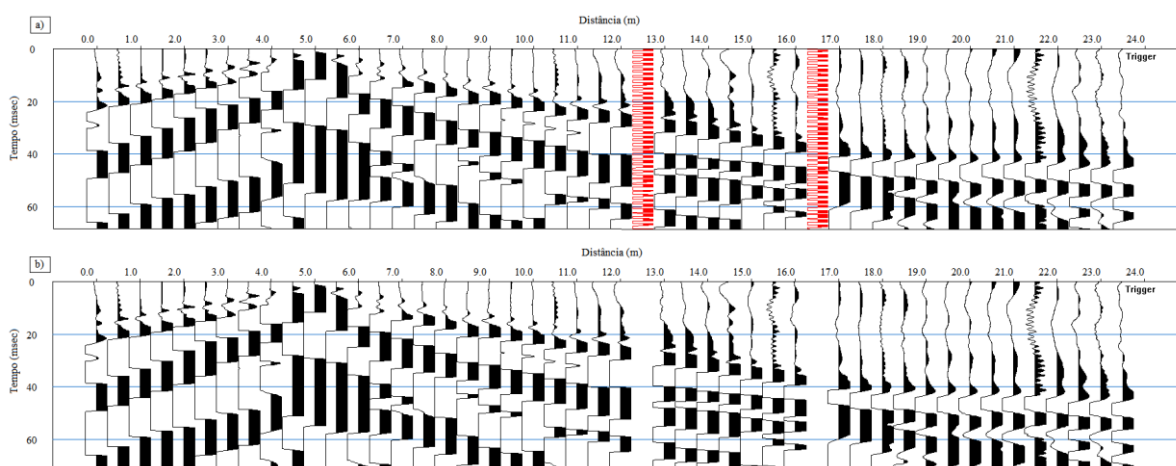


Figura 15 - Exemplo de pré-análise do sismograma e identificação de ruídos utilizando a função Edit do Surface Wave, onde em a) é demonstrado dois traços bem ruidosos (em vermelho) e em b) o dado com os traços editados após identificação do ruído.

Com a verificação inicial do dado, o processamento é continuado com a correlação cruzada entre pares de traços utilizando o método do *Common Midpoint* (CMP) (HAYASHI e SUZUKI, 2004). Esta técnica fornece uma estimativa melhor e bem acurada das curvas de dispersão (REHMAN *et al.*, 2018). Dessa forma, para a construção das famílias CMP em cada registro de tiro, a correlação cruzada (CC) de cada par de traços é realizada e, em seguida, os traços de correlação com CMPs idênticos e com espaçamento iguais, são agrupados e empilhados no domínio do tempo (REHMAN *et al.*, 2018).

Na **Figura 16a** está demonstrada a geometria utilizada na aquisição dos dados para este trabalho. Nas **Figuras 16b** e **16c**, representam o esquema e o resultado da criação das famílias CMPs com correlação cruzada. Hayashi e Suzuki (2004) descrevem essa correlação cruzada como CMPCC.

Como a subsuperfície é considerada como um meio dispersivo das ondas sísmicas, as frequências ou amplitudes dos pacotes de ondas de superfície são alterados de acordo com a profundidade. Devido a isto, as velocidades das componentes são caracterizadas por diferentes velocidades de fase, dependentes da frequência (EIKMEIER, 2018).

A partir das famílias CMPCC, gera-se as curvas de dispersão pela separação das diferentes frequências contidas no pacote de ondas de superfície e calcula-se a sua velocidade de fase (FERNÁNDEZ, 2017). Este procedimento se dá por técnicas de filtragem e análise espectral por meio da aplicação da transformada de Fourier (NETTO *et al.*, 2020). Na **Figura 17a**, está apresentado o espectro de velocidade de fase (m/s) por frequência (Hz), com offset de 11.5 metros, descrito como gráfico *c-f* (MILLER *et al.*, 1999). A **Figura 17.b** representa a curva de dispersão obtida a partir da análise espectral.

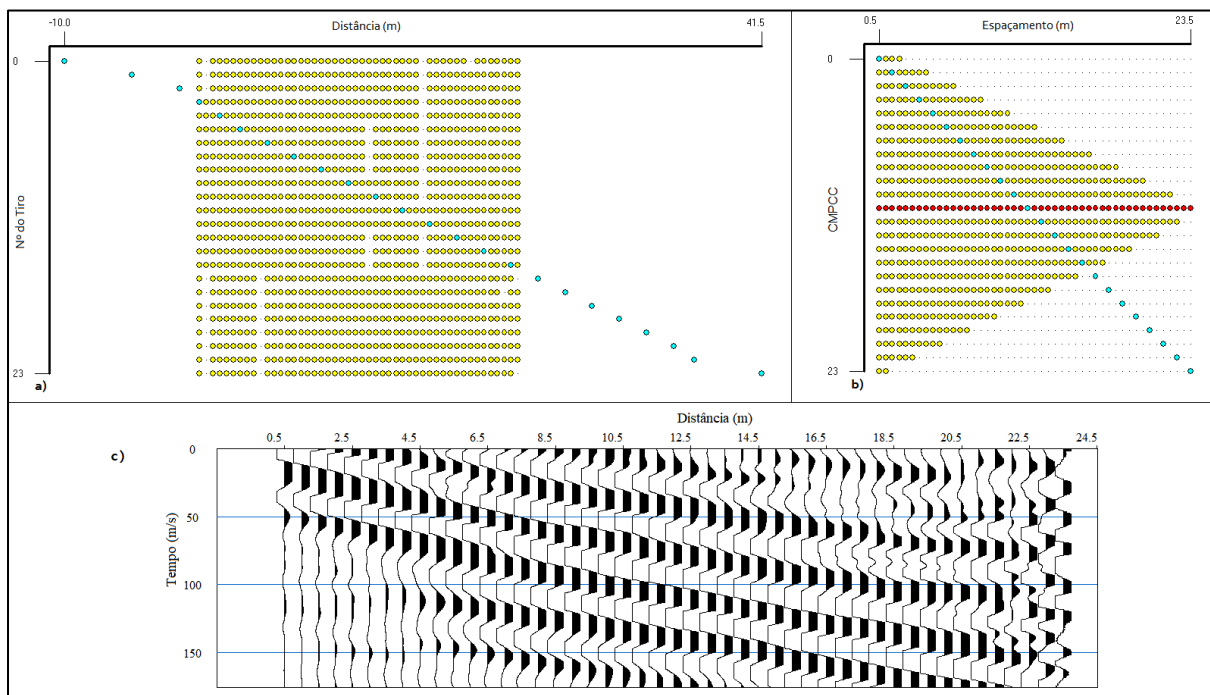


Figura 16 - Definição das famílias CMPs após a aquisição em campo, onde a) é a geometria linear fixa utilizada, b) o resultado do empilhamento entre traços de espaçamento iguais e c) o sismograma gerado antes da construção das curvas de velocidade V_s e com os traços resultantes do empilhamento no domínio do tempo (HAYASHI e SUZUKI, 2004).

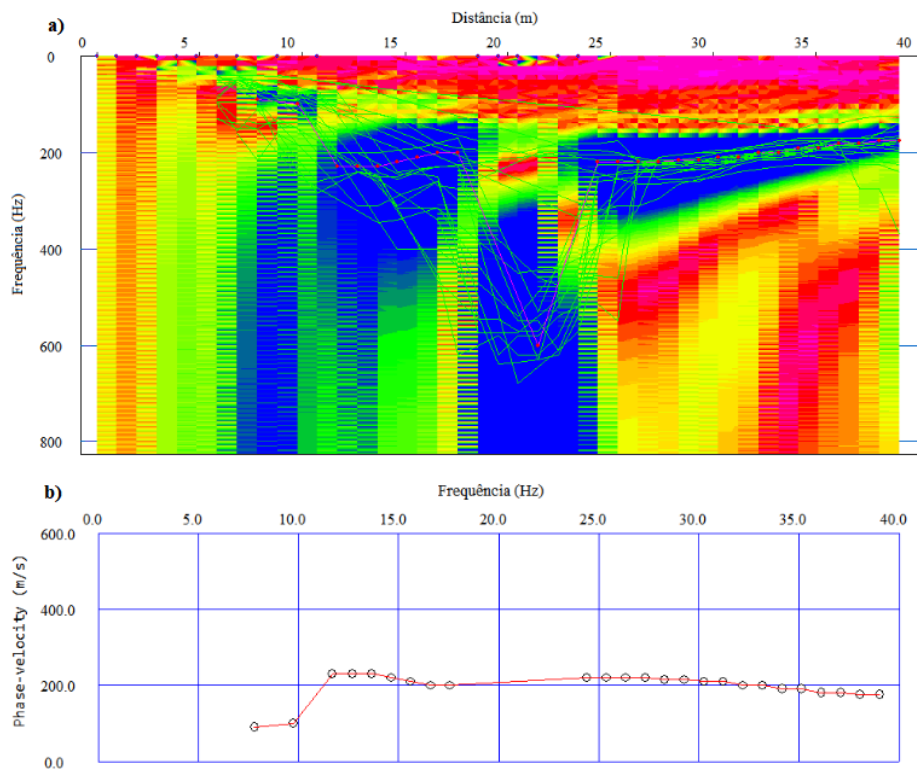


Figura 17 - Após o empilhamento das famílias CMPCC, os resultados obtidos são: **a)** o espectro de frequência gerado e **b)** as curvas de dispersão que serão analisadas.

