

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

KASTELLI PACHECO SPERANDIO

**APLICAÇÃO DO GROUND PENETRATING RADAR NO ESTUDO DE UMA ÁREA
DE RISCO (DESLIZAMENTO) EM BELO HORIZONTE – MG.**

BELO HORIZONTE

2018

KASTELLI PACHECO SPERANDIO

**APLICAÇÃO DO GROUND PENETRATING RADAR NO ESTUDO DE
UMA ÁREA DE RISCO (DESLIZAMENTO) EM BELO HORIZONTE –
MG.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Belo Horizonte, 22 de maio de 2018.

S749a Sperandio, Kastelli Pacheco
Aplicação do Ground Penetrating Radar no estudo de uma área de risco (deslizamento) em Belo Horizonte - MG / Kastelli Pacheco Sperandio – 2018.
109 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.
Bibliografia: f. 93-100.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação. Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Radar de penetração no solo – Belo Horizonte (MG) – Teses.
2. Desastres ambientais – Avaliação de risco – Belo Horizonte (MG) – Teses. 3. Deslizamentos (Geologia) – Belo Horizonte (MG) – Teses. I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 621.3848

KASTELLI PACHECO SPERANDIO

**APLICAÇÃO DO GROUND PENETRATING RADAR NO ESTUDO DE
UMA ÁREA DE RISCO (DESLIZAMENTO) EM BELO HORIZONTE –
MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil, CEFET – MG.

Prof. Dr. Paulo Roberto Antunes Aranha

Instituto de Geociências, UFMG.

Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo

Departamento de Minas e Construção Civil, CEFET-MG/ARAXÁ

Prof. Dr. Remke Leander Van Dam

Departamento de Engenharia Civil, CEFET – MG.

Belo Horizonte, 22 de maio de 2018.

KASTELLI PACHECO SPERANDIO

**APLICAÇÃO DO GROUND PENETRATING RADAR NO ESTUDO DE
UMA ÁREA DE RISCO (DESLIZAMENTO) EM BELO HORIZONTE – MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

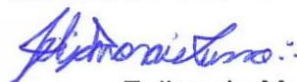


Hersília de Andrade e Santos
Orientadora

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG.



Paulo Roberto Antunes Aranha
Instituto de Geociências, UFMG.



Felipe de Moraes Russo
Departamento de Minas e Construção Civil, CEFET-MG/ARAXÁ.



Remke Leander Van Dam
Departamento de Engenharia Civil, CEFET – MG.

Belo Horizonte, 22 de maio de 2018

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte inesgotável de fé, por ter iluminado meu caminho e ter me dado força e coragem para vencer mais essa etapa. Sei que todas as pessoas que cruzaram meu caminho neste período foram um presente divino e cada uma, de forma única e especial, contribuíram muito para a realização deste trabalho, então preciso agradecê-las.

Agradeço a Professora Hersília pela orientação e incentivo em todos os momentos, que com certeza contribuíram muito para meu crescimento pessoal e profissional. Ao Professor Paulo Aranha por todo suporte, ensinamentos e conselhos. Ao Remke por sua dedicação e atenção para comigo.

Ao Professor André Henrique pelo auxílio primordial durante o levantamento topográfico. Aos demais professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil por cada ensinamento, dentro e fora de sala. Ao CEFET pela infraestrutura oferecida e apoio financeiro.

Um agradecimento mais que especial a toda equipe da Defesa Civil de Belo Horizonte que, desde o primeiro momento, aceitou colaborar com o desenvolvimento da pesquisa. Obrigada por todo o suporte que nos foi dado.

Ao Augusto, Thiago, Guilherme, Tathiana, Frederico e todos aqueles que dedicaram um pouco do seu tempo a me ajudar no que foi preciso.

A cada um dos amigos que fiz em Belo Horizonte e que, com certeza, fizeram a caminhada parecer mais leve. Em especial aos amigos do Mestrado me incentivavam e divertiam diariamente. Foi difícil, mas sem vocês seria impossível! Obrigada de verdade.

Aos amigos de Visconde do Rio Branco e de Juiz de Fora, que sempre entenderam minha ausência, pelo apoio e vibração a cada pequena conquista. A força e vibração positiva de vocês foram essenciais.

Aos meus familiares por todos os mimos e agrados quando eu estava presente, pela preocupação e torcida sem fim. Em especial à pessoa mais maravilhosa que eu já tive o prazer de conviver: minha tia, madrinha e mãe Jacy. Obrigada por cada palavra, cada conselho, cada abraço... Enfim, por TUDO e por TANTO! Espero que esteja orgulhosa.

Aos meus pais e irmão pelo apoio em todos os momentos e por confiarem que eu seria capaz. Obrigada por me encorajarem sempre e se orgulharem de cada passo meu. Vencemos mais uma!

Resumo

Na área da engenharia, conhecer as características e condições do solo é essencial para entender e prever seu comportamento antes e durante a realização de obras, como forma de garantir sua segurança. A definição das características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas do subsolo é fundamental, dentre tantos propósitos, para a compreensão e prevenção de acidentes como deslizamento de encosta. Estas características, juntamente com fatores pluviométricos e ações antrópicas, são consideradas os principais fatores causadores desses acidentes tão presentes em períodos de chuvas intensas e prolongadas no Brasil. Em meio a tantos métodos e equipamentos que surgiram nos últimos anos para caracterizar o subsolo, um tem se destacado por sua eficiência e facilidade de aplicação nas mais diversas situações, o *Ground Penetrating Radar* (GPR). Esta técnica geofísica de investigação, que consiste na transmissão e captação de ondas eletromagnéticas de alta frequência através de antenas localizadas na superfície, obtém imagens de elevada resolução da subsuperfície e apresenta alto potencial para auxiliar na prevenção de acidentes que envolvem deslizamentos de terra. Neste contexto, o presente trabalho utiliza o GPR na caracterização da subsuperfície de uma encosta com histórico e risco contínuo de deslizamento, localizada no município de Belo Horizonte, visando compreender seu comportamento quanto a esse processo. Primeiramente, foram realizados testes preliminares utilizando antenas de 100 MHz e 200 MHz para determinar a frequência da antena a ser utilizada nas investigações subsequentes. Em seguida, foram realizadas teste de configurações do equipamento, análise dos resultados dos ensaios de sondagem a percussão da área e investigações geofísicas de perfis longitudinais e transversais à face do talude. Mesmo com todas as limitações como características do local (solo argiloso, proximidade de objetos geradores de ruído) e problemas nas configurações, foram obtidas informações importantes que podem auxiliar na compreensão dos processos de deslizamento, como prováveis superfícies de ruptura.

Palavras Chave

GPR, área de risco, deslizamento de terra.

Abstract

In engineering, knowing the characteristics and conditions of the soil is essential to understand and predict their behavior before and during the execution of works, as a way to guarantee their safety. The definition of the geological, geotechnical and geomorphological characteristics of the subsoil is fundamental, among many purposes, for the understanding and prevention of accidents such as slope slides, since these characteristics, together with pluviometric factors and anthropic actions, are considered the main causative factors of these accidents present during periods of intense and prolonged rainfall in Brazil. Among the many methods and tools that have emerged in recent years to characterize the subsoil, one has stood out for its efficiency and ease of application in the most diverse situations: the Ground Penetrating Radar (GPR). This geophysical research technique, which involve the transmission and reception of high-frequency electromagnetic waves through antennas located on the surface to obtain high-resolution images of the subsurface, offers great potential to aid in the prevention of landslides accidents. In this context, this work uses GPR for the characterization of a hillside with a history and ongoing risk of slip, located in the city of Belo Horizonte, aiming to understand its behavior. First, preliminary tests using 100 MHz and 200 MHz antennas were conducted to determine the frequency of the antenna to be used in subsequent investigations. Then, tests of equipment configurations, analysis of the results of percussion drilling in the area and geophysical investigations of longitudinal and transverse slope profiles were carried out. Even with limitations such as site characteristics (clayey soil, proximity to noise-generating objects) and configuration problems, important information has been obtained that may aid in the understanding of sliding processes, such as likely rupture surfaces.

Keywords

GPR, risk area, landslide,

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1. Objetivo geral	3
1.1.2. Objetivo específico	3
1.2. Justificativa e relevância	4
1.3. Estrutura do trabalho	6
2. REVISÃO TEÓRICA	7
2.1. Riscos ambientais	7
2.2. Deslizamento de terra	8
2.2.1. Ações antrópicas	10
2.2.2. Chuvas	11
2.3. Deslizamento de terra em Belo Horizonte	12
2.4. Características da área de estudo	15
2.5. Métodos para investigação geotécnica	18
2.5.1. Métodos diretos	18
2.5.2. Métodos indiretos	19
2.6. GPR como método de investigação geotécnica	20
2.6.1. Fundamentos/Princípios	22
2.6.2. Propriedades eletromagnéticas	22
2.6.3. Técnicas de aquisição	24
2.6.4. Parâmetros do equipamento	27
2.7. GPR na análise de terrenos de risco (deslizamento)	29
3. METODOLOGIA	32
3.1. Área de estudo	32
3.2. Contextualização do problema	33
3.3. Procedimentos	37
3.3.1. Ensaio Preliminares	38
3.3.2. Levantamento Topográfico	40
3.3.3. Análise do estudo de sondagem	41
3.3.4. Implementação dos perfis	43
3.3.5. Investigação geofísica	46

3.3.5.1.	Investigação geofísica no período seco.....	47
3.3.5.2.	Teste de configurações de GPR.....	48
3.3.5.3.	Investigação geofísica no período chuvoso.....	48
3.3.5.4.	Processamento de dados	49
3.3.5.5.	Análise dos radargramas	50
4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	Ensaio preliminares.....	51
4.2.	Perfis geotécnicos de sondagem.....	55
4.3.	Investigação geofísica.....	64
4.3.1.	Período seco	64
4.3.2.	Teste de configurações	66
4.3.3.	Período úmido.....	71
5.	DISCUSSÃO.....	87
6.	CONCLUSÃO.....	91
7.	TRABALHOS FUTUROS.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXO A.....	101
	APÊNDICE A.....	102
	APÊNDICE B.....	103

1. INTRODUÇÃO

Conhecer as características e condições do subsolo é essencial na área da engenharia. Através desse conhecimento pode-se entender e prever o comportamento, tanto mecânico quanto hidráulico, da subsuperfície, informações estas que são indispensáveis para garantir a segurança de obras geotécnicas e prever os custos associados a esse tipo de serviço (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Caracterizar o subsolo, definindo suas características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas, é importante, dentre tantas aplicações, por essas informações poderem ser utilizadas em programas de prevenção de desastres naturais como deslizamento de encostas e inundações, tão presentes em períodos de chuvas intensas e prolongadas no Brasil (CARVALHO; GALVÃO, 2006; SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Ainda que as inundações ocorram mais frequentemente, produzam impactos mais significativos na saúde pública e maiores prejuízos econômicos, são os deslizamentos que geram o maior número de vítimas fatais. Embora esses movimentos de terra possam ocorrer naturalmente em qualquer área de elevada declividade, ocasionados pela alta intensidade e duração das chuvas, os mesmos podem ter seu processo acelerado por ações humanas (CARVALHO; GALVÃO, 2006).

Segundo VAN ASCH *et al.* (1999), a frequência, o tipo e o tamanho dos escorregamentos de terra estão diretamente relacionados com as características do solo associadas aos fatores climáticos e ação antrópica. Os altos índices pluviométricos presentes em algumas partes do Brasil, principalmente no verão, favorece a movimentação de terra, uma vez que o solo permanece constantemente encharcado. Além disso, o país ainda enfrenta alguns problemas urbanos como a remoção de grande parte da vegetação natural dos terrenos e ocupação descontrolada das encostas, contribuindo ainda mais com a ocorrência desses acidentes (CARVALHO; GALVÃO, 2006).

Segundo EM – DAT (*Emergency Events Database*), o Brasil é considerado um dos países do mundo mais atingidos por desastres ambientais desse tipo, e esses números vem aumentando significativamente todos os anos, a cada período de chuva mais severo. Alguns autores, como Fernandes *et al.* (2001) e Carvalho e Galvão (2006), consideram esse aumento decorrente do intenso processo de urbanização ocorrido nos últimos anos no país, com o crescimento descontrolado das cidades em direção às regiões periféricas, geralmente áreas com características geológicas e geomorfológicas desfavoráveis, consideradas impróprias para a ocupação. Além disso, esses terrenos quase sempre sofrem alterações

inadequadas como desmatamento, cortes, aterros e construções de moradias sem a implantação da infraestrutura apropriada, aumentando ainda mais os riscos de deslizamento.

A elevada ocupação dessas áreas consideradas de risco por moradias precárias, associadas aos altos índices pluviométricos, aumentam tanto a frequência quanto a magnitude dos acidentes, podendo causar movimentos de terra em níveis catastróficos (CARVALHO; GALVÃO, 2006; TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

Segundo *Kobiyama et al.* (2006), devido a essa variedade de fatores associados, é humanamente impossível evitar que esses processos ocorram. Sendo assim, a adoção de medidas preventivas adequadas nessas áreas se faz pertinente como forma de minimizar os danos e certos prejuízos (TOMINAGA; SANTORO, AMARAL, 2009).

Neste sentido, como forma de reduzir significativamente a ocorrência desses acidentes e minimizar a dimensão de suas consequências, as cidades brasileiras têm implantado, cada vez mais, programas de mapeamento e gerenciamento de áreas de risco como parte obrigatória do seu sistema de gestão de planejamento e desenvolvimento urbano (CARVALHO; GALVÃO, 2006).

Ainda segundo Carvalho e Galvão (2006), o mapeamento e gerenciamento de áreas de risco consistem, basicamente, na realização de trabalho de campo, através de atividades de investigação geológico-geotécnicas do solo, registro dos resultados e posterior análise do que foi coletado. O conhecimento geotécnico da área obtido nesses levantamentos auxilia, então, na tomada de decisões acerca das medidas preventivas necessárias para o local em estudo.

Visto isso, reconhece-se a importância de caracterizar o subsolo e prever seu comportamento nas mais diversas condições, principalmente nas épocas de chuvas intensas que são quando mais acontecem os deslizamentos de terra. A caracterização do subsolo através de investigação geotécnica pode ser dividida, basicamente, em métodos direto e indireto, que serão detalhados no Capítulo 2.

Dentre tantos métodos desenvolvidos para essa finalidade, a geofísica, ciência que realiza essa investigação utilizando conceitos físicos, vem sendo largamente aplicada, uma vez que permite a obtenção das características do solo de forma não destrutível e mais rápida, em áreas e a profundidades maiores. Nesse sentido, entre os principais métodos de investigação geofísica destaca-se a utilização do *Ground Penetrating Radar*, por sua

eficiência em obter imagens da subsuperfície, além da ampla aplicação nas mais diversas situações, como geologia, hidrogeologia, geotecnia, meio ambiente, etc. (ANNAN, 2001).

O Radar de Penetração em Solo, comumente chamado de geo-radar ou GPR, da sigla em inglês, é um método de investigação indireta da subsuperfície realizado através de um equipamento composto por antenas, que transmitem e captam ondas eletromagnéticas, gerando perfis denominados radargramas, que são imagens que representam a subsuperfície ao longo do terreno estudado.

O método GPR vem sendo utilizado internacionalmente desde a década de 20, sendo que, até a década de 60, os estudos eram, basicamente, utilizando ondas de rádio de alta frequência buscando conhecer as feições da subsuperfície. A partir da década de 70, os equipamentos GPR, que antes eram construídos pelos próprios usuários, passaram a ser construídos e comercializados por empresas. Então, a partir da década de 1980, devido à maior disponibilidade de tecnologia e melhor compreensão dos métodos, a utilização de GPR foi intensificada (BORGES, 2007).