Após a análise espectral das velocidades de fase, o processamento dos dados é realizado no programa *WaveEq (Surface Wave Analysis)*, onde as curvas de dispersão de todos os traços CMPCC analisados são representadas em um gráfico de velocidade de fase (m/s) por frequência (Hz) como indica a **Figura 17b**. A **Figura 18** demonstra as curvas de dispersão obtidas após análise espectral.

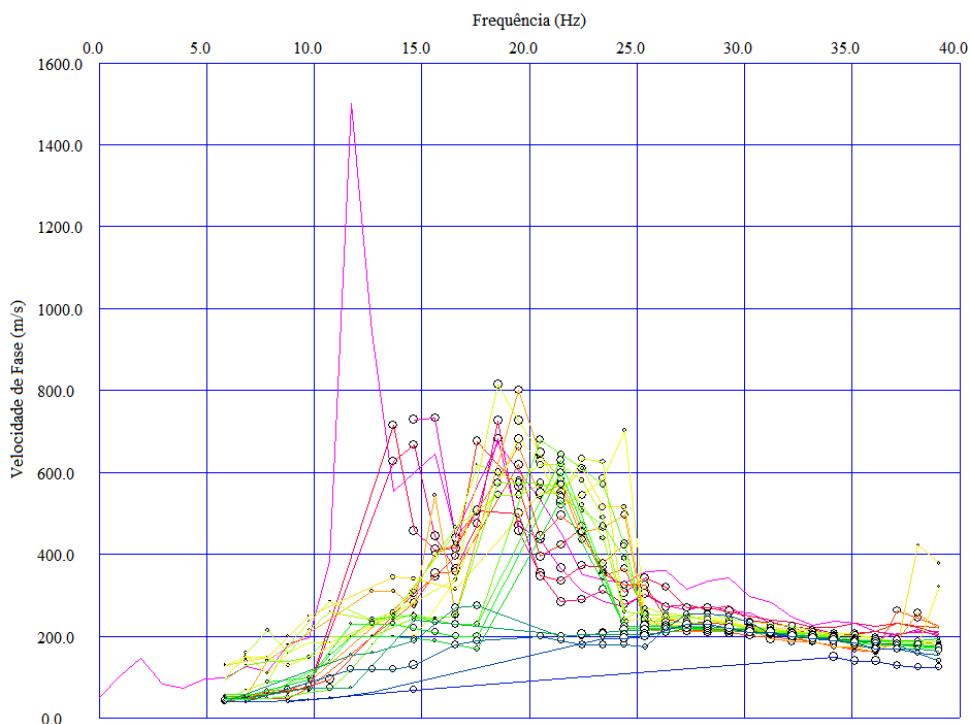


Figura 18 - Representação das curvas de dispersão da aquisição sísmica de MASW com uso de fonte ativa.

A partir daí, as curvas podem ser modeladas ou não, a depender da avaliação do operador. Assim, após o tratamento de dados necessário, é gerado um modelo inicial de velocidade da onda S em relação a profundidade (HAYASHI e SUZUKI, 2004).

Em seguida, a inversão do modelo inicial das curvas de dispersão é executada. O resultado é um perfil 2D de velocidade da onda de superfície em profundidade. A inversão, neste caso, contou com 9 interações e para camadas em até 7 metros de profundidade. Os resultados da inversão são apresentados na **Seção 5 (Resultados)**.

O valor do desvio médio quadrado (RMS) para a inversão 2D dos dados foi de 4,851% e, baseado no manual do *software*, deve ser menor que 6%, o que indica que o processamento do produto final do presente trabalho está dentro do recomendado.

Finalmente, de posse do modelo de velocidade obtido pela inversão, o perfil 2D de V_s é aberto com o uso do *GeoPlot (Visualize Data)* com o objetivo de visualizar a variação da velocidade e seus domínios em profundidade.

A partir desse perfil, pode-se determinar o grau de compactação e o tipo de material em subsuperfície, podendo assim, comparar os resultados obtidos com outras medições geotécnicas e com padrões de velocidade estabelecidos, como por exemplo, os utilizados no código europeu para construção civil, *Eurocode 8* (2011) e pela *Uniform Building Code* (UBC) (1976).

4.3.2. Sísmica de Refração

A aquisição e processamento dos dados sísmicos utilizando a Sísmica de Refração, como referido anteriormente nas seções 1 e 4.3.1, tem processo similar ao do MASW, onde ambos foram adquiridos simultaneamente. Entretanto, é no tratamento dos dados que os dois métodos se diferenciam.

Para o MASW, o processamento é feito baseado no empilhamento dos dados (*vertical stacking*), análise espectral e inversão das curvas de dispersão de ondas de superfície (PARK *et al.*, 1999). Por sua vez, no método de Sísmica de Refração, o processamento é realizado com medição e análise das primeiras chegadas de ondas geradas na superfície, refratadas em subsuperfície e registrada novamente na superfície pelos geofones (FILHO *et al.*, 1987).

Desse modo, as ondas (nesse caso, são as P ou de corpo) que foram captadas pelos sensores e convertidas pela unidade de controle durante o levantamento, são representadas como um sismograma com a soma de todos os registros após cada impacto.

O pacote de programas utilizado para tratamento e interpretação dos dados de refração foi o mesmo da seção anterior (SeisImager - Oyo Corporation). Assim, o processamento tem início com a abertura dos sismogramas no programa Pickwin (*Pick First Breaks or Dispersion Curves*). Neste programa, é possível visualizar o sismograma multicanal com registro do sinal sísmico captado ao longo de toda a linha de aquisição, nos permitindo realizar visualmente uma análise prévia da qualidade dos dados, com o objetivo em reduzir ou eliminar ruídos advindos do levantamento. Após essa primeira análise, no sismograma, são feitas marcações das chegadas das ondas (picagens) para determinar o tempo de chegada das primeiras ondas sísmicas relacionadas com a onda direta ou refratada (NEVES *et al.*, 2014). A **Figura 19** é um exemplo de marcação com vista na delimitação das curvas de tempo de chegada das primeiras ondas.

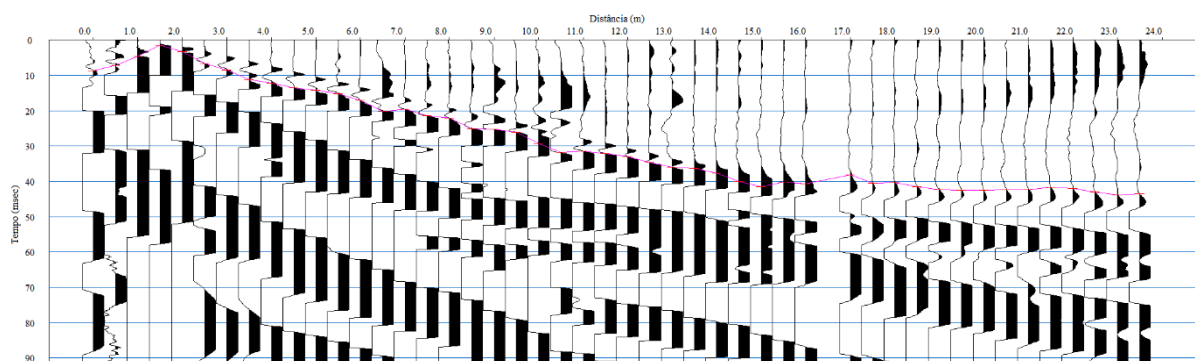


Figura 19 - Sismograma multicanal para a fonte localizada na posição 1.5 metros. Em vermelho está a marcação manual feita no módulo Pickwin. A linha vermelha contínua mostra a conexão entre as marcações definindo as curvas de tempo de percurso.