A utilização de GPR no Brasil ainda é recente se comparada aos estudos internacionais, tendo sido realizado seus primeiros trabalhos na Região Amazônica, coordenados pelo Prof. William Sauck (SAUCK; ALVES; LUIZ, 1995a, 1995b) junto à Universidade Federal do Pará. A partir disso o método vem ganhando cada vez mais espaço no âmbito da investigação geotécnica e é esta a principal motivação para o desenvolvimento deste projeto, que visa utilizar o GPR como ferramenta para a caracterização da subsuperfície, informação importante para a análise da estabilidade de terrenos de risco.

1.1 Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é compreender o comportamento de uma área com risco de deslizamento através da caracterização da sua subsuperfície empregando de investigações geofísicas GPR.

1.1.2. Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definir a frequência da antena a ser utilizada nas investigações através de ensaios preliminares utilizando antes de diferentes frequências;
- Realizar investigações geofísicas em dois períodos pluviométricos distintos;
- Analisar os resultados dos ensaios de sondagem realizados na área;

- Correlacionar os resultados dos ensaios geofísicos e de sondagem;
- Compreender o comportamento da subsuperfície da área estudada.

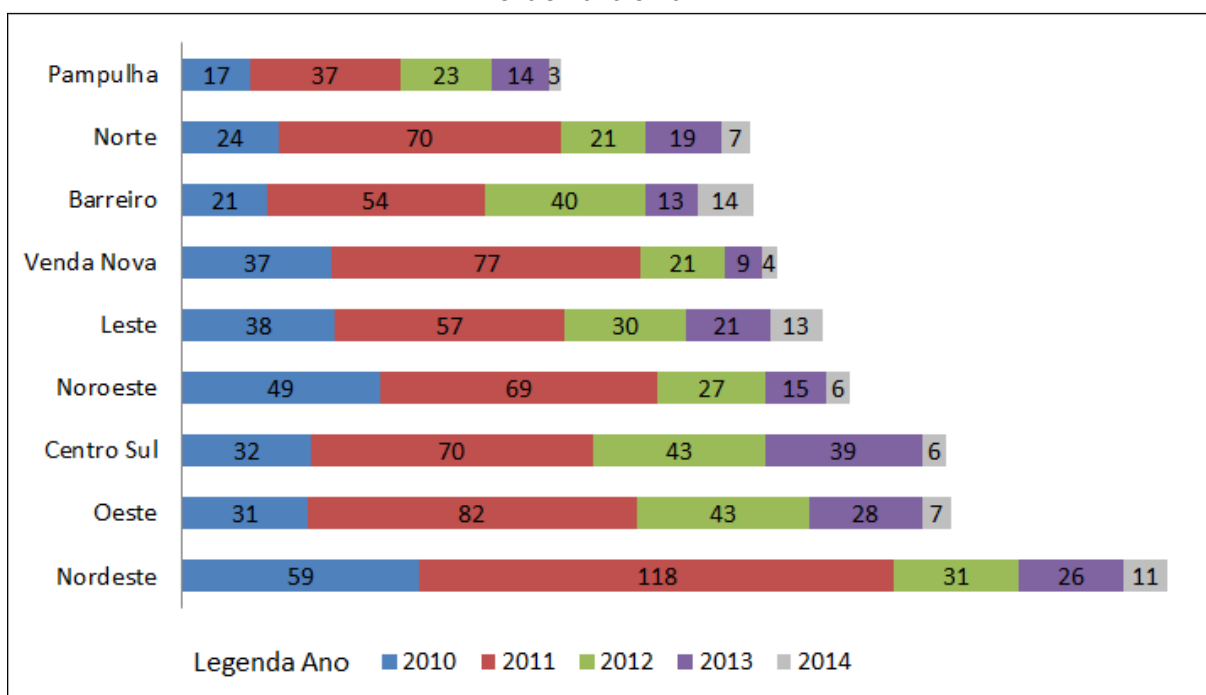
1.2. Justificativa e relevância

Segundo um levantamento realizado pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, os municípios mais vulneráveis à acidentes graves relacionados com deslizamento localizam-se nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste, mais especificamente nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Santa Catarina, Pernambuco, Alagoas e Bahia (CARVALHO; GALVÃO, 2006; KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Belo Horizonte, a capital mineira, é caracterizada pelo denso povoamento, principalmente em morros e encostas, onde as características geológicas e geomorfológicas não são tão favoráveis para ocupação. Além disso, a maioria dessas áreas sofrem, todos os dias, intervenções inadequadas, favorecendo, ainda mais, a ocorrência de deslizamento das mesmas (BITARÃES; NUNES, 2016).

Segundo a Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Belo Horizonte, entre os anos de 2010 e 2014, o município sofreu 1.476 processos de deslizamento de terra, tendo 2011, como o ano, e Nordeste, como a regional, com maior número de ocorrências, conforme representado abaixo (BITARÃES; NUNES, 2016).

Gráfico 1: Distribuição anual e por regionais dos deslizamentos de terra ocorridos em Belo Horizonte entre 2010 e 2014.



Fonte: Bitarães e Nunes (2016).

Tabela 1: Deslizamentos de terra ocorridos em Belo Horizonte entre 2010 e 2014.

TIPO DE EVENTO (2010-2014)	REGIONAIS								
	CS	B	L	O	N	NE	NO	P	VN
Deslizamento de encosta	163	124	135	175	125	215	149	82	137
Escorregamentos ou deslizamentos	27	18	24	16	16	30	17	12	11
Total por regional	190	142	159	191	141	245	166	94	148
Total do município	1476								

Fonte: Bitarães e Nunes (2016).

Pode-se notar que, a partir do ano de 2011, os números de acidentes ambientais deste tipo foram diminuindo consideravelmente. Tal fato é resultante, principalmente, das ações voltadas para estas áreas de risco, como vilas e favelas, desenvolvidas por programas preventivos. Um destes programas implantados na cidade de Belo Horizonte é o Programa Estrutural em Áreas de Risco (PEAR), que tem como objetivo diagnosticar, prevenir, monitorar, controlar e minimizar situações de risco geológico, estruturando e revitalizando estas áreas (URBEL, 2012).

O PEAR foi criado após a realização de um levantamento a cerca das áreas de risco associados a escorregamento, que deu origem ao Diagnóstico da Situação de Risco Geológico das Vilas, Favelas e Conjuntos Habitacionais Populares de Belo Horizonte, com sua primeira versão em 1994. Este diagnóstico que localizou, mapeou e delimitou os lugares em cada um das comunidades que apresentaram situação de instabilidade, foi atualizado nos anos de 2004 e 2009, e tem sua última versão para o ano de 2011.

Embora o PEAR esteja sendo cada vez mais consciente e rigorosamente aplicado na cidade de Belo Horizonte, a análise dos parâmetros ainda é feita de maneira subjetiva, dependendo basicamente da experiência e interpretação do vistoriador. Além disso, as questões de risco são tratadas empiricamente ou apenas de forma qualitativa, uma vez que não existe um banco de dados consistente que forneça parâmetros geotécnicos e geológicos de qualidade capazes de subsidiar as intervenções necessárias no local (PARIZZI, 2004; CAMPOS, 2011).

Esta perspectiva aliada ao fato da última atualização do Diagnóstico da Situação de Risco Geológico das Vilas, Favelas e Conjuntos Habitacionais Populares de Belo Horizonte ter sido realizada em 2011, sobressai a necessidades de novas investigações geotécnicas, com diferentes técnicas, e análise e monitoramento da estabilidade dos terrenos localizados nas áreas consideradas de risco.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos que serão brevemente descritos a seguir. Nesse primeiro capítulo foi apresentada uma introdução sobre o tema do trabalho, bem como seus objetivos, geral e específico, justificativa e relevância, descrevendo a importância da pesquisa.

O capítulo 2, que descreve os principais conceitos e informações importantes sobre o tema e ainda a situação atual do objeto de estudo, abordará os riscos ambientais, com ênfase nos deslizamentos de terra, apresentando suas principais causas, tanto no Brasil quanto em Belo Horizonte, expondo os diversos métodos para a investigação do solo, destacando o potencial que o GPR tem para auxiliar na análise de terrenos sob ameaça de deslizamento.

No capítulo 3 será apresentada a descrição do local de estudo e seu respectivo histórico de problemas. Além disso, será descrito também a realização de cada um dos procedimentos adotados no presente estudo.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados referentes a cada uma das etapas realizadas no presente estudo. No capítulo seguinte apresenta-se a discussão dos resultados obtidos; e, por fim, no último capítulo a conclusão.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Riscos ambientais

O planeta Terra encontra-se em constante transformação. A construção de cidades e, principalmente, o crescimento dos grandes centros urbanos estão ocorrendo, cada vez mais, de forma desordenada. Assim, o meio físico sofre modificações das mais diversas formas, tendo sua dinâmica alterada com a criação ou a aceleração de alguns processos. Muito embora os processos geológicos possam ocorrer naturalmente, as alterações do ambiente provocadas por ações antrópicas podem induzir, acelerar e potencializar estes processos, sendo capaz de causar inúmeros acidentes e desastres que afetam diretamente a vida humana (PARIZZI, 2014).

Diversos autores definiram o termo “risco geológico”. Segundo Cerri (1993), o termo pode ser definido como “situação de perigo, perda ou dano, ao Homem e suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos, induzidos ou não”. De acordo com Ayala Carcedo (1987) é definido como “todo processo, situação ou evento no meio geológico, de origem natural, induzida ou mista, que pode gerar um dano econômico ou social para alguma comunidade e cuja previsão, prevenção ou correção há de se empregar critérios geológicos”. Nota-se entre eles um consenso de que uma situação só pode se considerada de risco se, e somente se, tem potencial para gerar danos à população e/ou a seus bens.

Os riscos geológicos são aqueles que incidem sobre o meio físico, sendo associados aos processos geológicos, e estão geralmente relacionados com a dinâmica terrestre, interna e/ou externa, podendo ser potencializados por outros processos, naturais ou antrópicos. Neste sentido, surge a divisão dos riscos endógenos, aqueles associados a terremotos, tsunamis e atividades vulcânicas, e os riscos exógenos, relacionados com escorregamentos e processos correlatos, erosão, assoreamento, subsidências e colapsos, expansão de solos, entre outros. (CERRI; AMARAL, 1998).

Dentre os principais riscos exógenos presentes no Brasil, destacam-se os deslizamentos de terra que, apesar de não serem os mais frequentes, são os que mais ocasionam perdas de vidas humanas (CERRI; AMARAL, 1998; FERNANDES *et al.*, 2001; CARVALHO; GALVÃO, 2006; PARIZZI, 2014). E não são apenas os grandes acidentes que causam graves prejuízos à população. Segundo Fernandez (1996), nas cidades os pequenos mas frequentes deslizamentos, geralmente não registrados pela imprensa, causam anualmente mais mortes e perdas econômicas que deslizamentos qualificados como catastróficos.

2.2. Deslizamento de terra

Deslizamento pode ser definido como movimento de descida de solo e/ou rocha, em declive, através da ruptura de uma superfície onde a maior parte do material move-se em conjunto, como uma massa coerente ou semicoerente, com pouca deformação interna (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). No presente trabalho serão tratados com definição semelhante à deslizamento de terra os seguintes termos: movimento ou movimentação de terra e de massa, escorregamento.

Sabe-se que deslizamentos de terra ocorrem em todas as partes do mundo, independente das condições climáticas e de terreno, sendo responsáveis por milhares de mortes e prejuízos econômicos todos os anos. Esse tipo de desastre ambiental, que é caracterizado como problema local, pode impactar, tanto social quanto financeiramente, em níveis estaduais e até mesmo nacionais (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Há diversos tipos de movimentos de massa, cada qual com suas características e particularidades. Alguns destes, como rastejo escorregamento translacional ou planar, escorregamento circular ou rotacional e escorregamento em cunha, são considerados comuns no território brasileiro (PARIZZI, 2004).

Augusto Filho (1992) adaptou as classificações convencionais a fim de descrever os movimentos que retratam a dinâmica ambiental brasileira, destacando as principais características do movimento, o material e geometria da encosta, expostos na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos principais grupos de processos de movimento de massa.

Rastejo (Creep)	Queda (Falls)
• Vários planos de deslocamentos (internos); • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes c/ a profundidade; • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; • Geometria indefinida .	• Sem planos de deslocamento. • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado. • Velocidades muito altas (vários m/s). • Material rochoso. • Pequenos a médios volumes. • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. ROLAMENTO DE MATAÇÃO TOMBAMENTOS
Escorregamentos (Slides)	Corridas ou fluxos (Flow)
• Poucos planos de deslocamentos (externos); • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); • Pequenos a grandes volumes de material; • Geometria e materiais variáveis: PLANARES = solos pouco espessos, solos e rochas com planos de fraqueza; CIRCULARES = solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; EM CUNHA = solos e rochas com dois planos de fraqueza.	• Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; • Desenvolvimento ao longo das drenagens; • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); • Mobilização de solo, rocha, detritos e água; • Grandes volumes de material; • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho (1992).

Segundo diversos autores, os principais fatores causadores de escorregamentos são de aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos, vegetação e ação do homem relativa às formas de uso e ocupação do solo (FERNANDES; AMARAL, 1996; AUGUSTO FILHO, 2001; FERNANDES *et al.*, 2001; TOMINAGA, 2007). Geralmente a ocorrência destes movimentos de massa está associada a um destes fatores ou a combinação de dois ou mais deles.

Neste sentido, Cruden e Varnes (1996) dividiu as causas de deslizamentos de terra e seus respectivos fatores contribuintes em quatro classes principais: geológicas, morfológicas, físicas e antrópicas. As causas geológicas abrangem fatores como composição e origem do material presente na área; já as morfológicas levam em consideração a estrutura das encostas e a dinâmica superficial; as causas físicas estão ligadas com as chuvas e intemperismo; enquanto que as antrópicas são toda e qualquer intervenção provocada pelo homem no meio ambiente.

Wieczorek (1996) afirma que os movimentos de massa podem ter diversas causas (geológica, geomorfológica, física e humana), mas apenas um desencadeador, que é definido por estímulo externo que provoca uma resposta imediata gerando a movimentação de massa, seja pelo rápido aumento de tensões no solo ou redução da sua resistência.

O Brasil, por seu clima tropical, caracterizado por altos índices pluviométricos, e ainda pela forma de uso e ocupação do solo realizada muitas vezes de forma inadequada, sofre

frequentemente com a elevada ocorrência de deslizamentos de terra, podendo atingir até níveis catastróficos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

No estado de Santa Catarina, foram 63 municípios em situação de emergência, 14 em estado de calamidade pública, aproximadamente 80 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas e 135 mortas devido às fortes chuvas e consequentes deslizamentos de terra ocorridos nos meses de novembro de 2008 e janeiro de 2009. Tal episódio bloqueou quase todas as estradas da região afetada, causando, além dos danos ambientais, impactos sociais e econômicos (BÃO; GIUDICE, 2014).

Em 2011 o estado do Rio de Janeiro enfrentou a maior catástrofe climática e geotécnica do país, de acordo com Busch e Amorim (2011), sendo também classificada pela ONU como o 8º maior deslizamento ocorrido no mundo nos últimos 100 anos. O acidente que envolveu sete municípios da região Serrana, deixando mais de 900 pessoas mortas e milhares de pessoas desabrigadas. O acidente ocorreu devido à combinação de três fatores: formação geológica da região, construção desordenada e excesso de chuva. As encostas já instabilizadas pelas ações humanas sofreram deslizamento após dois dias de chuvas intensas com precipitação superior à média esperada para todo o mês de janeiro (FRAGA *et al.*, 2015).