Com as marcações das primeiras chegadas feitas no *Pickwin*, o processamento tem continuidade no *Plotrefa* (*Refraction Analysis*). Neste módulo, é realizado a maior parte do tratamento de dados e sua inversão.

Nesse programa os arquivos contendo as marcações das primeiras chegadas de onda obtidas no *Pickwin*, são importados. O resultado dessas marcações é um gráfico com eixos de distância (m) pelo tempo de viagem (msec), resultado gerado pelas marcações (NEVES *et al.*, 2014). A **Figura 20** apresenta os resultados das marcações feitas nos dados adquiridos em campo, conforme é observado no programa *Plotrefa*. Na área do gráfico, as curvas representam o tempo de percurso da onda direta e refratada ao longo da linha de aquisição em relação aos impactos gerados pela fonte.

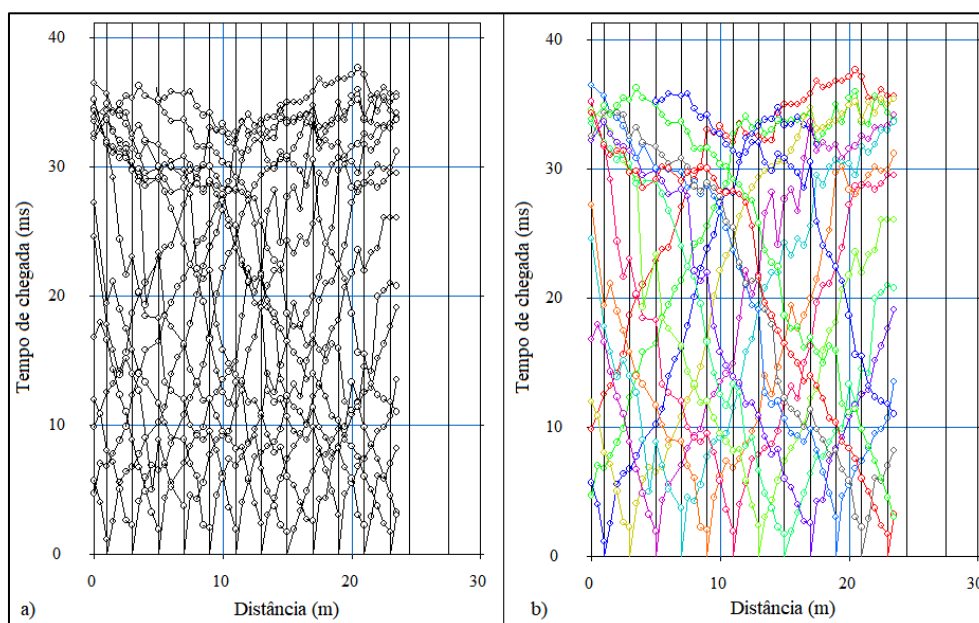


Figura 20 - Apresentação das curvas de tempo de chegada pela distância. Resultado obtido após a picagem de dados no *Pickwin* onde a) são as curvas brutas e b) as curvas separadas por stack ou tiro.

A partir das curvas tempo-distância, fez-se a identificação das curvas correspondentes a cada fonte, removendo os pontos que representavam variações abruptas na curva e, assim, suavizando-a de forma que fosse possível perceber onde ocorria a mudança de inclinação ou a inflexão da curva.

A importância em se perceber essa variação na inclinação da curva, de acordo com a Lei de Snell, é devido ela ser o indicativo de que houve variação da velocidade entre as camadas em profundidade e das interfaces refratoras (PINTO, 2018).

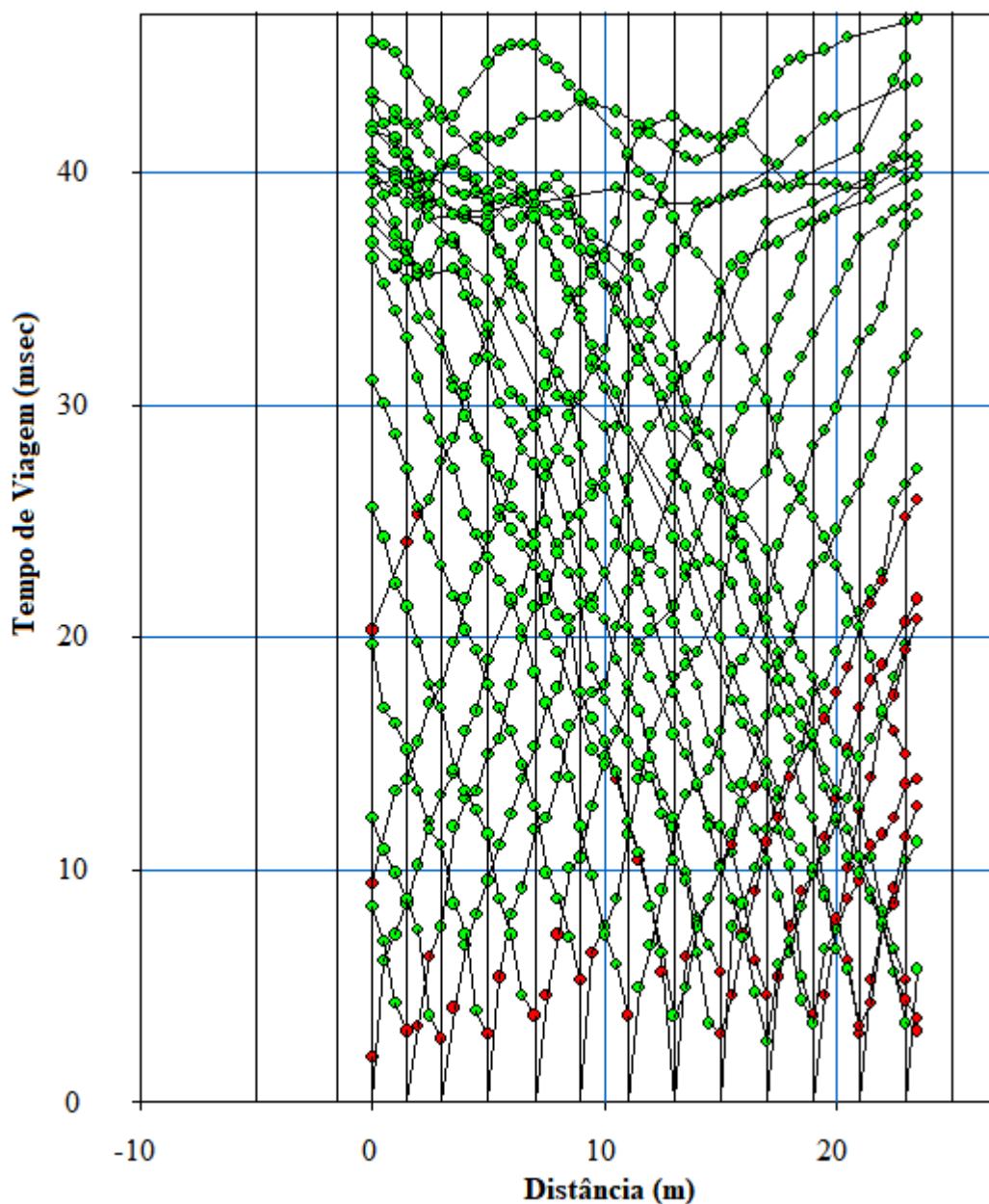


Figura 21 - Curvas de velocidade da onda P obtidas de marcações feitas manualmente.

Após a remoção dos dados considerados ruidosos e suavizado as curvas, fez-se a inversão dos tempos a partir da técnica chamada *time-term inversion*, a qual emprega uma combinação linear de mínimos quadrados e a análise de tempo de atraso para inverter as primeiras chegadas para uma seção de velocidade (Geometrics, 2009; SHEEHAN *et al.*, 2005).

Assim, para este trabalho e a partir dessa técnica, foi utilizado o tempo de chegada para duas camadas, onde pôde-se realizar as marcações nas variações de inclinação das curvas do tempo de chegada e, desse modo, indicar onde tem início parte dos tempos relacionados com as ondas refratadas. Com essas indicações, fez-se a inversão dos tempos sem anexar a

topografia local e, dessa forma, obteve-se o perfil com o modelo de velocidades de ondas P das duas camadas bem como o perfil de tomografia sísmica.