Tendo as ações antrópicas como principal causadora e as chuvas como desencadeador da maior parte dos deslizamentos de terra ocorridos no país, tanto de pequenas escalas quanto em níveis catastróficos, estes fatores serão abordados separadamente a seguir.

2.2.1. Ações antrópicas

De acordo com Fernandes e Amaral (1996), as metrópoles brasileiras vêm sofrendo com o alto índice de escorregamentos induzidos pelas ações humanas, como realização de cortes e aterros para implantação de moradias e vias de acesso, desmatamento excessivo, lançamentos de águas servidas e de lixo de forma desordenada e inadequada, gerando uma série de danos.

As principais ações antrópicas causadoras de escorregamentos são remoção demasiada da cobertura vegetal; execução de cortes com relação altura-inclinação inadequadas; execução de aterros mal compactados, com geometria e fundação inadequadas; lançamento e concentração de águas servidas, vazamento na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas; lançamento de lixo e entulho nas encostas; vibrações geradas por tráfego intenso, dentre outros (AGUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998)

As formas de uso e ocupação do solo, frequentemente realizadas de maneira desordenada, vêm provocando inúmeros acidentes em todo país ao longo dos anos. Diversos autores atribuem à ação do homem como um dos principais causadores de escorregamentos, uma vez que é considerado um importante agente modificador da dinâmica natural do relevo e, conseqüentemente, de sua estabilidade. Alguns destes autores são Guidicini; Nieble (1976); IPT (1991); Augusto Filho (1992); Augusto Filho (1995); Carvalho; Hachich (1997); Gusmão Filho (1997); Lara; Marques; Almeida (1997); Sobreira; Fonseca (1999); Herrmann; Pellerin; Saito (2004).

Mesmo com o passar dos anos, estas intervenções continuam sendo realizadas todos os dias em várias partes do país induzindo a ocorrência de deslizamento de terras, responsáveis por inúmeras vítimas fatais além de importantes prejuízos materiais.

2.2.2. Chuvas

O teor de água presente no subsolo influencia diretamente na sua estabilidade, o que justifica o reconhecimento mundial da chuva como um dos principais agentes não antrópicos desencadeadores de movimentos de massa e o principal em regiões de clima tropical como é o caso do Brasil (PARIZZI, 2004).

A pluviosidade foi considerada por Cruden e Varnes (1996) como o componente climático mais importante nos processos de instabilização de encostas e deslizamento de terras. Esses movimentos de massa geralmente estão relacionados com chuvas intensas e duradoras, que podem agir de diversas formas como, por exemplo, na elevação do nível freático do terreno, reduzindo a tensão efetiva e gerando forças de percolação da água; no preenchimento das falhas, fendas e/ou trincas dos materiais localizados na subsuperfície com geração de pressão hidrostáticas; aumento da umidade e, conseqüente, redução da resistência dos solos pela perda de sucção e coesão aparente.

Ao longo dos anos, diversos autores vêm estudando a influência das chuvas na instabilidade de encostas e conseqüente deslizamento de terra. Attewell e Farmer (2012) observaram que teor de umidade do solo é inversamente proporcional às características como sucção e resistência ao cisalhamento, ou seja, quando o conteúdo de umidade de um solo decresce, sua sucção e conseqüentemente sua resistência aumentam significativamente. De um modo geral, o excesso de água presente no solo elimina a sucção preexistente, reduzindo sua coesão, ou seja, um solo saturado é menos coeso que um não saturado, o que favorece o processo de deslizamento de terra.

Ficou constatado nesses estudos que a duração e a intensidade das chuvas têm influência direta nesses casos, de acordo com as características do solo, como permeabilidade e nível de tensão de sucção preexistente. Segundo Whole e Carvalho (1989), quanto mais úmido o solo, maior a velocidade de ocorrência da saturação da superfície e mais rápido a frente de saturação pode avançar no solo. De forma inversa, quanto mais seco o solo, mais difícil será o avanço das condições que podem gerar um movimento de massa.

Tatizana *et al.* (1987) afirmam que a água da chuva altera alguns parâmetros do solo e aumenta a sollicitação externa, mudanças estas que vão evoluindo com o decorrer da chuva. A água infiltrada altera a densidade do solo, aumentando ou diminuindo a coesão aparente. Os autores afirmam que chuvas acumuladas são mais efetivas na preparação do solo ao processo de escorregamento, devido à progressiva redução da resistência ao cisalhamento e aumento das forças sollicitantes.

A correlação entre chuvas e eventos de deslizamento de terra já é bem conhecido devido aos diversos estudos realizados ao longo desses anos. Assim destacam-se alguns autores como Wieczorek (1996); Anagnostopoulos; Georgiadis (1997); Gusmão Filho (1997); Anjos; Cerri; Gandolfi (1997); Galvão; Elshareif; Viana (1999); Feijó; Paes; D'orsi (2001), Parizzi (2004), Santoro *et al.* (2010); Parizzi *et al.* (2010); Bitarães; Nunes (2016) que estudaram e correlacionaram episódios de chuva e deflagração de movimentos de massa de diferentes locais, considerando suas características e peculiaridades.

É preciso ressaltar a importância da tipologia do terreno, granulometria, espessuras das camadas de solo e qualidade do material na influência das chuvas no processo de deslizamento de terra (NUNES *et al.*, 1990). Da mesma forma, destacar a importância das condições geológicas e geomorfológicas das áreas, aliados aos períodos de chuva intensos e prolongados, para a ocorrência de movimentação de massa e processos erosivos (SOBREIRA, 1991).

E assim, ao longo de todos esses anos, quando as chuvas de verão chegam ao país, principalmente as áreas de encostas que são tão inadequadamente modificadas pela ação do homem, os deslizamentos de terra atingem as vidas de milhões de brasileiros que vivem em situações de risco (FRAGA *et al.*, 2015).

2.3. Deslizamento de terra em Belo Horizonte

Deslizamentos de terra ocorrem frequentemente em diversas partes do Brasil, principalmente em períodos chuvosos. De forma semelhante do restante do país, o município de Belo Horizonte, que é caracterizado por possuir morros e encostas

densamente povoados, também vem sofrendo, no decorrer dos anos, com este tipo de acidente (BITARÃES; NUNES, 2016).

Prudente e Reis (2008) realizaram um levantamento de todos os desastres naturais em Belo Horizonte, no período entre 1979 e 2008, considerando os diversos tipos: inundações, erosões, desmoronamento e deslizamento de encostas. Levando em conta especificamente acidentes relacionados à deslizamentos de terra, os anos de 1989 e 1991 foram os mais críticos com, respectivamente, 54 e 102 deslizamentos registrados. Todavia, os autores ressaltam que, como a pesquisa foi elaborada com base nos dados de apenas uma fonte de informação, pode haver alguns desastres não computados, resultando em números não fiéis à realidade.

Em contrapartida, Simões e Reis (2006) analisaram as chuvas intensas ocorridas nas estações chuvosas de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 com relação às áreas de risco de Belo Horizonte. Neste período foram inúmeras ocorrências registradas, tendo Leste e Centro-Sul como as regionais mais afetadas. Foram contabilizados 278 casos de deslizamento de terra, sendo 66 em 2003/2004, 115 em 2004/2005 e 97 em 2005/2006.

De forma semelhante, Rosa Filho e Cortez (2010) listaram alguns dos registros de acidentes associados apenas a escorregamentos de terra no Brasil, entre os anos de 1928 e 2005, e os respectivos óbitos ocorridos. Segundo os autores, neste período houve mais de 3.522 mortes associadas, sendo 1.700 só no acidente ocorrido na Serra das Araras (RJ) em janeiro de 1967. O município de Belo Horizonte foi citado duas vezes, com deslizamentos ocorridos em janeiro e fevereiro de 1992 e dezembro de 1993, causando, respectivamente, 10 e 5 mortes.

Nota-se que há uma divergência entre os registros dos acidentes apresentados nos estudos mencionados anteriormente. Os deslizamentos de terra ocorridos nos anos de 1989 e 1991, como mostraram Prudente e Reis (2008), e nos períodos de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006, segundo Simões e Reis, não são sequer citados por Rosa Filho e Cortez (2010), que consideram apenas alguns acidentes ocorridos em Belo Horizonte, analisando somente o número de óbitos.

Estas diferenças podem estar associadas a alguns fatores. Sabe-se que deslizamentos de terra podem ocorrer em diferentes magnitudes, podendo ser modestos, causando pequenos danos, ou catastróficos, com elevados números de morte. Assim, realizar um levantamento baseado apenas no número de óbitos descarta outros tantos deslizamentos ocorridos, porém de menor intensidade. Além disso, as ocorrências podem, muitas das vezes, não ser

formalmente registradas pelos órgãos competentes uma vez que estão espalhadas por todo município, dificultando sua contabilização, resultando em números menores que a realidade.

De acordo com Parizzi *et al.* (2010), são registrados anualmente em Belo Horizonte, em média, 400 movimentos de massa a cada período chuvoso, causando inúmeros prejuízos econômicos e perda de vidas humanas. Até o ano de 2005, a correlação entre as chuvas e os escorregamentos causados no município era realizada sem muita precisão, uma vez que os pluviômetros utilizados não permitiam o registro da intensidade da chuva e não representavam as taxas pluviométricas de toda área municipal.

A partir de 2006 foram instalados dois pluviógrafos automáticos nas regionais Noroeste e Leste, permitindo a medição, em tempo real, das taxas diárias de chuva e ainda a pluviosidade ocorrida a cada 30 minutos. Através da instalação destes equipamentos ficou comprovado que os índices pluviométricos são desiguais na extensão do município, chegando a apresentar diferenças consideráveis de precipitação. Devido à importância que estas informações têm para o planejamento das estratégias de ações preventivas aos danos provocados pela chuva foram instalados, no ano de 2007, mais de 10 destes equipamentos distribuídos por todas as regionais de Belo Horizonte. Com isso tornou-se possível monitorar detalhadamente os índices pluviométricos e correlacionar com os movimentos de massa ocorridos na cidade (PARIZZI *et al.*, 2010).

Neste sentido, foram monitorados dois períodos chuvosos no município de Belo Horizonte, compreendidos entre setembro de 2006 e fevereiro de 2007 e outubro de 2007 e março de 2008, e os respectivos registros de deslizamentos. No primeiro período foram registradas 434 ocorrências de movimento de massa; já no segundo foram contabilizadas 219 ocorrências, sendo a maior parte delas nas regionais Centro-Sul e Leste, em ambos os períodos. Analisando os eventos pluviométricos e as respectivas ocorrências durante os períodos de estudo, observou-se que inúmeras ocorrências de escorregamento estão associadas, predominantemente, a episódios de chuvas excepcionais e de grande intensidade. Além disso, comprova-se a importância que as condições geológicas e geomorfológicas do terreno para a determinação da susceptibilidade aos movimentos de massa, uma vez que as regionais com mais ocorrências em ambos os períodos analisados são caracterizadas por contemplar terrenos vulneráveis a escorregamentos como filitos alterados e depósitos superficiais como talus, formado por material inconsistente e heterogêneo proveniente de intemperismo, e aterro (PARIZZI *et al.*, 2010).

De forma semelhante, Bitarães e Nunes (2016) também realizaram um estudo com o objetivo de especializar a ocorrência de movimentos de massa em Belo Horizonte através

de levantamento dos eventos nas mídias de comunicação no período de 2010 e 2014. Neste tempo foram registrados 1.476 processos de deslizamento de terra, sendo 308 em 2010, 634 em 2011, 279 em 2012, 184 em 2013 e 71 em 2014. Nordeste (245), Oeste (191), Centro-Sul (190), Noroeste (166), Leste (159), Venda Nova (148), Barreiro (142), Norte (141) e Pampulha (94).

Segundo os autores deste estudo a discrepância existente entre os números de ocorrências registradas pela Defesa Civil e os divulgados pelas mídias de comunicação pode ser explicada por haver uma possível seleção no processo de divulgação. Independente dessa diferença, as regionais com maior ocorrência foram coincidentes, sendo Nordeste, Oeste e Centro-Sul, devido, principalmente pela ocupação em áreas susceptíveis, com declividade acentuada.

Pode-se notar, através dos diversos estudos realizados, que as características geológicas e geomorfológicas e intervenções inadequadas nos terrenos, aliados aos episódios de chuvas intensas e prolongadas, são os principais causadores destes processos de movimentação de massa na cidade (BITARÃES; NUNES, 2016).

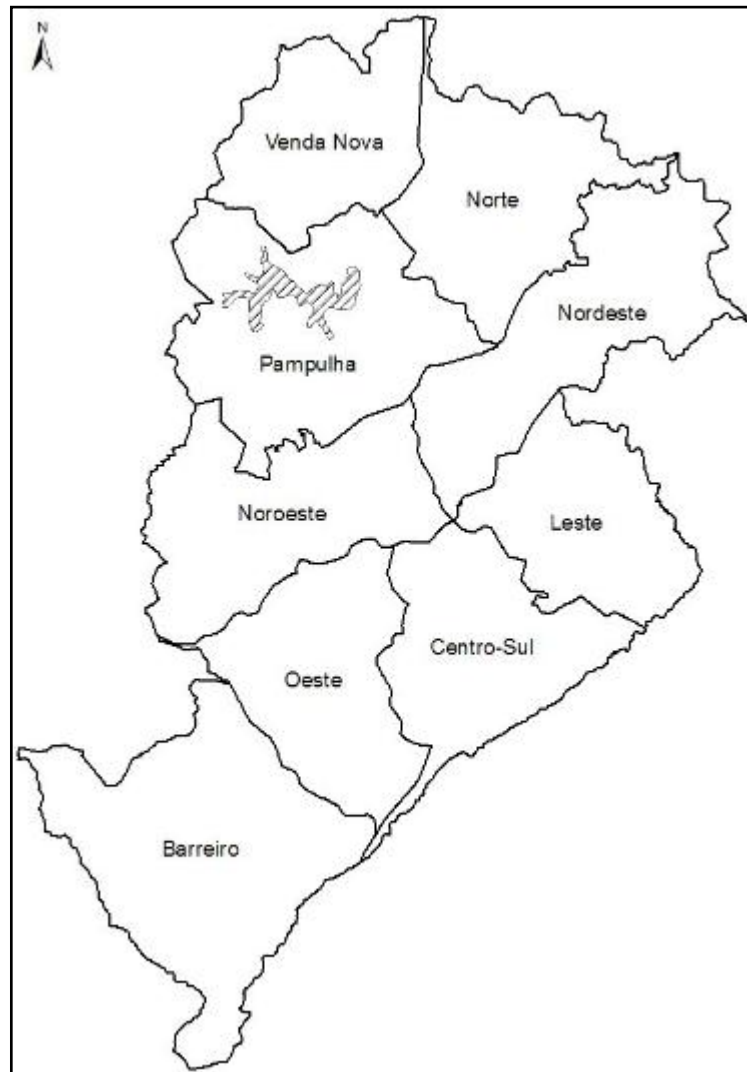
2.4. Características da área de estudo

Projetada para ser a capital mineira, Belo Horizonte foi inaugurada em 12 de dezembro de 1897, sendo chamada de Cidade de Minas até 1901, quando foi finalmente nomeada Belo Horizonte. Tem como municípios limítrofes Vespasiano, Ribeirão das Neves, Contagem, Ibirité, Brumadinho, Nova Lima, Sabará e Santa Luzia (CAMPOS, 2011). Possui uma área de, aproximadamente 331 km², uma população estimada em 2016 pelo IBGE de 2.513.451 habitantes e densidade de 7.594 hab./km².