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados dos estudos sísmicos realizados na região da rotatória do Colorado, utilizando os métodos de MASW e Sísmica de Refração.

5.1. Resultados do Ensaio Sísmico 2D - MASW

Os dados obtidos com o levantamento utilizando o método de MASW, após a criação de um modelo inicial 1D e sua inversão, possibilitaram a geração de um perfil de distribuição de velocidade de propagação da onda S em subsuperfície.

O modelo obtido, foi gerado a partir da análise das curvas de dispersão de ondas superficiais e é caracterizado pelo gradiente da velocidade da onda S em função da profundidade.

A **Figura 22** apresenta o resultado obtido na inversão. Os traços coloridos representam as curvas de velocidade para cada curva de dispersão, os pontos em verde, são uma aproximação do melhor alcance da penetração da onda S em profundidade. A **Figura 23** é o resultado em 2D do perfil de velocidade V_s obtido a partir da inversão e visualização no *Geolplot*.

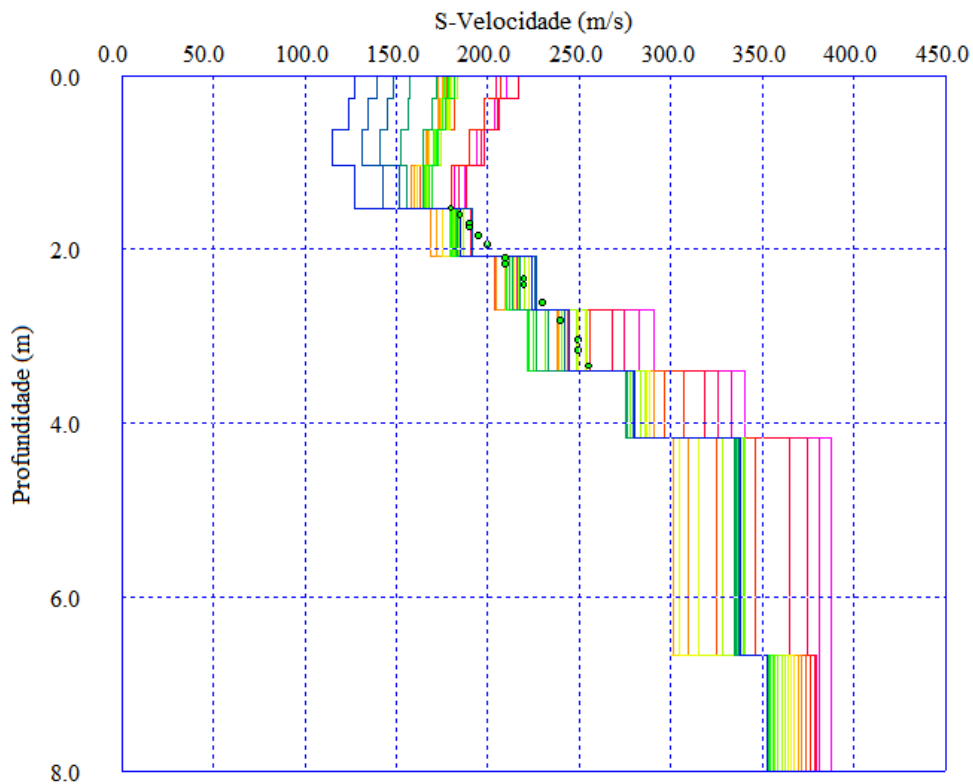


Figura 22 - Perfil de velocidades da onda S (V_s) obtidos após a inversão dos dados de campo, com alcance de penetração em profundidade próximo dos 4 metros.

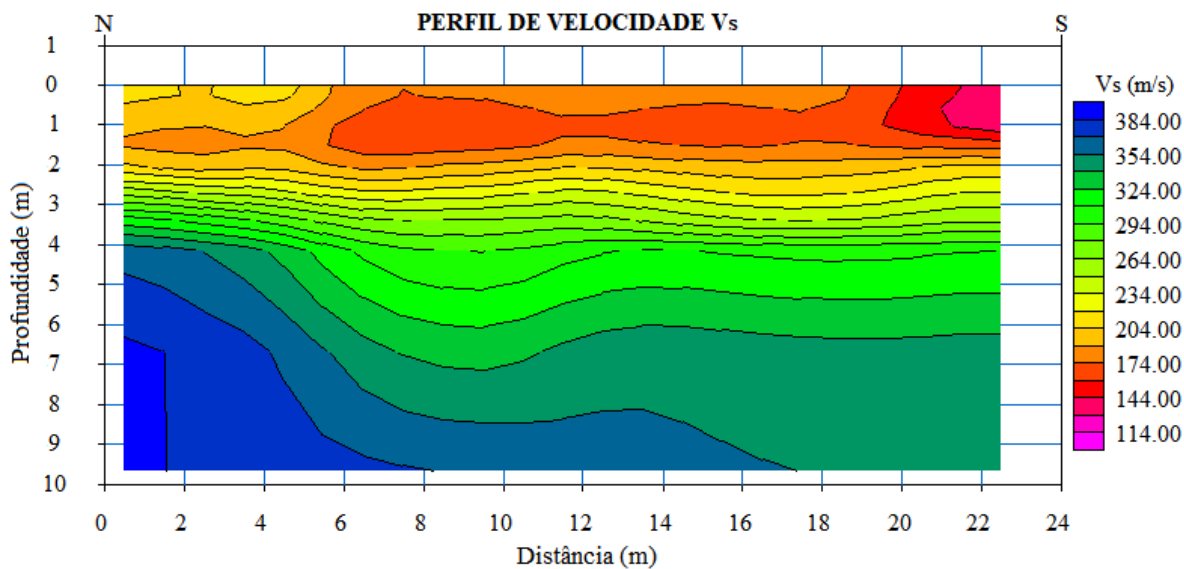


Figura 23 - Perfil de Velocidade da onda S obtido com o uso de fonte ativa na borda do talude.

O perfil apresentou velocidades variando desde 114 m/s até 384 m/s, sendo possível observar um gradiente com aumento significativo da velocidade entre 2 e 3 metros de

profundidade. Além disso, pode-se perceber da **Figura 23**, a presença de três domínios de velocidade de propagação das ondas S.

O primeiro, é caracterizado por uma zona de baixa velocidade indo da superfície até, aproximadamente, 1,80 metros de profundidade. O segundo domínio é definido pelo aumento de velocidade, com profundidade entre 1,80 e 3 metros. Finalmente, o terceiro constitui uma estabilização da velocidade em 384 m/s em profundidades maiores que 3 metros.

5.2. Análise dos Resultados do Ensaio Sísmico 2D - MASW

A **Tabela 4** apresenta a classificação dos materiais em subsuperfície baseado nos parâmetros de velocidade superficiais dos materiais. Essa classificação segue a padronização estabelecida pela *Uniform Building Code Site Classifications* (UBC, 1976) e *Eurocode 8* (EC8, 2011) para velocidades superficiais que alcançam até 30 metros de profundidade ($V_s,30$) (KANLI *et al*, 2006). Os resultados obtidos com o levantamento e processamento do presente trabalho, foram comparados e descritos de acordo com o proposto pela UBC e EC8.

Tabela 4 - Perfis de solo ou classificação de substratos de solo de acordo com o padrão estabelecido pela UBC Site Classifications e EC8 para velocidades superficiais que alcançam até 30m de profundidade ($V_s, 30$) (apresentado por Kanli et al 2006; adaptado de Sêco e Pinto 2002; Dobry et al. 2000; Sabetta & Bommer 2002).

Ground profile (Soil) type (UBC) or Subsoil Class (EC8)	Ground description (UBC)	Description of stratigraphic profile (EC8)	Shear wave velocity V_s^{30} ($m s^{-1}$)
S_A (UBC) S_B (UBC) or A (EC8)	Hard rock Rock	— Rock or other rock-like geological formation, including at most 5m of weaker material at the surface	>1500 (UBC) 760–1500 (UBC) or >800 (EC8)
S_C (UBC) or B (EC8)	Very dense soil and soft rock	Deposits of very dense sand, gravel or very stiff clay, at least several tens of m in thickness, characterized by a gradual increase of mechanical properties with depth	360–760 (UBC) or 360–800 (EC8)
S_D (UBC) or C (EC8)	Stiff soil	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of m.	180–360 (UBC and EC8)
S_E (UBC) or D (EC8)	Soft soil	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil	<180 (UBC and EC8)
S_F (UBC) or E (EC8)	Special soils	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with V_s^{30} values of class C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $V_s^{30} > 800 m s^{-1}$	—
S_1 (EC8)	—	Deposits consisting—or containing a layer at least 10 m thick—of soft clays/silts with high plasticity index ($PI > 40$) and high water content	<100 (EC8)
S_2 (EC8)	—	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in classes A–E or S_1	— (EC8)

Dessa forma, o modelo obtido apresenta três domínios principais representadas pela variação de velocidade das ondas S. A **Figura 24** mostra, separado em domínios ou zonas, a variação de velocidades descritas anteriormente.

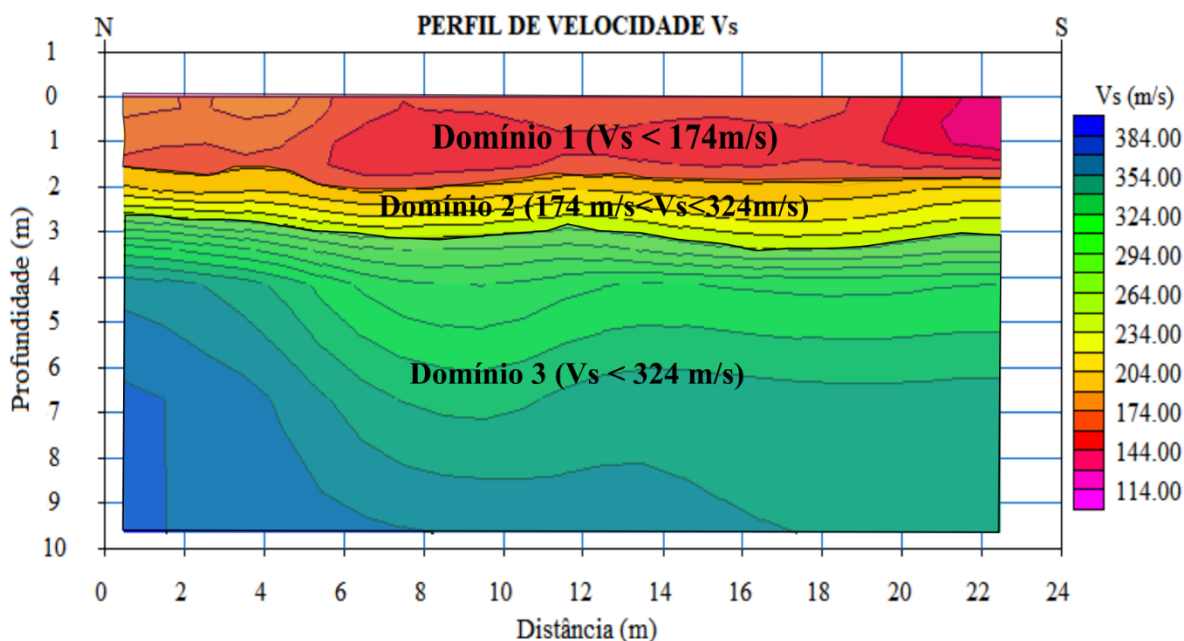


Figura 24 - Domínio ou zonas de velocidade da onda S, obtidos pelo método ativo de MASW.

Ao ser analisado os domínios, em termos de resistência mecânica, e as comparando com os intervalos de velocidade fornecidos pela *UBC* e *EC8*, tem-se um aumento gradual na resistência mecânica do solo na área de estudo apresentada.

Assim, baseado na classificação de velocidade da onda S, pode-se ver que o primeiro domínio apresenta um intervalo de velocidade V_s que varia entre 114 m/s até 174 m/s e, com isso, o solo nessa região é pouco consolidado ou de baixa rigidez, bastante intemperizado. Em seguida, o segundo domínio, com profundidade entre 1,80 e 3 metros, é caracterizado como uma zona de transição entre os níveis de compactação e resistência do solo, saindo do material com menor compactação para uma zona cada vez mais compacta e coesa. As velocidades nessa zona variam entre 174 m/s e 324 m/s.

Nesse intervalo de velocidade, de acordo com o *EC8*, o solo é composto por uma camada mais densa de cascalho, areia e argila (KANLI *et al*, 2006), concordando com as descrições geológicas realizadas por Cuartas (2018), na seção 2.4. Além disso, é no fim dessa zona de transição que se observa em campo uma descontinuidade entre as estruturas rochosas e a composição de solo depositada sobre ela.

Já o terceiro domínio, logo abaixo da descontinuidade, apresenta velocidades acima de 324 m/s e abaixo de 3 metros de profundidade. Ele é caracterizado como a zona com maior compactação e rigidez do substrato, com composição argilosa mais densa e coesa.

5.3. Resultados do Ensaio Sísmico 2D – Sísmica de Refração

Os dados obtidos com o método de Sísmica de Refração possibilitaram a geração de dois modelos para a linha adquirida.

A **Figura 25** apresenta o primeiro modelo de velocidade obtido a partir da refração de ondas P (V_p). Ele consiste em um modelo de duas camadas que indica onde há uma diferença abrupta na velocidade das ondas sísmicas, sendo a primeira com menor velocidade e, a segunda, com a maior (FERNÁNDEZ, 2017).

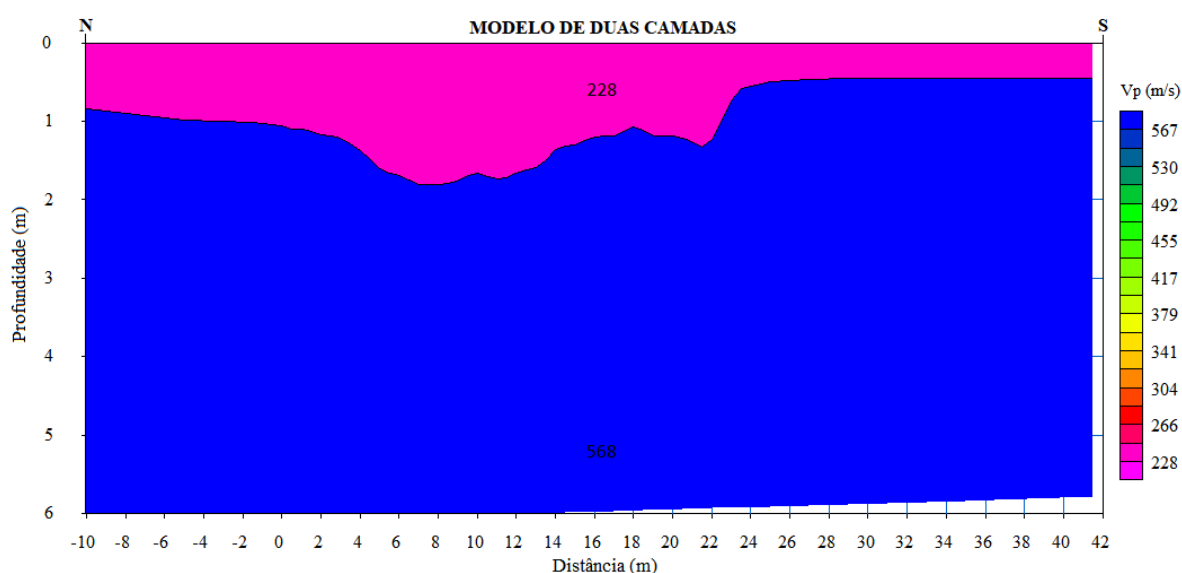


Figura 25 - Modelo de duas camadas adquirida na borda do talude estudado. Os valores indicados representam a velocidade de propagação da onda P no meio em metros por segundo. Perfil com exagero vertical.

A primeira e segunda camada, respectivamente, apresentaram velocidades de 228 m/s e 568 m/s. O valor quadrático médio (RMS), parâmetro que indica o erro durante a inversão dos dados sísmicos, foi de 3,92%, considerado um erro baixo e aceitável.

Esta diferença, evidencia uma interface entre o solo residual maduro e solo residual jovem, ou rocha muito alterada, em uma profundidade entre 0,80 e 2 m. Tendo em vista a profundidade de investigação, verifica-se que esta interface é entre os solos residuais com diferentes graus de intemperismo e consistência.