O município é subdividido em nove regiões administrativas sendo elas Barreiro, Centro-Sul, Leste, Nordeste, Noroeste, Norte, Oeste, Pampulha e Venda Nova, conforme Figura 1, atendendo à necessidade de descentralização e facilidade de coordenação de programas e atividades adequadas às particularidades de cada uma destas regiões (BELO HORIZONTE, 2017).

A cidade possui 209 áreas consideradas de risco entre vilas, favelas e conjuntos habitacionais populares, distribuídas em uma área de 15,02 km² e com população estimada de 366.239 habitantes, sendo responsáveis por 4,5% da área da cidade e 12,63% de sua população. A regional com maior número dessas áreas é a Oeste (35), seguida de Barreiro (30), Nordeste (28), Leste (22), Pampulha e Venda Nova com a mesma quantidade (21), Centro-Sul (19), Noroeste (17) e Norte (16) (URBEL, 2016).

Figura 1: Regiões administrativas de Belo Horizonte.



Fonte: Gestão Compartilhada – PBH.

Sabe-se que os escorregamentos não ocorrem apenas nestas áreas de vilas e favelas, designadas de risco, mas também em bairros considerado nobres, de elevado padrão construtivo (PARIZZI, 2004). Porém, a maior parte dos episódios de deslizamentos de terra está localizada nessas áreas de regiões periféricas justamente pelas características geológicas e geomorfológicas não serem tão favoráveis à ocupação, e, ainda, por serem altamente modificadas de forma inadequada, favorecendo ocorrência dos acidentes. Assim, explica-se o foco dos estudos sobre o tema ser tão grande para essas áreas específicas.

Segundo Parizzi (2004), as características climáticas de Belo Horizonte vêm sofrendo alterações ao longo dos anos, podendo estar associadas tanto a causas naturais, como o aquecimento da atmosfera como um todo, quanto ao rápido processo de urbanização ocorrido na capital mineira. Segundo os dados das Normais Climatológicas do Brasil mais recentes disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia a temperatura média anual

da capital mineira é em torno de 21 °C e pluviosidade média anual em aproximadamente 1.464 mm, tendo junho como o mês mais seco e dezembro como o mais chuvoso, conforme a tabela a seguir.

Tabela 3: Características climáticas de Belo Horizonte.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
T^a média (°C)	22,8	23,0	22,9	21,7	19,6	18,5	18,0	19,7	21,1	21,7	22,2	22,2	21,1
T^a mínima (°C)	18,8	19,0	18,8	17,3	15,0	13,4	13,1	14,4	16,2	17,5	18,2	18,4	16,7
T^a máxima (°C)	28,2	28,8	28,6	27,5	26,0	25,0	24,6	26,5	27,2	27,7	27,5	27,3	27,1
Chuva (mm)	274,1	206,3	142,7	55,8	28,8	11,5	15,3	14,8	39,2	141,7	241,6	292,0	1463,7

Fonte: Cimate-data.org

Diversos autores afirmam que a grande maioria, 88%, total anual de precipitação em Belo Horizonte concentra-se nos meses de outubro a março, sendo que o restante é distribuído entre abril e setembro (ABREU, 1998; MOREIRA, 2002; LUCAS; ABREU, 2004; LUCAS, 2007). Tal fato indica a existência de duas estações bem definidas, uma chuvosa e uma seca, tendo como meses de transição abril e setembro.

No município de Belo Horizonte há uma predominância de solos residuais de gnaisse, xistos, filitos e depósitos de talus. Embora todos os estes materiais sejam sensíveis a escorregamentos de terra, há uma variação de susceptibilidade entre eles, sendo os depósitos em contato com xistos e filitos os mais susceptíveis. (PARIZZI *et al.* 2010).

O relevo de Belo Horizonte está estreitamente vinculado à litologia da região, dominadas por duas unidades geomorfológicas distintas: uma zona rebaixada e uma serrana, denominadas respectivamente por Depressão Belo Horizonte e Quadrilátero Ferrífero. A maior parte do município localiza-se nesta primeira, que é caracterizada por colinas com altitudes entre 800 m e 900 m. Já a zona do Quadrilátero Ferrífero é caracterizada por altitudes superiores a 1.300 m, podendo chegar 1.500 m (PARIZZI, 2004).

Sabe-se que as características da área, como clima, geologia e geomorfologia, influenciam diretamente na ocorrência de processos de deslizamentos de terra. Segundo Parizzi *et al.* (2010), os condicionantes geológicos influenciam no tipo de ruptura, enquanto que as características geomorfológicas, ações antrópicas e da água interferem no grau de predisposição dos terrenos aos movimentos de massa. As chuvas acumuladas geralmente determinam a frequência e o momento de ocorrência desses processos. No caso específico de Belo Horizonte, Silva *et al.* (1995) ressaltam que o fator geológico é fundamental para avaliação das condições de estabilidade de taludes.

2.5. Métodos para investigação geotécnica

Conforme ilustrado anteriormente, conhecer as características e condições do subsolo se torna fundamental para entender e prever seu comportamento em diversas situações, especialmente em épocas de chuva onde os terrenos se tornam mais susceptíveis à acidentes como deslizamentos de terra. Essa caracterização do subsolo através de investigação geotécnica pode ser realizada segundo duas abordagens distintas: métodos diretos e indiretos.

A escolha da abordagem (direta ou indireta) e o respectivo método utilizado dependem de fatores como tipo de informação desejada, tipo de solo, de normas e códigos específicos que devem ser analisados por profissional capacitado, buscando sempre a melhor metodologia para caracterizar o solo em estudo. Deve-se ressaltar a importância e a relevância da realização de investigações diretas sempre que possível, uma vez que são as informações obtidas destes procedimentos que dão suporte e validam os resultados obtidos por investigação indireta (SOUZA, 2006; SOUZA; GANDOLFO, 2013).

2.5.1. Métodos diretos

Os métodos diretos para investigação geotécnica abrangem técnicas que permitem a observação direta do subsolo, seja através da coleta de amostras representativas da área por meio de perfuração ou pela medição direta de propriedades *in situ*, tais como escavações, sondagens e ensaios de campo. Estas amostras coletadas podem ser do tipo deformadas, que são aquelas onde não há preocupação de manter inalteradas a estrutura e as condições de umidade do solo, ou indeformadas, que, ao contrário da anterior, são aquelas com menor alteração possível da sua estrutura natural (QUARESMA *et al.*, 1998).

A amostragem do solo pode ser realizada por meio de diversas técnicas, tais como sondagens à trado, que pode ser manual ou mecanizados; sondagens à percussão SPT (*Standard Penetration Test*) e sondagem rotativa, entre outros.

Dentre essas, uma das mais difundidas e utilizadas em todo mundo, inclusive no Brasil é a sondagem a percussão SPT, principalmente pela sua simplicidade de execução e custo relativamente baixo. Este tipo de ensaio permite conhecer a composição das camadas do solo, através da amostra retirada a cada metro perfurado, obter a resistência oferecida pelo solo à cravação do amostrador padrão a cada metro perfurado e verificar a presença e a profundidade de nível freático no terreno. Além disso, possibilita a utilização da perfuração realizada para a execução de outros tipos de ensaio *in loco* (QUARESMA *et al.*, 1998).

Este ensaio, padronizado pela ABNT através da NBR 6484, consiste basicamente em cravar um amostrador padrão no solo através do impacto de um martelo de ferro de 65 kg em queda livre de uma altura de 75 cm (QUARESMA *et al.*, 1998).

De modo geral, os métodos diretos de investigação geotécnica, inclusive o SPT, têm como vantagens o baixo custo, facilidade e simplicidade de execução e permite a obtenção de parâmetros quantitativos do solo. Como desvantagens, esses métodos de investigação são invasivos, pontuais e oferecem limitação na profundidade de investigação.

2.5.2. Métodos indiretos

Os métodos indiretos contemplam processos onde a determinação das propriedades das camadas do subsolo é realizada indiretamente através da medida de outras grandezas e posterior correlação, incluindo nessa categoria sensoriamento remoto e métodos geofísicos.

Esses métodos têm como principais vantagens a rapidez na obtenção de informações da subsuperfície de grandes áreas, a possibilidade de investigação de elevadas profundidades e obtenção contínua das características do subsolo do local investigado. Como desvantagens, destaca-se o alto custo dos equipamentos e necessidade de mão de obra especializada para realizar esse tipo de investigação.

Nos últimos anos, novos e modernos equipamentos de investigação foram surgindo para auxiliar na caracterização do solo, com o intuito de ampliar o uso das mais diversas tecnologias a diferentes condições de subsolo (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Dentre tantos métodos desenvolvidos para essa finalidade, há aqueles fundamentados nos conceitos de geofísica, que é definido por Orellana (1972) como *“ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização de materiais delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando, para esta finalidade, medidas tomadas na superfície da terra ou da água, no interior de furos de sondagens ou em levantamentos aéreos”*.

As propriedades físicas dos materiais referidas por Orellana (1972) são velocidade de propagação das ondas, resistividade e condutividade elétrica, densidade, potencial elétrico natural, suscetibilidade magnética, entre outras. Ao detectarem os contrastes entre as propriedades físicas dos materiais constituintes do subsolo, os métodos geofísicos proporcionam a avaliação qualitativa e até quantitativa, em alguns casos, da natureza dos terrenos investigados (SOUZA; GANDOLFO, 2013). Isto é possível porque estas propriedades estão diretamente relacionadas com algumas características geológico-geotécnicas do subsolo (SOUZA, 2006).

Sendo assim, a geofísica se tornou uma importante aliada nos processos de caracterização da subsuperfície, permitindo determinar, por exemplo, o grau de alteração, a presença de estruturas geológicas, a espessura das camadas sedimentares, a identificação de contatos geológicos, entre outros (SOUZA; GANDOLFO, 2013).

Os métodos geofísicos se destacam dos ditos convencionais basicamente por permitir a observação contínua da superfície e subsuperfície de fundo ao longo de um perfil, ao contrário dos métodos convencionais que constituem métodos de investigação comumente pontuais; tornar viável a rápida caracterização de grandes áreas; ser um método não destrutivo, ou seja, as observações realizadas não causam qualquer dano ao ambiente investigado; e, dependendo do equipamento utilizado, permitir a caracterização a grandes profundidades (SOUZA, 2006; BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2010; SOUZA; GANDOLFO, 2013).

Em meio à vasta quantidade de métodos geofísicos existentes, cada qual com sua metodologia, parâmetro físico envolvido e informações obtidas, os mais comumente aplicados a questões ambientais são o georadar (GPR), eletrorresistividade (ER), eletromagnético indutivo (IM) e magnetometria.

Nesta perspectiva, dentre os mais empregados, destaca-se a utilização do GPR (*Ground Penetrating Radar*), principalmente por sua eficiência em obter imagens de elevada resolução da subsuperfície e obtenção de um grande volume de dados em espaço relativamente curto de tempo (ANNAN, 2002). Devido à sua versatilidade, vem sendo largamente aplicado em estudos ambientais e, ainda, em outras áreas como geologia, hidrogeologia e geotecnia (DAVIS; ANNAN, 1989; ANNAN, 2001).

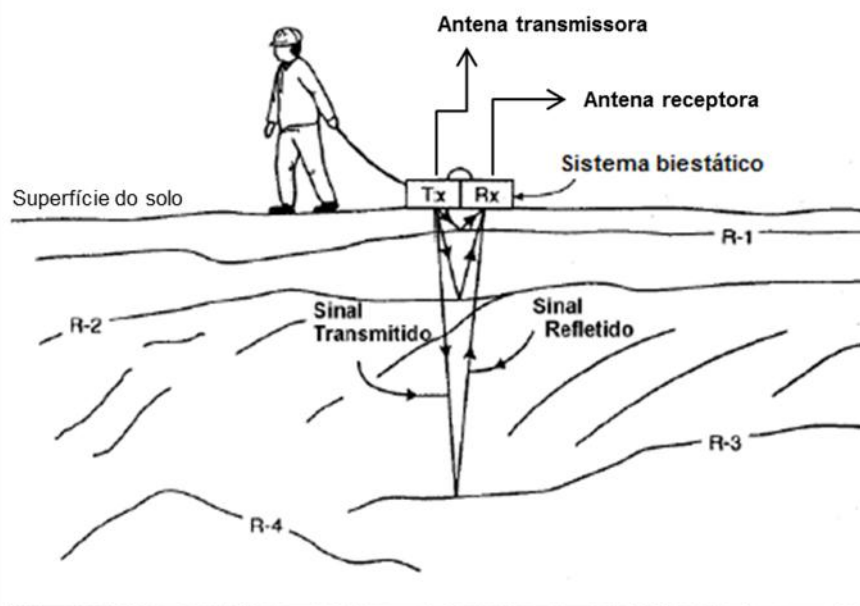
2.6. GPR como método de investigação geotécnica

O GPR é um método de investigação geofísica por meio de ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2.500 MHz, que permite a caracterização da subsuperfície, através da identificação das estruturas e feições do subsolo, e a localização de objetos enterrados pelo homem (DANIELS, 1989; ANNAN, 2001).

O equipamento é composto por antenas transmissoras (Tx) e receptoras (Rx) posicionadas na superfície, que emitem e captam, respectivamente, as ondas eletromagnéticas emitidas através de pulsos para dentro do subsolo. Durante a propagação, parte do sinal emitido sofre reflexão quando atinge um objeto ou a interface entre materiais de diferentes propriedades dielétricas, retornando à superfície onde é captado pela antena receptora, sendo registrado e armazenado. Já a outra parte é transmitida, propagando-se até alcançar

outras interfaces ou dissipar-se completamente no meio (DAVIS; ANNAN, 1989), conforme esquematizado na Figura 2.

Figura 2: Sistema de GPR padrão e seus princípios de medição com quatro refletores (R1 até R4) no subsolo.



Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

Os constituintes básicos do sistema GPR são, além do par de antenas de transmissão e recepção, uma central de controle, que gera o sinal do GPR e também os recebe após a passagem pelo solo, e por um computador portátil, que controla todo o sistema e armazena os dados obtidos na investigação. Além desses, pode-se utilizar de uma roda acoplada nas antenas que auxiliam na capacitação dos perfis fornecendo medidas de distância de forma precisa (REYNOLDS, 1997; SOUZA, 2006; LUDWIG *et al.*, 2011).

Os sistemas de GPR podem ser monoestáticos, onde a mesma antena é utilizada para transmissão e recepção do sinal, ou biestáticos, onde se faz a utilização de duas antenas, muito embora estas possam constituir um único módulo (ANNAN, 2001).

Alguns fatores podem afetar o sinal do radar, como as condições físicas do local de estudo, que podem conter alvos de interferência física como construções, carros, árvores, além daqueles de interferência magnéticas, como redes de distribuição de energia elétrica, geradores, entre outros (POPINI, 2001; BORGES, 2007). Como forma de diminuir a interferência dos ruídos gerados por estes fatores na obtenção dos dados, é interessante que utilizar de antenas blindadas. Além das condições físicas do local de estudo, outras condições como condutividade do meio também podem interferir na investigação com GPR.

2.6.1.Fundamentos/Princípios

O sistema GPR é especificado pela frequência central (f_c) da antena utilizada. A profundidade de penetração da onda eletromagnética em subsuperfície depende diretamente dessa frequência central.