A **Figura 26** traz o segundo produto gerado por meio de uma modelagem numérica. Neste caso, cria-se um perfil do gradiente de velocidade em função da profundidade. Apesar de ser semelhante ao modelo supracitado, este permite obter uma seção de tomografia da velocidade da onda P na subsuperfície, permitindo interpretar os diferentes substratos.

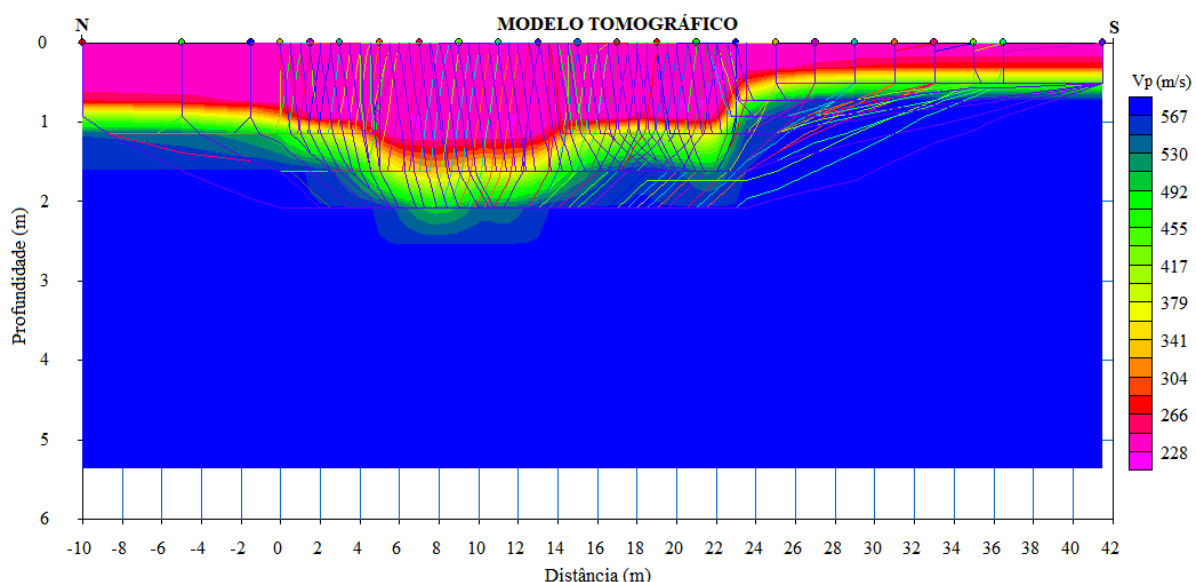


Figura 26 - Tomografia sísmica obtida do modelo de refração. As variações de cores demonstram o gradiente da velocidade em função da profundidade e distância.

Paralelamente, a tomografia sísmica apresentou resultados semelhantes ao modelo de duas camadas, porém, contendo a vantagem de possuir mais informações sobre o aumento da velocidade em função da profundidade. Dessa forma, é perceptível um aumento significativo da velocidade entre 0,80 m e 2 metros de profundidade, e que delimitam, respectivamente, áreas de menor e maior espessuras.

Além disso, é possível definir neste modelo três domínios. O primeiro se caracteriza por uma zona de baixa velocidade (228-266 m/s) com profundidade aproximada variando entre 0,80 e 1,20 metros. O segundo, é definido por um alto gradiente de velocidade entre 1,20 e 2 metros de profundidade e intervalo de 266 à 530 m/s. Finalmente, o terceiro constitui uma estabilização da velocidade (530-567 m/s) abaixo dos 2 metros de profundidade na região mais espessa.

5.4. Análise dos Resultados do Ensaio Sísmico 2D – MASW

Baseado na **Figura 25**, o modelo apresentado permite observar a presença de duas camadas de materiais com forte contraste de velocidade entre elas, sendo a primeira com uma menor velocidade V_p e a segunda com uma maior velocidade. Esse comportamento demonstra, notoriamente, a presença de uma camada de material bem menos compacta nos primeiros metros da seção, seguido de um material mais compacto e coeso.

Souza *et al.* (1998) e Heinz (1974), classificam os substratos rochosos a partir do gradiente de velocidades V_p dos materiais. A **Tabela 5** apresenta uma compilação da classificação apresentada por Souza *et al.* (1998) e Heinz (1974), utilizada para auxiliar na identificação dos materiais em subsuperfície imageados no presente estudo.

Tabela 5 – Intervalos de velocidades da onda P para os substratos rochosos, onde H e S são, respectivamente, as classificações definidas por Souza e Heinz (modificado de SOUZA *et al.*, 1998; KOHNEN, 1974).

Tipo de Materiais	Autor	Intervalo de Velocidade V_p (m/s)
Solo revolvido	H	180-335
Solos, depósitos superficiais de sedimentos não-consolidados	S	200-400
Aterro argiloso (compactado)	H	355-380
Argilas e areias, não consolidadas	S	400-1400
Areias saturadas, argilas compactas, rochas bastante alteradas	S	1400-1800
Sedimentos consolidados e provavelmente saturados, rochas metamórficas ou ígneas, altamente fraturadas e/ou alteradas, arenito e folhelhos	S	1800-2400
Folhelhos, arenitos, rochas ígneas e metamórficas alteradas e/ou fraturadas	S	2400-3700
Rochas ígneas e metamórficas fracamente alteradas e/ou fraturadas	S	3700-4500
Rochas ígneas e metamórficas sãs, não fraturadas	S	4500-6000

Dessa forma, baseado nos resultados observados nas **Figuras 25 e 26**, comparando com as informações da **Tabela 5**, a primeira camada pode ser caracterizada por uma composição de solo superior pouco consolidado, com baixo nível de rigidez, traduzido pelas menores velocidades. A segunda camada é caracterizada por velocidades maiores do que a primeira e indica um grau de compactação mais elevado e coeso logo abaixo do contato.

Pela tomografia sísmica, pode-se ver um gradiente de velocidade com variação entre 266 e 530 m/s, com profundidade aproximada de 80 cm a 2 metros e 50 cm a 1 metro, respectivamente, com aumento gradual da espessura nas posições de 0 a 23 metros, e afinamento da espessura a partir da posição de 23 a 42 metros, no sentido de norte a sul do perfil.

Essa zona caracteriza uma região de transição, configurando um domínio que sofreu alteração e constituído de argilas e areias não consolidados, revolvidos entre si, e que define o início e fim do contato entre o solo e a rocha vista na área de estudos. Khonen (1974) classifica esse intervalo de velocidades como um aterro argiloso com nível elevado de compactação, se aproximando dos aspectos geomecânicos e geológicos descritos no estudo realizado por Cuartas (2018) e citados na seção **2.4, Tabela 3**.

Em suma, a caracterização litológica dos substratos no local de estudos pode ser descrita por zonas de coloração rosa, com velocidade variando de 228 a 266 m/s, e pode ser descrita como um solo argilo arenoso não-consolidado e revolvido, a vermelha (266 a 304 m/s) e amarela (304 a 379 m/s) como um solo argilo arenoso mais rígido e com características de aterro, a zona de cor verde (379 a 530 m/s) como um siltito argiloso mais rígido e a zona de cor azul (530 a 567 m/s) como um siltito argiloso com mais alto nível de compactação.

5.5. Comparação entre os resultados obtidos do MASW e Refração

A **Figura 27** apresenta uma comparação entre os resultados obtidos dos ensaios sísmicos (**Figuras 27b e c**) e a área de interesse geofísica (**Figura 27a**). Ambas as figuras não estão na mesma escala de tamanho, entretanto, utilizando a posição dos geofones, pode-se observar uma correlação entre os dados apresentados.

Ao ser comparado os resultados, o perfil de velocidade que mais se aproxima do que foi observado em campo foi a Sísmica de Refração. A partir dela, pôde-se imagear, aproximadamente, a forma e a profundidade de ocorrência da descontinuidade entre as duas camadas, descrevendo as partes menos e mais espessas. As velocidades de V_p encontradas, descrevem bem a litologia e os materiais em subsuperfície baseado nas classificações de Souza *et al.* (1998) e Heinz (1974), assim como as descrições realizadas por Cuartas (2018).

O MASW, complementar a refração, não conseguiu corresponder a uma forma aproximada, visualmente falando, da descontinuidade como visto nos resultados da sísmica de refração. Entretanto, a camada intermediária ou de transição entre o meio menos compacto e o

mais rígido, em ambos os resultados, são bem próximos um do outro, com profundidades variando entre 80 cm a quase 3 metros ao longo da espessura da camada com menor velocidade, para o caso do MASW, e de 50 cm a 2 metros, para a refração. Nessa mesma área considerada de transição, é onde acredita-se que seja o indicativo do local e posição em profundidade do contato entre camadas.