De forma genérica, altas frequências garantem alta resolução, porém baixa profundidade de penetração; enquanto que as baixas frequências tem capacidade de maiores profundidade de penetração, mas em baixa resolução vertical. Sendo assim, deve-se ter um objetivo muito definido de modo que a escolha da frequência de operação forneça a relação mais vantajosa entre penetração e resolução (DAVIS; ANNAN, 1989; POPINI, 2001; IPT, 2012).

Além da frequência central, a profundidade de penetração também é altamente dependente das características do solo. Como o equipamento é sensível a contrastes, quanto maior a diferença entre essas características dos meios atravessados, mais intensa será a amplitude do sinal refletivo (SOUZA, 2006; IPT, 2012). Estas características que influenciam diretamente na propagação de ondas do GPR podem ser quantificadas pelas suas propriedades eletromagnéticas.

A profundidade de penetração da onda em investigações utilizando o GPR pode descrita pela Equação 1:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \omega}} \quad \text{EQ. 1}$$

Onde:

δ = alcance das ondas eletromagnéticas [m];

σ = condutividade elétrica [S/m];

μ = permeabilidade magnética [H/m];

ω = frequência angular = $2\pi f$ [rad/s]

2.6.2.Propriedades eletromagnéticas

Os parâmetros eletromagnéticos constitutivos de um material são a condutividade elétrica (σ), permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), sendo que a variação desta última, em geral, não é significativa quando são feitas medições eletromagnéticas na Terra (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987). Assim sendo, normalmente, apenas as duas primeiras (condutividade e permissividade elétrica) interferem diretamente nas investigações geofísicas de GPR (DAVIS; ANNAN, 1989).

Condutividade elétrica (σ) pode ser definida como habilidade ou capacidade de um material em conduzir corrente elétrica, em geral, expressa S/m. Esse parâmetro tem como inverso a resistividade elétrica (ρ) e pode variar até 20 ordens de magnitude para materiais geológicos (KELLER, 1987).

Já a permissividade elétrica (ϵ) poder ser entendida como habilidade de um material se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado e, conseqüentemente, cancelar parte do campo dentro do material, isto é, capacidade de um material em armazenar corrente elétrica. Esta propriedade é expressa em F/m, porém usualmente utiliza-se a constante dielétrica (K) ou a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), razão entre permissividade dielétrica do material e do vácuo, que é uma grandeza adimensional.

A forma com que a onda eletromagnética se propaga no meio, descrita pela atenuação (α) e velocidade de propagação (v), está diretamente relacionado com estes parâmetros (condutividade e permissividade elétrica), que pode ser descrita pelas Equações 2 e 3.

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad \text{EQ. 2}$$

Onde:

v = velocidade de propagação da onda [m/ns];

c = velocidade da luz = $2,997 \times 10^8$ m/s $\cong$ 0,3 m/ns;

K = constante dielétrica do meio.

$$\alpha = 1,64 \frac{\sigma}{\sqrt{K}} \quad \text{EQ. 3}$$

Onde:

α = atenuação da onda [dB/m];

σ = condutividade elétrica do meio;

K = constante dielétrica do meio.

A Tabela 5 mostra essa relação entre condutividade elétrica (σ), atenuação (α), constante dielétrica (K), velocidade (V) das ondas eletromagnéticas em diferentes materiais.

Tabela 4: Valores típicos de condutividade elétrica, atenuação, constante dielétrica e velocidade.

MATERIAL	σ (mS/m)	α (dB/m)	K	V (m/ns)
Água destilada	0,01	2×10^{-3}	80	0,033
Água do mar	3×10^4	103	80	0,01
Água potável	0,5	0,1	80	0,033
Ar	0	0	1	0,30
Areia saturada	0,1-1	0,03-0,3	20-30	0,06
Areia seca	0,01	0,01	3-5	0,15
Argilas	2-1000	1-300	5-40	0,06
Gelo	0,01	0,01	3-4	0,16
Granito	0,01-1	0,01-1	4-6	0,13
Rocha calcárea	0,5-2	0,4-1	4-8	0,12
Sal seco	0,01-1	0,01-1	5-6	0,13
Siltes	1-100	1-100	5-30	0,07
Xistos	1-100	1-100	5-15	0,09

Fonte: Adaptado de Annan (2001).

Segundo Annan (1992), estas propriedades dos materiais dependem basicamente da sua composição e umidade, sendo que os principais fatores que podem afetar estas propriedades nos materiais geológicos são teor de umidade, porosidade, salinidade, proporção da fração de argila, presença de materiais condutivos, entre outros. Nos materiais geológicos, a presença de água é um dos importantes fatores determinantes das propriedades eletromagnéticas. Conforme pode ser observado na Tabela 5, um mesmo tipo de material quando saturado possui propriedades eletromagnéticas diferentes se comparado à sua condição seca.

Tabela 5: Comparação de materiais nas condições seca e saturada.

MATERIAL	σ (mS/m)	K	v (m/ns)
Areia Seca	0,01	2-6	0,1-0,2
Areia Saturada	0,1-1	20-30	0,05-0,07
Solo Arenoso Seco	0,15	2,6	0,18
Solo Arenoso Saturado	6,9	25	0,06
Solo Argiloso Seco	0,27	2,4	0,19
Solo Argiloso Saturado	50	15	0,04

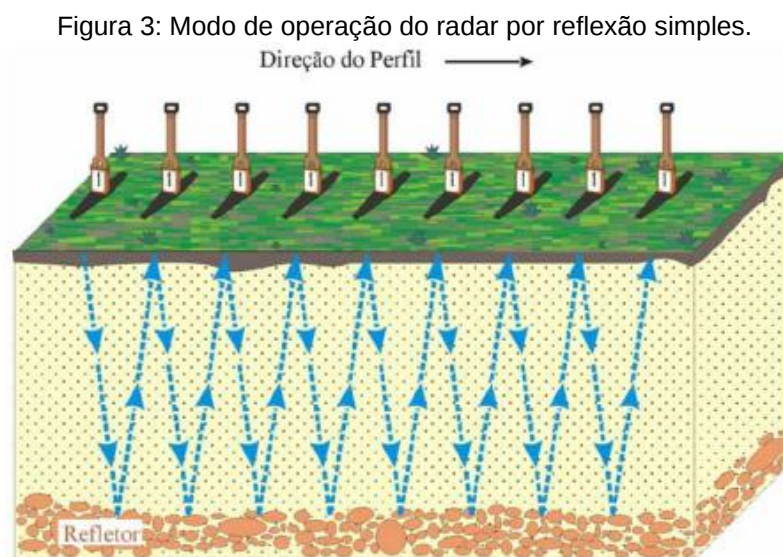
Fonte: Adaptado de Davis e Annan (1989); Daniels (2004).

2.6.3. Técnicas de aquisição

Segundo Davis e Annan (1989), as técnicas de aquisição de dados através do sistema de GPR pode ser basicamente de três maneiras: reflexão simples, sondagens de velocidade (CMP - *Common Midpoint* – e WARR - *Wide Angle Reflection and Refraction*) e transiluminação ou tomografia.

A reflexão simples é caracterizada por utilizar duas antenas, uma transmissora e outra receptora, separadas por uma distância constante, conduzidas ao longo do perfil de estudo

a intervalos fixos e repetitivos, buscando imagear as reflexões causadas pelas mudanças nas propriedades elétricas do subsolo (Figura 3).

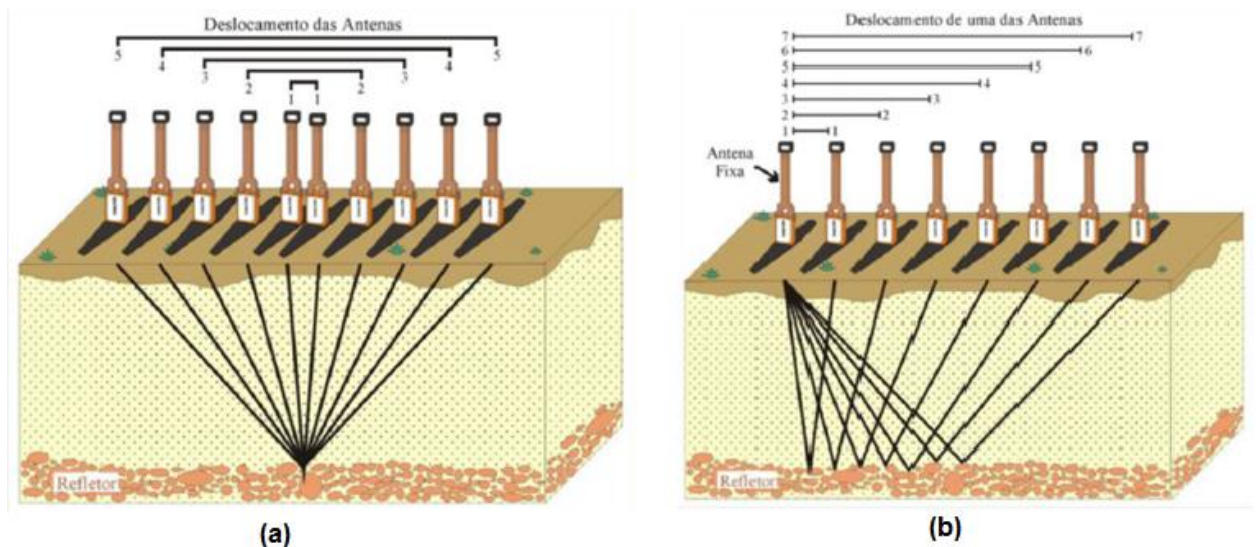


Fonte: Borges (2002).

Os perfis de reflexão resultantes, denominados radargramas, tem como eixo horizontal a posição das antenas e eixo vertical o tempo duplo de reflexão do sinal de GPR (DAVIS, ANNAN, 1989).

Nas sondagens de velocidade, que podem ser pelo método do ponto médio comum, chamado de CMP ou pelo método de reflexão e refração de alto ângulo, o WARR, um mesmo ponto ou área é registrado diversas vezes, com diferentes distâncias entre as antenas transmissora e receptora (DUARTE, 2003). Na técnica CMP a abertura entre as antenas é crescente e em sentidos opostos, partindo de um ponto central fixo (Figura 4a); enquanto que na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto que a outra é sucessivamente afastada da primeira (Figura 4b) (DAVIS; ANNAN, 1989).

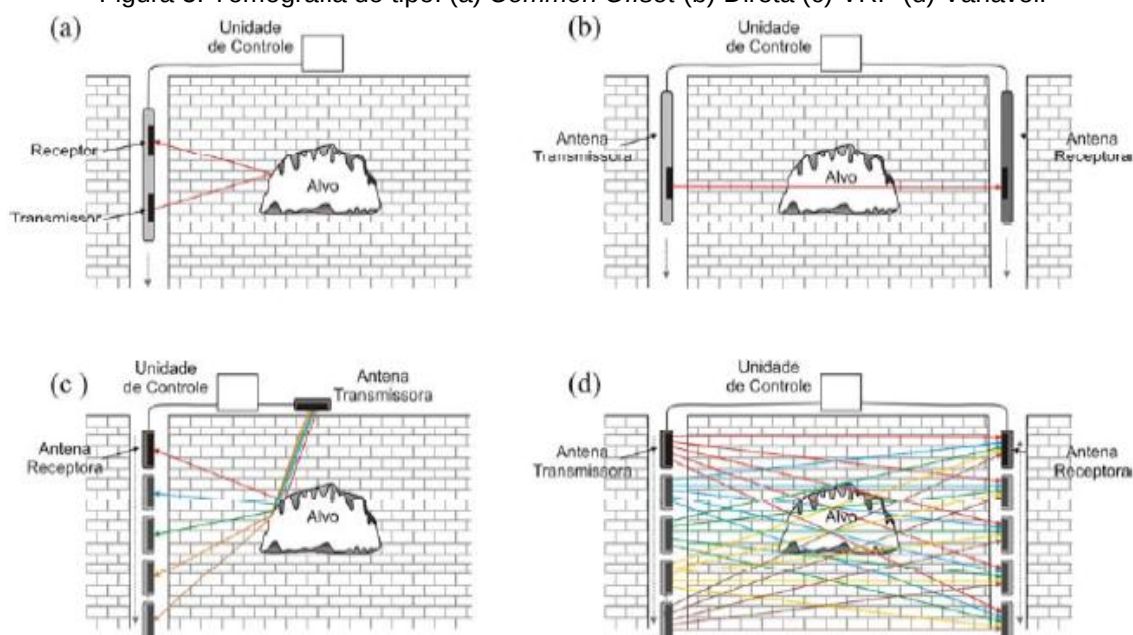
Figura 4: Modo de operação do radar através da técnica (a) CMP, (b) WARR.



Fonte: Borges (2002).

A técnica de transiluminação ou tomografia, diferentemente das anteriores, são técnicas invasivas, ou seja, o equipamento não é utilizado na superfície e sim dentro de poços verticais. Existem quatro modos diferentes de aquisição: *Common Offset*, direta, *Vertical Radar Profiling* – VRP e variável (Figura 5). Na primeira, as antenas são manuseadas dentro de um mesmo poço e o registro é semelhante à técnica de reflexão, porém aqui a antena está registrando toda a seção radial do poço; enquanto que na segunda as antenas, transmissora e receptora, são dispostas em lados opostos do meio investigado, caracterizando uma seção de tempo de trânsito direto, e não mais de tempo duplo. Na técnica VRP, a antena transmissora fica na superfície, enquanto que a receptora é deslocada continuamente dentro do poço. A tomografia variável consiste em dispor as antenas dentro de poços distintos, permanecendo com uma para, enquanto a outra é deslocada. O procedimento é realizado inúmeras vezes, até a área desejada ser totalmente investigada (REYNOLDS, 1997).

Figura 5: Tomografia do tipo: (a) *Common Offset* (b) Direta (c) VRP (d) Variável.



Fonte: Borges (2007).

O modo mais usual de aquisição de dados com o GPR é o de reflexão simples, também conhecido como *CommonOffset*, já detalhado anteriormente, onde as antenas utilizadas no levantamento estão a uma distância constante. Contudo, a definição da técnica utilizada na investigação, bem como frequência central da antena, depende basicamente dos objetivos dos estudos: deve-se optar pela técnica que apresentar maior facilidade em atingi-los.

2.6.4. Parâmetros do equipamento

Antes de iniciar o levantamento com o GPR, alguns parâmetros devem ser definidos e/ou ajustados no equipamento de modo a obter resultados satisfatórios. Segundo Annan (1992), os principais parâmetros são frequência central da antena, janela de tempo, amostras, taxa de transmissão das ondas. Além destas configurações, outras definições como orientação das antenas e o espaçamento entre elas também são consideradas importantes.

A frequência central da antena, conforme já mencionado anteriormente, tem relação direta tanto com a profundidade de penetração da onda quanto a resolução vertical. De forma geral, antenas com frequências altas resultam em menores profundidades de penetração boas resoluções, enquanto que as antenas de frequência mais baixas permitem a onda penetrar mais profundamente, porém com baixa resolução. Sendo assim, a definição da frequência central da antena deve contemplar o equilíbrio entre resolução e profundidade.

A definição da janela de tempo (*time window*) utilizada, expressa em nanosegundos (ns), deve ser baseada na máxima profundidade de penetração pretendida e nas propriedades elétricas do meio, de modo que a amostragem do sinal seja suficiente para as ondas se propagarem de volta após encontrar um refletor e ser captada pelo sistema. Janelas de tempo maiores permitem mais tempo para a onda penetrar mais profundamente, porém se forem excessivamente longas podem comprometer, desnecessariamente, parte da memória do computador; enquanto que janelas curtas podem fazer com que o sistema interrompa a aquisição de dados antes que as reflexões sejam captadas pela antena recepto, prejudicando a aquisição dos dados. Este parâmetro muitas vezes também é mencionado como alcance ou *range*.

O parâmetro amostras (*scans*) é o número de pontos de dados individuais constituintes da curva de digitalização. Quanto maior o número de amostras, mais suave será a junção destes pontos para a formação desta curva e melhor a resolução vertical dos dados coletados.

A taxa de transmissão de ondas, que pode ser utilizada em unidade de tempo (s) ou unidade de distância (m) dependendo do modo de aquisição dos dados, é um parâmetro que está diretamente relacionado com a resolução horizontal. De modo geral, quanto maior o valor desta taxa, mais espaçada será a amostragem resultando em dados com menor resolução horizontal. Para o primeiro modo (tempo), a densidade dos dados coletados em uma área depende da velocidade com que a antena é movida sobre o solo: para uma mesma taxa, quanto maior a velocidade do equipamento, menor a amostragem e menor a resolução horizontal. O modo distância, que utiliza a roda como equipamento auxiliar, onde o sistema registra certo número de amostras a cada unidade de distância percorrida, é o mais preciso e, por isso, o mais recomendável.

As antenas utilizadas no levantamento podem estar orientadas de diversas maneiras: em linha, paralelamente, perpendicularmente, entre outras. O mais usual é realizar levantamentos com ambas as antenas perpendiculares à direção do perfil, uma vez que dessa forma o sinal é irradiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil, maximizando o trabalho.

Quando se utiliza de antenas com unidades diferentes para transmissão e captação do sinal para realizar o levantamento, a definição do espaçamento entre elas deve ser baseada no objetivo do estudo. Esta distância entre as antenas pode ser as mais variadas, sendo possível utilizar espaçamentos diferentes com a mesma antena. Deve-se adotar um

espaçamento mínimo correspondente à metade do comprimento de onda da frequência central da antena.

A partir de tudo que foi exposto, nota-se que deve haver um planejamento minucioso das estratégias a serem utilizadas no levantamento sempre de acordo com os interesses no imageamento que se deseja obter. O objetivo do trabalho deve estar muito bem definido de modo a guiar na definição de todos os parâmetros importantes na obtenção de dados, garantindo bons resultados.

2.7. GPR na análise de terrenos de risco (deslizamento)

Conforme já apresentado, os deslizamentos e movimentação de massa são influenciados por alguns fatores relacionados tanto às características intrínsecas ao terreno quanto à processos externos, como chuvas e ações antrópicas. As propriedades do solo, em especial, como sua tipologia, granulometria, resistência, condições geológicas e geomorfológicas, entre outras, são de suma importância para a interpretação de acidentes já ocorridos, podendo também auxiliar na prevenção de deslizamentos futuros.

A caracterização do solo pode ser realizada através de métodos diretos, com amostragem de solo e ensaios, e indiretos, onde as propriedades são conhecidas através do método de correlação. Estes últimos, que incluem os métodos de investigação geofísica, vêm sendo cada vez mais utilizados em diversas aplicações, principalmente, por permitirem rápidas caracterizações, de grandes áreas e em, alguns casos, elevadas profundidades. Porém, deve-se ressaltar que os levantamentos geofísicos não dispensam, onde for possível, a realização de investigações diretas, já que as informações ali obtidas validam e auxiliam na interpretação dos dados geofísicos.

O GPR é um método relativamente novo quando comparado com as demais metodologias geofísicas, tendo suas primeiras aplicações na década de 1920. Até a década de 50 a metodologia ficou parada, sendo retomada posteriormente e, a partir da década de 70, teve sua utilização intensificada. Com o desenvolvimento tecnológico, a partir de 1980 diversos trabalhos foram sendo realizados em grande escala atingindo, então, o reconhecimento da comunidade científica (BORGES, 2007; MENDES, 2008; MESQUITA; LUIZ, 2011).

Internacionalmente são vários trabalhos desenvolvidos com a utilização do GPR nas mais diversas áreas, tais como arqueologia, geotecnia, meio ambiente, estudos hidrogeológicos, investigação forense, etc. Daniels (1989); Davis e Annan (1989; 1992); Beres e Haeni (1991); Smith e Jol (1995); Nonyers e Goodman (1997); Mellet (2005) são alguns dos autores que foram expandindo o conhecimento da metodologia pelo mundo. No Brasil a

utilização do geo-radar é ainda mais recente se comparada aos estudos internacionais, tendo seus primeiros trabalhos realizados na década de 90. Autores como Porsani (1999); Gandolfo *et al.* (2001); Borges (2002); Souza *et al.* (2002); Porsani *et al.* (2004); Moreira e Dourado (2007); Souza e Gandolfo (2013) vem estudando e empregando o GPR em diversas pesquisas realizadas junto às suas Universidades e Instituições de Pesquisa. Atualmente a utilização do equipamento já superou as barreiras acadêmicas tendo no mercado várias empresas que fornecem serviços especializados em GPR.

Segundo McCann e Foster (1990), os métodos de investigação geofísica são considerados uma importante ferramenta para investigar a subsuperfície de áreas que sofrem deslizamentos de terra. Diversos autores como Denness *et al.* (1975); Bogoslosky e Ogilvy (1977); Schmuts *et al.* (2000); Donnelly *et al.* (2005); Lapenna *et al.* (2005); Glade, Stark e Dikau (2005); Bell *et al.* (2006) utilizaram dos mais variados métodos geofísicos para estudar e entender alguns processos de deslizamentos espalhados pelo mundo.

Nesse sentido, há também estudos específicos envolvendo a utilização do GPR para investigar a subsuperfície de áreas afetadas por este tipo de acidente, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Bruno, Martillier (2000); Bichler *et al.* (2004), Roch *et al.* (2005); Aranha *et al.* (2006); Aranha, Sobreira (2006); Sass, Bell, Glade (2008); Bednarczyk (2008) são alguns dos autores que utilizaram o GPR, aliado a métodos de investigação direta, para obter informações relevantes para entender os processos de deslizamento de terra, como contato solo-rocha, espessura das camadas, superfícies de ruptura existentes, intensidade e orientação das descontinuidades presentes nos maciços rochosos, entre outras.

Além dessas informações, segundo Knight (2001), as imagens obtidas com o GPR podem auxiliar na estimativa de algumas das propriedades hidrogeológicas do solo, como teor de umidade, porosidade e permeabilidade, tão determinantes para o estudo da taxa de infiltração de água de chuva, que pode acarretar na alteração da densidade do solo predispondo o mesmo a processos de escorregamento. Huisman *et al.* (2001); Galagedara, Parkin e Redman (2003); Huisman *et al.* (2003); Grote, Hubbard e Rubin (2003); Huisman, Bouten (2003); Paixão, Prado e Diogo (2006); Barbosa *et al.* (2010); Araújo (2013) são alguns dos autores que contaram com o auxílio do GPR para estimar essas propriedades do solo.

Diante de tudo que foi exposto, principalmente pela elevada capacidade que o GPR tem em caracterizar a subsuperfície de forma rápida e eficiente, é que a aplicação dessa metodologia visando auxiliar na prevenção de possíveis desastres naturais como

deslizamento de encostas, tão presentes em períodos de chuvas intensas e prolongadas no Brasil, se faz pertinente.

3. METODOLOGIA

O principal objetivo do presente estudo é caracterizar a subsuperfície de uma área com risco de deslizamento utilizando o GPR. Foram indicadas pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Belo Horizonte (COMDEC), colaboradora e parceira deste projeto de pesquisa, três áreas em diferentes regiões do município, sendo todas inseridas neste contexto. Após análise das características gerais de cada uma, tais como geologia, geomorfologia, localização e histórico de ocorrência de acidentes, e, ainda, visita para avaliar a facilidade nas condições de investigação, uma destas áreas foi selecionada.

3.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado em uma área localizada na Rua Genoveva de Souza do município de Belo Horizonte (19° 54' 23" S, 43° 55' 19" W), conforme a Figura 6.

Figura 6: Localização da área de estudo.



A geologia natural da área de estudo pertence à região do Complexo Belo Horizonte, sendo composta principalmente por gnaisses (SILVA *et al.*, 1995; VIANA, 2000; PARIZZI, 2004).

Quanto ao relevo, o local de estudo está enquadrado no Quadrilátero Ferrífero, que tem aproximadamente 865 m de altitude na parte mais elevada, de acordo com Parizzi (2004).

O tipo de clima em Belo Horizonte é CWA de acordo com Köppen, considerado temperado com verões amenos e invernos secos e influenciado pelo relevo (EIDT, 1968).

Belo Horizonte tem temperaturas médias anuais de 21,8 °C; máximas de 27,2 °C e mínimas de 17,8 °C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.603 mm, com chuvas concentradas no verão e a estação seca no inverno (INMET, 2010).

De acordo com as investigações geotécnicas realizadas na área através de sondagens a percussão e disponibilizadas pela COMDEC, o local de estudo é constituído basicamente por argila, com presença de algumas camadas de silte e faixas de material granular, como areia e pedregulho rochoso. O maciço terroso chega a atingir 8,0 m de espessura em alguns pontos e o nível de água (N.A.) encontra-se à profundidade de 11,0 m abaixo do pé do talude (SUDECAP, 2016).

O foco do presente estudo é primeira parte do maciço terroso finalizada na berma de equilíbrio presente, com área de aproximadamente 380 m², com irregularidades ao longo de sua extensão e desnível entre o ponto mais alto e mais baixo de quase 5 m.

3.2. Contextualização do problema

A indicação do local para estudo é justificada pelo histórico de acidentes ocorridos na área. São mais de 30 anos de problemas recorrentes no terreno que, dentre tantos de menor magnitude, na década de 80 sofreu um deslizamento de terra, causando a morte de uma família que vivia no trecho abaixo do talude (LOPES, 2016a, 2016b; PEDROSA, 2016).

Após o episódio fatal, houve a reconstrução da Rua Genoveva de Souza através de obras de compactação do aterro que dá origem à via. Apesar de o maciço parecer estável após esta intervenção, diversos problemas se apresentaram nos últimos anos (LOPES, 2016a).

Em 2012, a ocorrência de um processo de erosão no solo subjacente à calçada foi registrada pelo órgão da Defesa Civil, causando trincas e pequenos danos na calçada e, ainda, inclinação e deslocamento dos elementos pré-moldados em forma de “V” que formam o guarda-corpo (COMDEC, 2017). No ano de 2015, a rua teve seu trânsito impedido devido a um abatimento da pavimentação, que resultou em trincas no pavimento e abertura de uma cratera (LOPES, 2016b). Tais problemas estão expostos na Figura 7.

Figura 7: Problemas recorrentes na área de estudo: (a) Trincas no pavimento e danos na calçada, registradas em 2012; (b) Trincas em alguns pontos do pavimento e da calçada, registradas em 2015; (c) Trincas no pavimento e abertura na calçada, registradas em 2015; (d) Vista do trecho da calçada com abertura, registrada em 2015.



Fonte: COMDEC (2017)

Mesmo com a interdição da via, ocorrida em 10 de novembro de 2015 e se estendendo até os dias atuais, e o constante reparo das trincas e aberturas no pavimento, sempre há o surgimento de novas. Os problemas no local continuam progredindo, principalmente, por não ter sido realizada qualquer obra definitiva de recuperação da estabilidade e recomposição da via (LOPES, 2016b; PEDROSA, 2016).

A Figura 8 mostra a evolução de uma trinca localizada na calçada ocorrida em um período de 37 dias, após longos períodos de chuva. A progressão do problema ocorreu tanto com o crescimento do seu comprimento, quanto da sua abertura, que chega a medir 4,0 cm na região mais crítica (Figura 9a). Além disso, há indícios da movimentação do maciço terroso, como pode ser notado na Figura 9b, com desnível presente de aproximadamente 2,0 cm.

Figura 8: Evolução de uma rachadura na calçada: (a) registro do dia 19 de janeiro de 2018; (b) registro do dia 25 de fevereiro de 2018.



Figura 9: Vista aproximada da rachadura existente na calçada: (a) abertura crítica de 4 cm; (b) evidências de deslocamento do maciço terroso com diferença de altura de 2 cm.



Toda esta situação está ocasionando uma série de transtornos para os moradores, comerciantes e motoristas que frequentam a região devido ao desvio das rotas e itinerários de algumas linhas de ônibus, além de causar insegurança na população, principalmente em períodos chuvosos. Como a estrutura da rua já está comprometida, a chegada da chuva pode desencadear novos deslizamentos de terra, causando sérios prejuízos tanto para quem é vizinho do local quanto para quem vive no trecho abaixo do talude (LOPES, 2016a).

Nessa perspectiva, em novembro de 2015, avaliou-se o comportamento do talude quanto à presença de águas pluviais, simulando a chuva através do lançamento de grande carga de água na abertura localizada na calçada. As águas lançadas surgiram em ponto sobre a canaleta intermediária (Figura 10) em velocidade relativamente rápida, cerca de 2 minutos depois, verificando então que o talude, provavelmente, se encontra com uma ruptura hidráulica, o que pode comprometer sua estabilidade, principalmente, em períodos de chuvas intensas (COMDEC, 2015).

Figura 10: Vista do ponto de saída das águas lançadas e seu escoamento sobre a canaleta intermediária (a) e vista aproximada do ponto de saída das águas lançadas (b).



Fonte: COMDEC (2017).

Segundo a Superintendência de Desenvolvimento da Capital (Sudecap), mesmo com a realização de diversos estudos geotécnicos, ainda não foi definida a causa do problema presente no local. Foi comprovada, através de laudos técnicos de novembro de 2015, que não houve qualquer tipo de vazamento de água subterrâneo, uma vez que a rede da Copasa (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) permanece íntegra e, ainda, não foram constatados indícios de umidade significativa no material erodido (LOPES, 2016a, 2016b; PEDROSA, 2016).

Contudo, para a Sudecap, a hipótese mais contundente relativa às causas do recente problema é a de que a compactação do aterro realizada após o deslizamento de terra no local na década de 80 não tenha sido suficiente. Isto aliado à atuação de fatores externos como infiltração de águas das chuvas, já que a rua não possui qualquer tipo de rede de drenagem pluvial, pode ter proporcionado carregamento de finos, gerando uma erosão do material e, posterior, abatimento da via (LOPES, 2016a, 2016b; PEDROSA, 2016).

O projeto da obra de recuperação da Rua Genoveva de Souza proposto pela Sudecap, que prevê o tratamento e estabilização do talude pertencente ao local de estudo, a fim de sanar

o problema e evitar novos deslizamentos, ainda não foi executado. E para que a resolução do problema seja realizada de forma efetiva, o ideal é que se atue diretamente na causa.

Sendo assim, a utilização de novos tipos de investigação geotécnica, como a geofísica através do GPR, pode ser decisiva para a caracterização do local de estudo e compreensão da causa dos problemas ali identificados, sendo determinante para auxiliar na prevenção de novos acidentes.