Embora, ambos os produtos gerados, não apresentaram resultados tão discrepantes ou aquém do esperado. Os perfis de velocidade V_p e V_s obtidos das seções sísmicas, não apresentaram valores tão discrepantes e sim, bem próximos um do outro, com intervalos entre 228 m/s e 567 m/s para os resultados de V_p , e 114 m/s a 384 m/s.

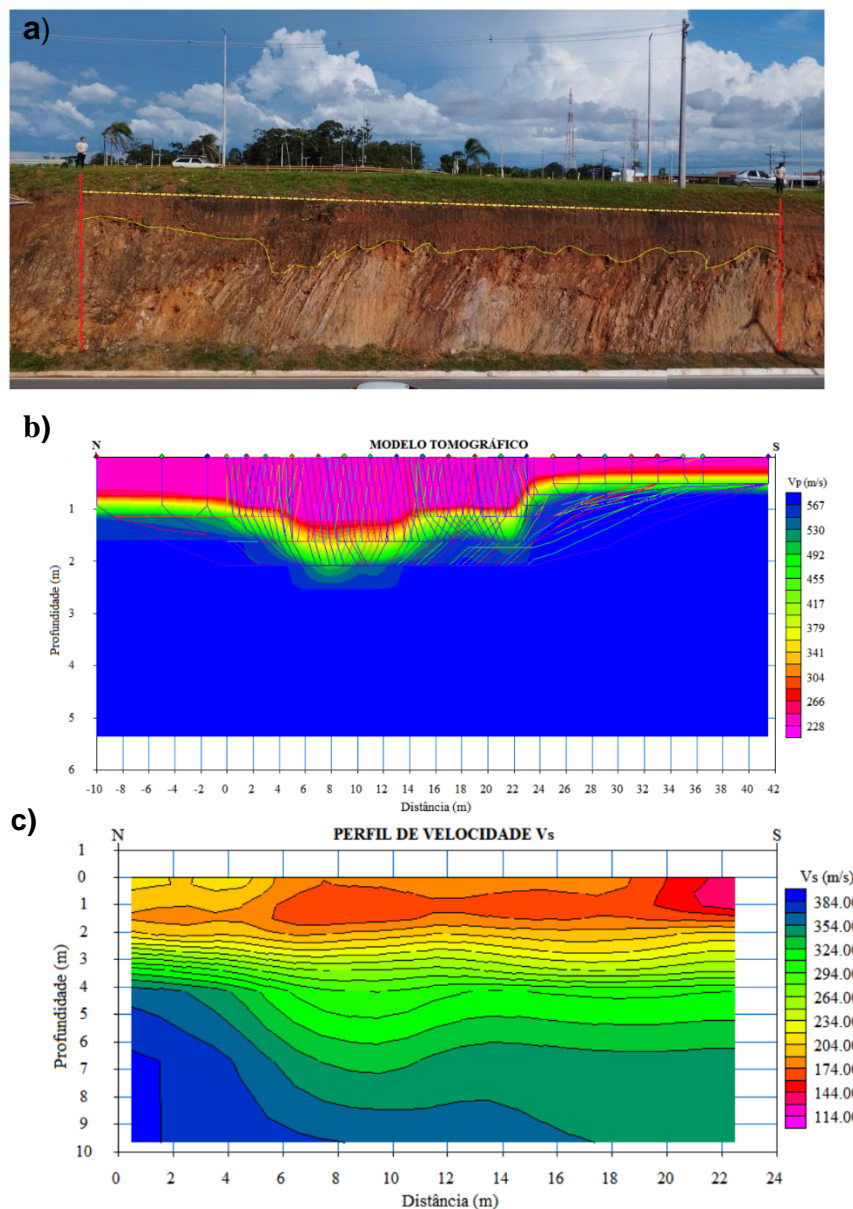


Figura 27 - Comparação entre os resultados obtidos no levantamento, onde **a)** é a descontinuidade observada em campo, **b)** o perfil tomográfico e **c)** o perfil de V_s .

6. CONCLUSÕES

Por meio da aplicação dos métodos geofísicos da Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) e Sísmica de Refração, foi possível obter perfis de velocidade V_p e V_s , de forma que fosse possível correlacioná-los com os parâmetros utilizados na literatura para descrever o grau de compactação das camadas em subsuperfície, bem como delimitar os limites ou contato entre elas.

Assim, com relação aos resultados da sísmica de refração, foi possível obter dois modelos para a seção estudada, sendo um para duas camadas, e o outro, de tomografia sísmica, mostrando um gradiente de velocidades no limite entre as camadas, ambos resultantes da análise de velocidades da onda P.

Para o modelo de duas camadas, foi observado velocidades mais baixas (228 m/s) para a primeira camada, e de 568 m/s, para a segunda. A descontinuidade entre essas camadas resultou, em média, em uma profundidade variando entre 80 cm e 2 metros em relação as zonas com maiores espessuras e de 50 cm a 1 metro, para os limites de menor espessura.

A tomografia sísmica apresentou resultados com mais detalhes do que o modelo entre duas camadas, revelando três domínios de velocidade. O primeiro, com baixas velocidades e com intervalo entre 228 e 266 m/s, o segundo como uma zona de transição e alto gradiente de velocidade com limite no contato entre a segunda camada, indicando ali, a possível posição da descontinuidade.

Além disso, baseado na classificação de Souza *et al.* (1998) e Heinz (1974), pôde-se inferir a composição e os níveis de compactação e rigidez as camadas em profundidade, sendo elas descritas pelo intervalos com velocidade variando de 228 a 266 m/s (limite rosa) e, provavelmente, pode ser um solo argilo arenoso não-consolidado e revolvido; o intervalo de 266 a 304 m/s (em vermelho) e 304 a 379 m/s (em amarelo) como um solo argilo arenoso mais rígido e com características de aterro; velocidades entre 379 e 530 m/s (verde) como um siltito argiloso mais rígido e, por fim, intervalos de V_p entre 530 e 567 m/s como um siltito argiloso com mais alto nível de compactação.

Comparando os resultados da sísmica de refração as características geológicas descritas por Cuartas (2018), obteve-se uma boa aproximação dos limites e da profundidade da descontinuidade observada entre as camadas, como uma boa descrição de composição dos substratos.

O MASW forneceu um perfil com variação de V_s em um intervalo de 129 m/s a 589 m/s, configurando, similarmente a refração, três domínios de velocidade em profundidade. Assim,

baseado na classificação de velocidade da onda S realizado KANLI *et al* (2006), pode-se ver que o primeiro domínio apresenta um intervalo de velocidade de ondas superficiais que varia entre 114 m/s até 174 m/s, caracterizando um solo pouco consolidado ou de baixa rigidez, com alto grau de intemperização.

O segundo domínio, caracterizado como uma zona de transição entre os níveis de compactação do solo, descrevendo um agregado revolvido e com compactação de nível baixo a médio. Percebe-se também que é no fim dessa zona de transição, a descontinuidade litológica entre camadas. O terceiro domínio, logo abaixo da descontinuidade, apresenta velocidades acima de 324 m/s e abaixo de 3 metros de profundidade, com maior grau de compactação e rigidez do substrato.

Ao comparar os resultados obtidos entre a Sísmica de Refração e o MASW, ambos os métodos obtiveram resultados similares em termos de composição litológica e grau de compactação e rigidez. Além disso, foram complementares um ao outro, pois tanto a refração quanto o MASW, conseguiram delimitar em profundidade uma aproximação de onde ocorre o contato visto em campo, pelas zonas de transição entre os níveis de compactação entre as camadas percebidas nos perfis de Vp e Vs. Embora, visualmente falando, a refração teve uma melhor aproximação da forma e profundidade da descontinuidade.

Desse modo, as análises comparativas entre os dois métodos, mostraram o potencial do levantamento geofísico sísmico na definição de perfis geotécnicos, como na detecção e imageamento de descontinuidades litológicas em profundidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. O pré-cambriano do Brasil. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.1984. 501 p.
- AMARAL, Rafaella Resende. Caracterização geológica-geotécnica de Maciços rochosos Marginais à BR 262 entre Pará de Minas e Nova Serrana. 2019. 96. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG), Araxá, 2019.
- BONNEFOY-CLAUDET, S., COTTON, F. & BARD, P. Y. (2006). The Nature of Noise Wavefield and Its Applications for Site Effects Studies: A Literature Review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4): 205-227.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A.; SILVA, F. H. F.; FERREIRA, M. A. C. M. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*, 2013.