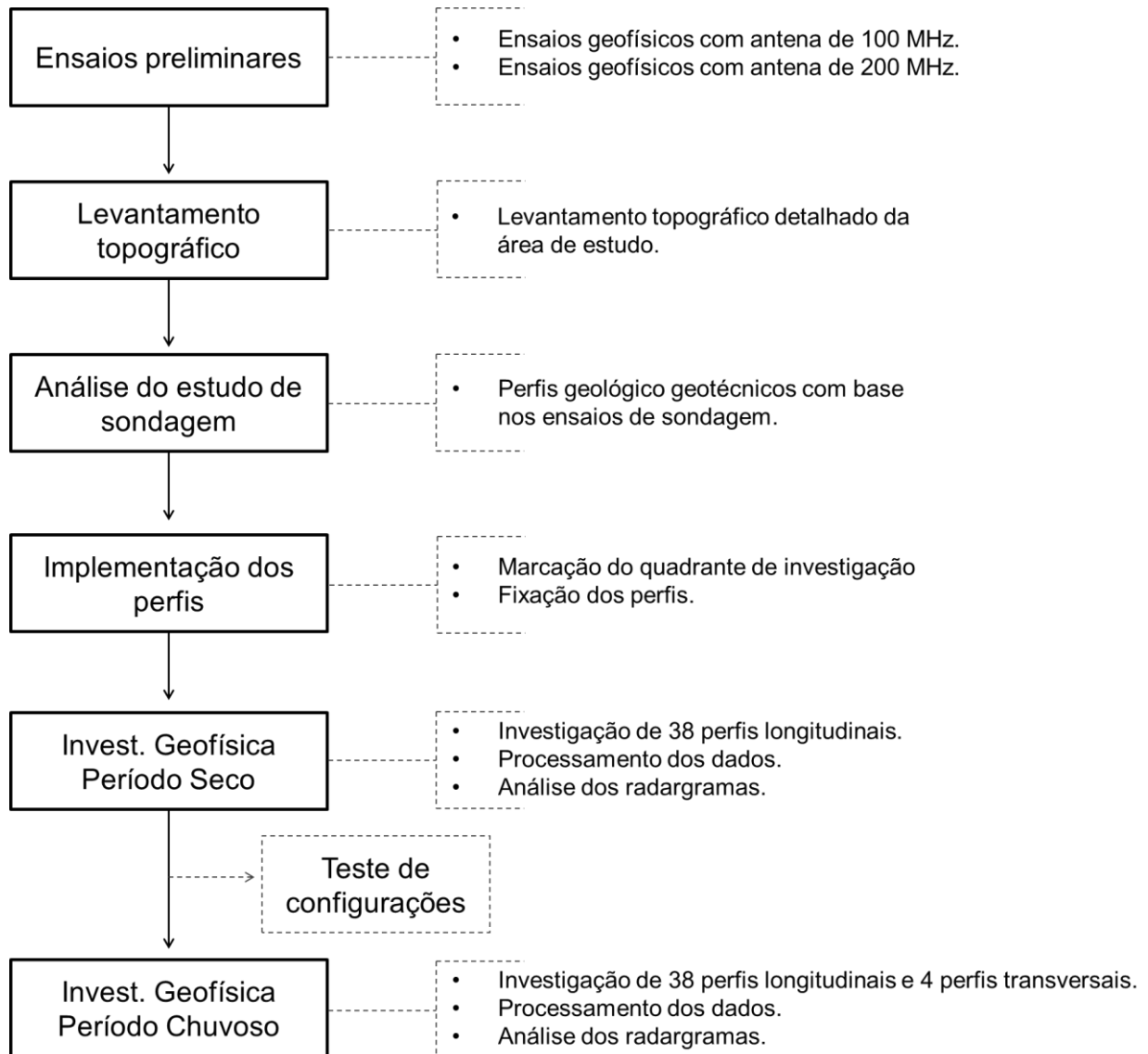
3.3. Procedimentos

A metodologia adotada na pesquisa contemplou a caracterização da área através da investigação geofísica em dois períodos pluviométricos distintos – seco e chuvoso – realizadas nos meses de setembro de 2017 e janeiro de 2018, respectivamente. Tal escolha foi baseada no fato de que o teor de umidade do solo influencia diretamente na reflexão das ondas eletromagnéticas emitidas pelo GPR, possibilitando a comparação entre ambos os resultados buscando extrair informações relevantes relacionadas aos problemas do talude.

Além deste tipo de investigação (indireta), também utilizou do método direto de investigação, através da análise dos ensaios de sondagem já realizados no local em dezembro de 2015 e fornecidos pela COMDEC.

Outras atividades complementares consideradas importantes para o desenvolvimento da pesquisa, como ensaios preliminares, levantamento topográfico e implementação dos perfis, também foram realizadas. Na Figura 11 estão representadas todas as atividades desenvolvidas durante a pesquisa.

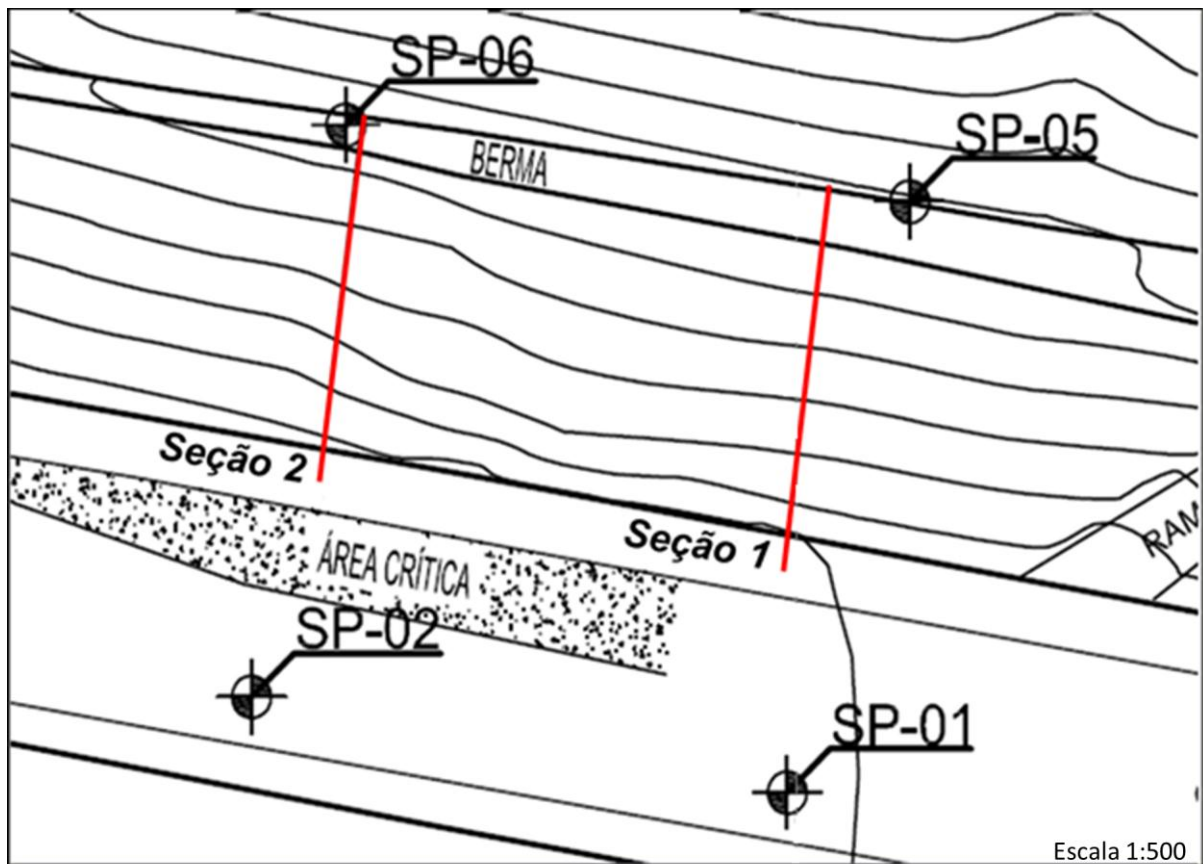
Figura 11: Fluxograma das atividades.



3.3.1. Ensaios Preliminares

Com o intuito de definir a frequência das antenas a serem utilizadas na presente pesquisa, bem como analisar as dificuldades encontradas na realização da investigação geofísica, no dia 21 de maio de 2017, foram realizados ensaios GPR com antenas de diferentes frequências (100 MHz e 200 MHz) em dois dos perfis definidos para o local de estudo. A distância entre os perfis foi de, aproximadamente 15 m, nomeados, da direita para a esquerda, de Seção 1 e Seção 2 (Figura 12).

Figura 12: Posicionamento dos perfis preliminares.



Antes de iniciar a aquisição dos dados com GPR, alguns parâmetros devem ser definidos e configurados no equipamento de modo a garantir uma aquisição de dados de qualidade. Os principais parâmetros definidos para a obtenção dos dados nesta etapa foram basicamente o mesmo para ambas as antenas, sendo a única diferença entre elas o *Scan/unit*: 40/m para a antena de 100 MHz e 20/m para a antena de 200 MHz. O modo de aquisição dos dados foi o de reflexão simples, conhecido como “*Common Offset*”, com as antenas orientadas perpendicularmente à direção dos perfis, no modo distância, para ambas as antenas. Estes parâmetros estão representados na tabela abaixo.

Tabela 6: Parâmetros das antenas utilizadas nos ensaios preliminares.

Frequência central da antena	100 MHz	200 MHz
Samples	1024	1024
Range	200 ns	200 ns
Scan/m	20	40
Stacking	32	32
Método de aquisição	Refl. Simples	Refl. Simples
Orientação das antenas	Perpendicular	Perpendicular
Modo	Distância	Distância

A investigação foi iniciada pela utilização da antena de 100 MHz na Seção 1 e, em seguida na Seção 2. Concluída esta etapa, utilizou-se da antena de 200 MHz na ordem inversa, primeiramente na Seção 2 e depois na Seção 1, de modo a facilitar o processo. O deslocamento do GPR foi realizado de baixo para cima no talude, sendo puxado por um sistema de cordas conduzido por um operador localizado na calçada (Figura 13). Sendo assim, resultaram desta etapa quatro radargramas, dois na Seção 1, com antenas de 100 MHz e 200 MHz, e dois na Seção 2, com ambas as antenas, nomeados de S1-100, S1-200, S2-100, S2-200, fazendo referência à seção e antena correspondente.

Figura 13: Sistema de movimentação do GPR.

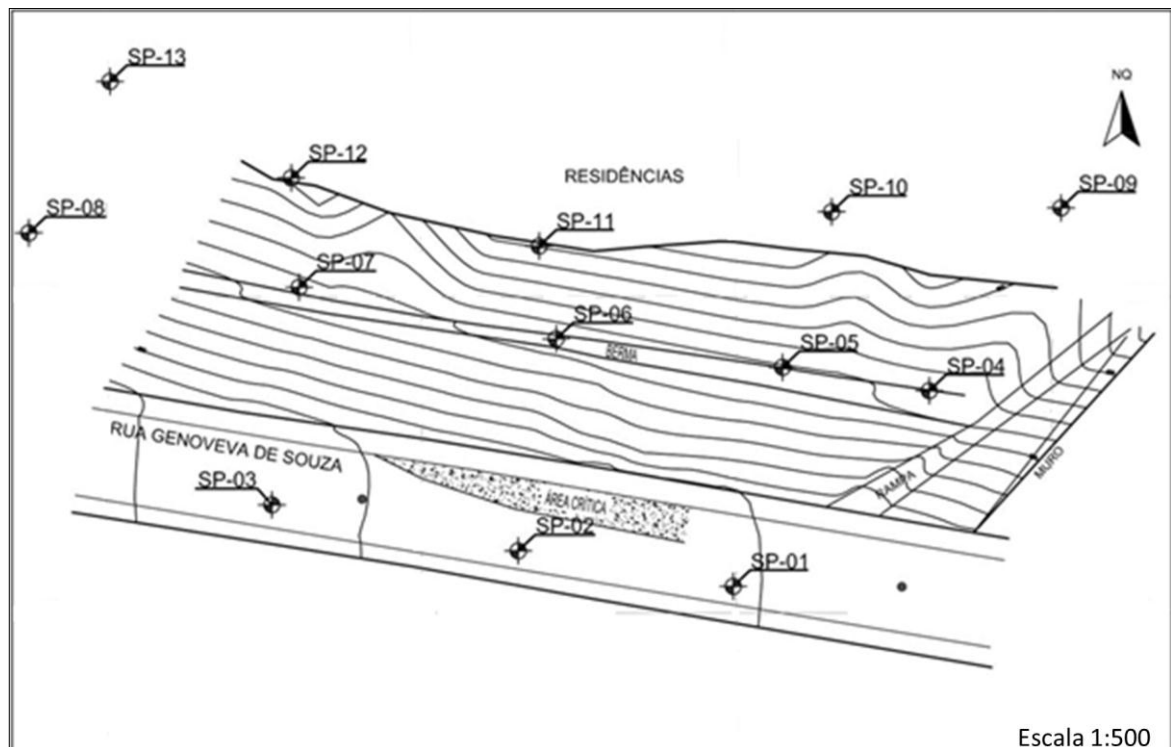


3.3.2. Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico planialtimétrico foi realizado no dia 16 de agosto de 2017 em parceria com o Departamento de Engenharia de Transportes – DET do CEFET-MG, utilizando o DGPS (*Differential Global Position System*) do modelo *Topcon HiPer V*, que possui precisão de 5 mm na posição horizontal e 10 mm na cota do terreno.

Este levantamento foi realizado em uma área de 2.200 m² abrangendo completamente o local de estudo e nove dos treze furos de sondagem realizados, conforme pode ser observado pela Figura 14. Além das curvas de nível, ainda foram representados os muros e divisas com as residências próximas do local, o meio fio das calçadas, a rampa de acesso às partes mais baixas do talude, a área, chamada crítica, onde está localizada uma contenção de sacarias e localização dos furos de sondagem. Para maiores detalhes, consultar Apêndice A.

Figura 14: Levantamento topográfico planialtimétrico da área de estudo.

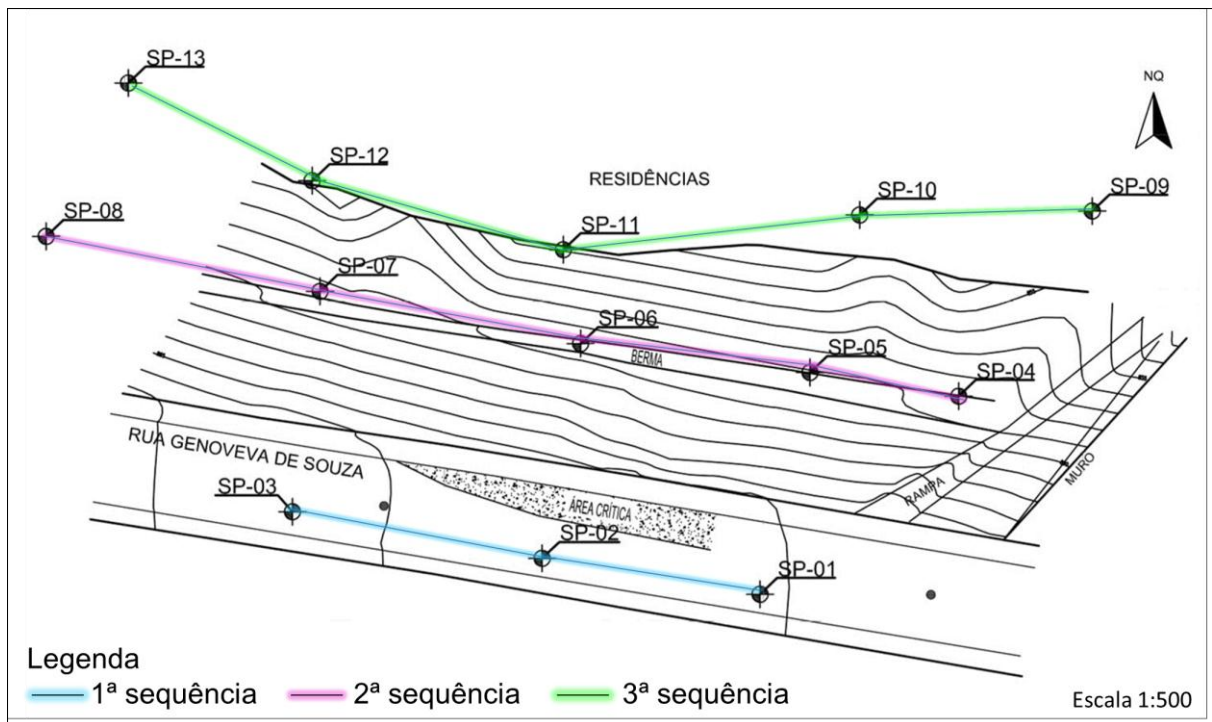


3.3.3. Análise do estudo de sondagem

A investigação geotécnica profunda realizada no local de estudo e utilizada no presente trabalho foi fornecida pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Belo Horizonte (COMDEC). Esta investigação foi realizada pela empresa Geosondar Geotcenia entre 22 de dezembro de 2015 à 02 de janeiro de 2016 através de treze sondagens à percussão em diferentes pontos da área que abrange o local de estudo.