- Disponível em: < <http://bjg.siteoficial.ws/2013/n.3/d.pdf>>. Acesso em: 04 de setembro de 2022.
- CAMPOS, J. E. G. & FREITAS-SILVA, F. H. (1998). Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, IEMA/SEMATEC/UnB, Vol. 1, Brasília, DF, 86 p.
- CUARTAS, C. Relatório de análises geomecânicas das rochas aflorantes no Setor Contíguo à entrada de Taquari e no Balão do Colorado (Rodovia EPIA Distrito Federal, Brasília). Brasília, DF, 2018. 26
- CURTIS, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R. & Wapenaar, K. (2006). Seismic Interferometry – Turning Noise into Signal. *The Leading Edge*, 25(9): 1082-1092.
- DOBRY, R. et al., 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra*, 16, 41–67.
- EIKMEIER, C. N. Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.
- FARIA, A. 1995. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança-Alto Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 199 p.
- FERNÁNDEZ, B. P. Caracterização geológico-geotécnica de solos da Asa Sul a partir de métodos de aquisição sísmica, Brasília, Distrito Federal-Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- FERREIRA, B. N. (2018). O Uso de Ondas de Superfície do Ruído Sísmico Cultural e Ambiental para a Detecção de Alvos Rasos. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF. 103 p.
- FICHTNER, A., GUALTIERI, L. & NAKATA, N. (2019). Introduction. N. Nakata; L. Gualtieri & A. Fichtner (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 21-28.
- GEOMETRICS. (2009). SeisImager/SWTM Manual: Windows Software for Analysis of Surface Waves. Geometrics. 214 p.
- GUILDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1984) Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavações. Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª ed. São Paulo, 195p.
- GUIRELI NETTO, L., GANDOLFO, O. C. B., MALAGUTTI FILHO, W. & DOURADO, J. C. (2019). Integração dos Métodos de Sísmica de Refração de Onda S e Análise Multicanal

- de Ondas Superficiais (MASW) em Barragem de Terra. International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef, Rio de Janeiro, Brasil. 5 p.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2.
- HAYASHI, K. e SUZUKI, H. (2004) CMP Cross-Correlation Analysis of Multi-Channel Surface-Wave Data. Exploration Geophysics, 35, 7-13.
- ISRM (1981) Rock Characterization Testing and Monitoring. E.T.Brown, 211 p.
- International Conference of Building Officials. Uniform Building Code. California: International Conference of Building Officials, 1976. 726. Disponível em: < http://structuretech.com/wp-content/uploads/2016/11/UBC_1976.pdf >. Acesso em: 19 de fevereiro de 2023.
- Joint Research Centre. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. Lisboa: JRC Scientific and Technical Reports, 10-11 Feb. 2011. 522. Disponível em: < <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC68411/lbna25204enn.pdf> >. Acesso em: 19 de fevereiro de 2023.
- KANLI, A. I., TILDY, P., PR'ONAY, Z., PINAR, A., and HERMANN, L., 2006, Vs30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey: Geophys. J. Int., 165, 223-235.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I.; tradução MARIA C. M. COELHO. (2013). Geofísica de Exploração. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 438 p.
- KHONEN, H. (1974) The temperature dependence of the seismic waves in ice. Journal of Glaciology, 13(6); 144-147.
- LOPES, Manoel da Conceição. Comportamento geotécnico e mecanismos de rupturas em rochas brandas, Mina Córrego do Sítio. 2006. 125. Rochas – Teses – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- LOWRIE, W. (2007). Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 381 p.
- MAINSANT, G., LAROSE, E., BRONNIMANN, C., JONGMANS, D., MICHOU, C. & JABOYEDOFF, M. (2012). Ambient Seismic Noise Monitoring of a Clay Landslide: Toward Failure Prediction. Journal of Geophysical Research, 117(F01030): 12 p.
- MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; DARDENNE, M. A.; DANNI, J. C. Província Tocantins, setores central e sudeste. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Coord.) O pré-cambriano do Brasil. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.1984. p. 205-264.

- MEIRA, G. S. (2021). Uso de Métodos Sísmicos para Investigação e Monitoramento de Movimentação em Encostas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF (Em Andamento).
- MILSOM, J. & Eriksen (2011). Field Geophysics: The Geological Field Guide Series. Wiley, São Paulo, SP, 232 p.
- MILLER, R.D., XIA, J., PARK, C.B., and IVANOV, J.M., 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock: The Leading Edge, 18, 1392–1396.
- NALAGUTTI FILHO, V. & BRAGA, T.O. - no prelo - A técnica de refração sísmica aplicada a caracterização geotécnica do maciço rochoso da Jazida Cachoeira - Caetitê - BA. (a ser publicado no CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA de ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984.
- NAZARIAN, S., STOKOE, K. H., II, and HUDSON, W. R., 1983. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: Transport. Res. Record, 930, 38–45.
- NETTO, Leonides Guireli; GANDOLFO, Otavio Coaracy Brasil; FILHO, Walter Malagutti e DOURADO, João Carlos. Non-Destructive Investigation on Small Earth Dams using Geophysical Methods: Seismic Surface Wave Multichannel Analysis (MASW) and S-Wave Refraction Seismic Methods. Brazilian Journal of Geophysics (2020) 38(1): 5-19. Disponível em: < <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/2031/1240>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2023.
- NEVES, S.; BORGES, J. F.; CALDEIRA, B.; MOITA, P.; PEDRO, J. e BOAVENTURA, R. Aspectos sobre os métodos de refração sísmica. Geonovas, Lisboa, 2014, v. 28, 2014, ISSN: 0870-7375, 79 – 92.
- NOGUEIRA. P. V. (2014). Integração de Sísmica de Refração e Eletroresistividade para Elaboração de um Modelo 2D do Depósito de Ferro N4WS do Complexo Serra Norte, CarajásPA. Dissertação de Mestrado, IG/UnB, Brasília, DF, 81 p.
- PINTO, Rui de Jesus Lopes. Técnicas de prospeção para o estudo de substrato rochoso: estudo comparativo entre o método de refração sísmica e o ensaio de penetrômetro dinâmico. 2018. 139. Engenharia Geotécnica e Geoambiente. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.
- OJIMA, L. M (1982). Metodologia de Classificação de Maciços Rochosos Aplicável a Túneis. Síntese da tese apresentada ao concurso para especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 100 p.

- OKADA, H. (2003). Geophysical Monograph Series: The Microtremor Survey Method. Society of Exploration Geophysicists, United States of America, USA, 135 p.
- PARK, C. B., Xia, J., and Miller, R. D. (1999). Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64, 800–808.
- REHMAN, F., EL-HADY, S.M., ATEF, A. e HARBI, H.M. (2016). Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology and Site Response Analysis Application to Seismic Microzonation. *Science International (Lahore)*, 28, 2593-2606.
- REYNOLDS, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley-Blackwell, England, UK, 696 p.
- ROCHA, B. R. Emprego do Ensaio SPT Sísmico na Investigação de Solos Tropicais. 116 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- SABETTA, F. & Bommer, J., 2002. Modification of the spectral shapes and subsoil conditions in Eurocode 8, 12th European Conference on Earthquake Engineering, paper ref. 518.
- SÊCO E PINTO, P.S., 2002. Eurocode 8-Design Provisions for Geotechnical Structures. Special Lecture, 3rd Croatian Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference, 2002 Hvar, CD-ROM.
- SHEEHAN, J. R., DOLL, W. E. MANDELL, W. A., 2005. An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. *JEEG*, 10, Issue 1: 21–34.
- SOUZA, L. A. P. & GANDOLFO, O. C. B. (2012). Métodos Geofísicos em Geotecnia e Geologia Ambiental. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2(2012): 9-27.
- SOUZA, L. A. P., SILVA, R. F. & IYOMASA, W. S. (1998). Métodos de Investigação. *Geologia de Engenharia*, A. M. S. Oliveira & S. N. A. Brito (eds.), ABGE, São Paulo, BRA, pp. 163-196.
- STOKOE, K. H., II, WRIGHT, G. W., JAMES, A. B., and JOSE, M. R., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Woods, R. D., Ed., *Geophysical characterization of sites*: Oxford Publ.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 744 p.