Para esta investigação foram realizadas três sequências de furos: uma na rua, uma na região central do corpo do talude e uma na base do talude. A primeira sequência é composta por três furos, nomeados, da direita para a esquerda, SP01, SP02 e SP03. A segunda por cinco furos, nomeados SP04, SP05, SP06, SP07 e SP08, e a terceira também por cinco: SP09, SP10, SP11, SP12 e SP13 (Figura15). O limite de sondagem definido foi de 8,45 m para a primeira sequência e de 12,45 m para as demais (Anexo A).

Figura 15: Sequência dos furos de sondagem à percussão.



As informações obtidas através desta análise podem colaborar de forma efetiva na compreensão dos resultados obtidos na investigação geofísica e definição das causas do problema. Sendo assim, foram elaborados seis perfis geotécnicos prováveis com base nas sondagens que abrangem a área de estudo: quatro longitudinais e dois transversais (Figura 16). Estes perfis foram nomeados fazendo referência aos furos de sondagem utilizados (Tabela 7).

Figura 16: Possíveis perfis geotécnicos para a área de estudo.

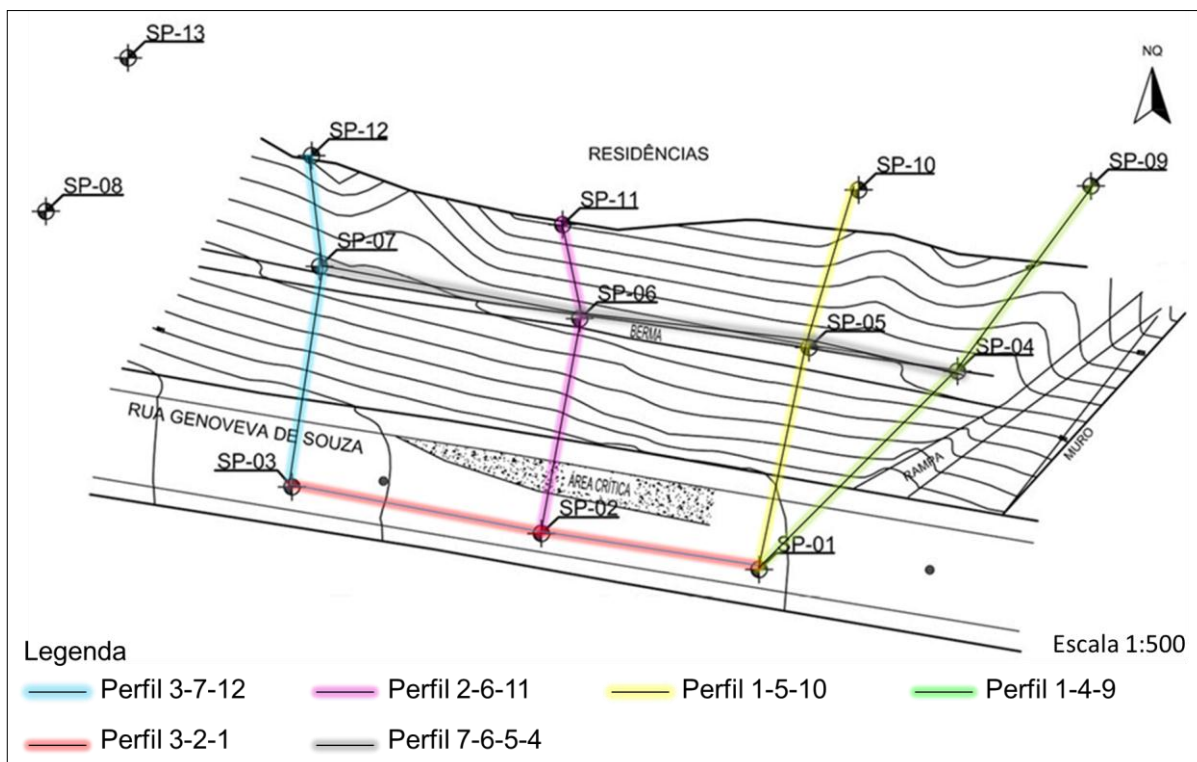


Tabela 7: Perfis geotécnicos com base nas sondagens.

Tipo de Perfil	Nomenclatura	Furos de sondagem utilizados
Longitudinal	Perfil 3-7-12	SP03, SP07 e SP12
Longitudinal	Perfil 2-6-11	SP02, SP06 e SP11
Longitudinal	Perfil 1-5-10	SP01, SP05 e SP10
Longitudinal	Perfil 1-4-9	SP01, SP04 e SP09
Transversal	Perfil 3-2-1	SP03, SP02 e SP01
Transversal	Perfil 7-6-5-4	SP07, SP06, SP05 e SP04

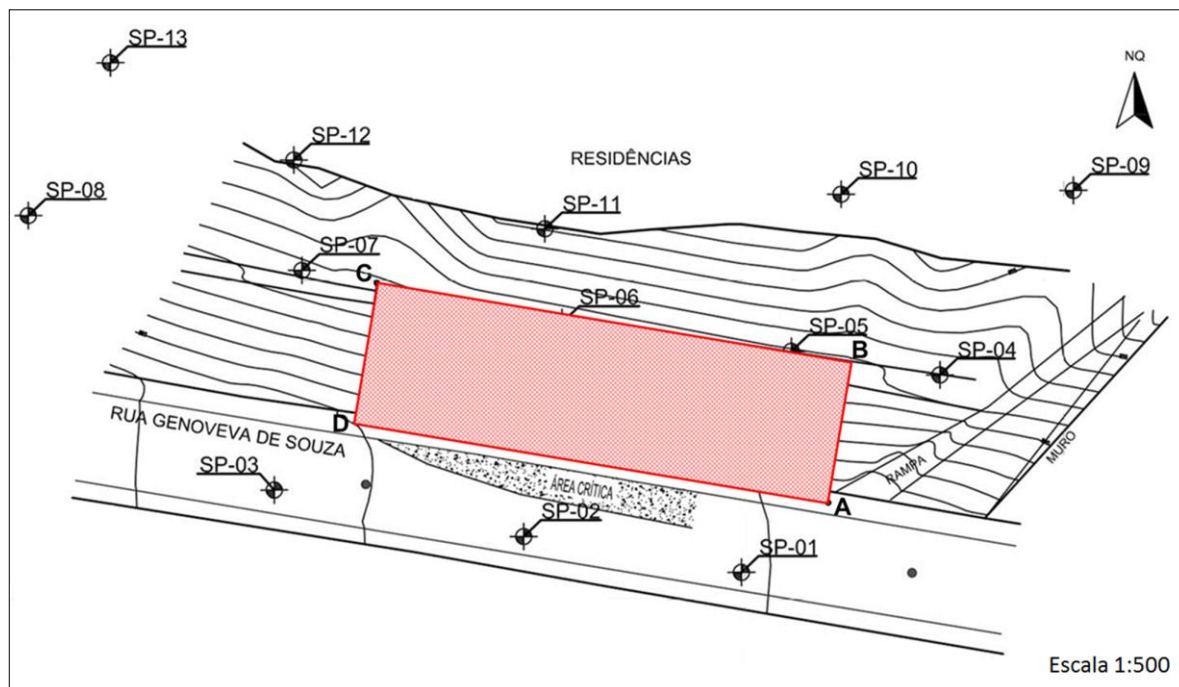
3.3.4. Implementação dos perfis

A implementação dos perfis, realizada no dia 20 de setembro de 2017, foi dividida em duas atividades: marcação do quadrante de investigação e fixação dos perfis. Para a marcação do quadrante de investigação utilizou-se do equipamento topográfico Estação Total Topcon GTS 236W.

Inicialmente, foram marcados dois pontos (A e D) no meio da calçada. Com a estação total posicionada no ponto A visou-se o ponto D, travou o equipamento e, em seguida, o girou 90° para a direita, demarcando um ponto na berma intermediária do talude, nomeado de ponto B. De forma semelhante, posicionou o equipamento no ponto D, visou A e, com o giro de 90° para a esquerda, ficou demarcado outro ponto na berma intermediária do talude

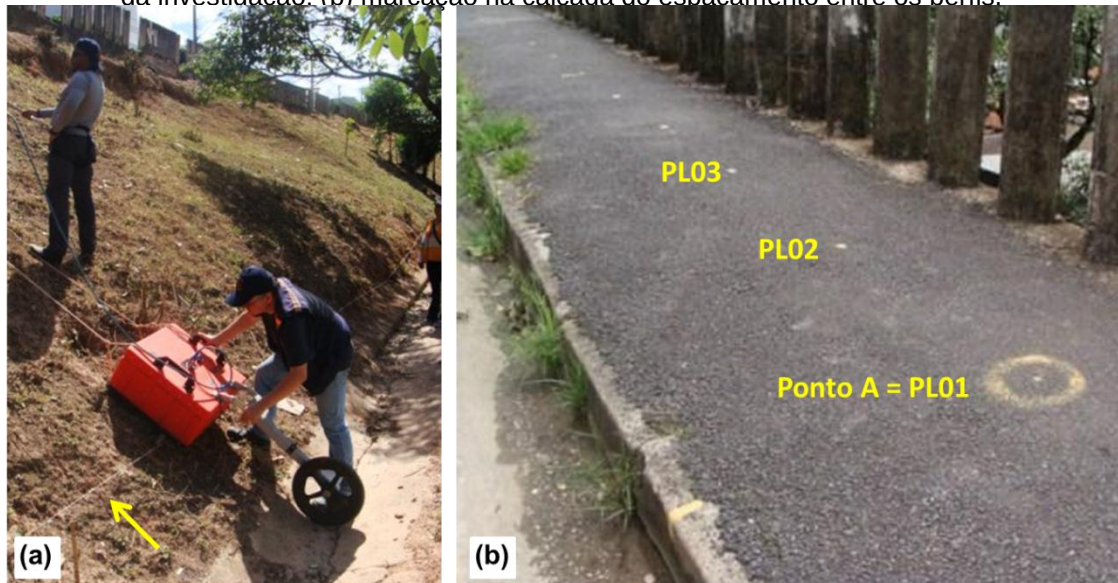
nomeado de ponto C. Assim todos os pontos estão alinhados perpendicularmente entre si, formando o quadrante de investigação ABCD, de aproximadamente 300 m² (Figura 17).

Figura 17: Quadrante de investigação ABCD para a área de estudo.



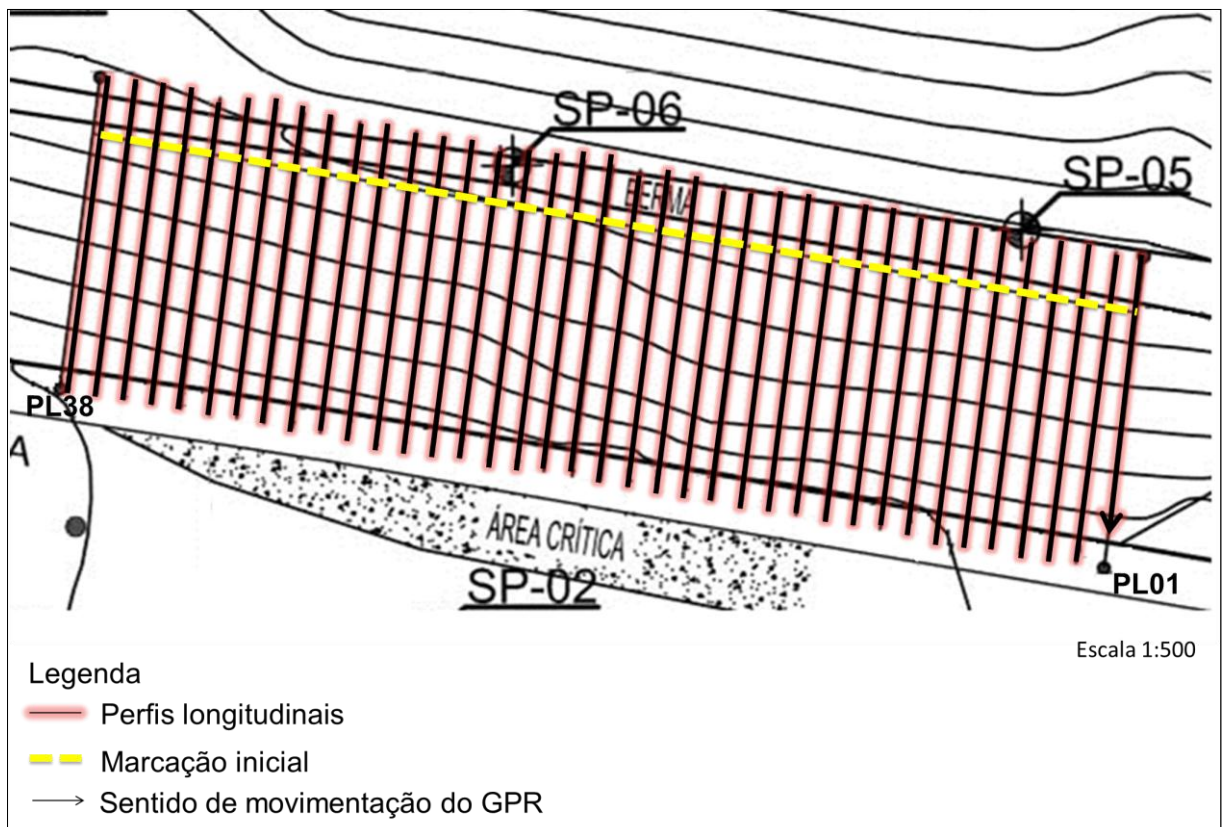
A demarcação das linhas que formam os perfis de GPR foi realizada com o auxílio de piquetes e barbantes no corpo do talude, especificando os pontos de início da investigação e o espaçamento entre eles. Um barbante foi amarrado entre os piquetes fixados nos pontos B e C do quadrante e a cada metro, partindo de B, este barbante era marcado para sinalizar o início do próximo perfil, conforme indicado na Figura 18a. Na calçada, utilizou-se de tinta amarela para marcar os perfis, a partir do ponto A, respeitando o espaçamento definido, como ilustra a Figura 18b.

Figura 18: Demarcação dos perfis de GPR: (a) barbante fixado no talude mostrando o ponto de início da investigação; (b) marcação na calçada do espaçamento entre os perfis.



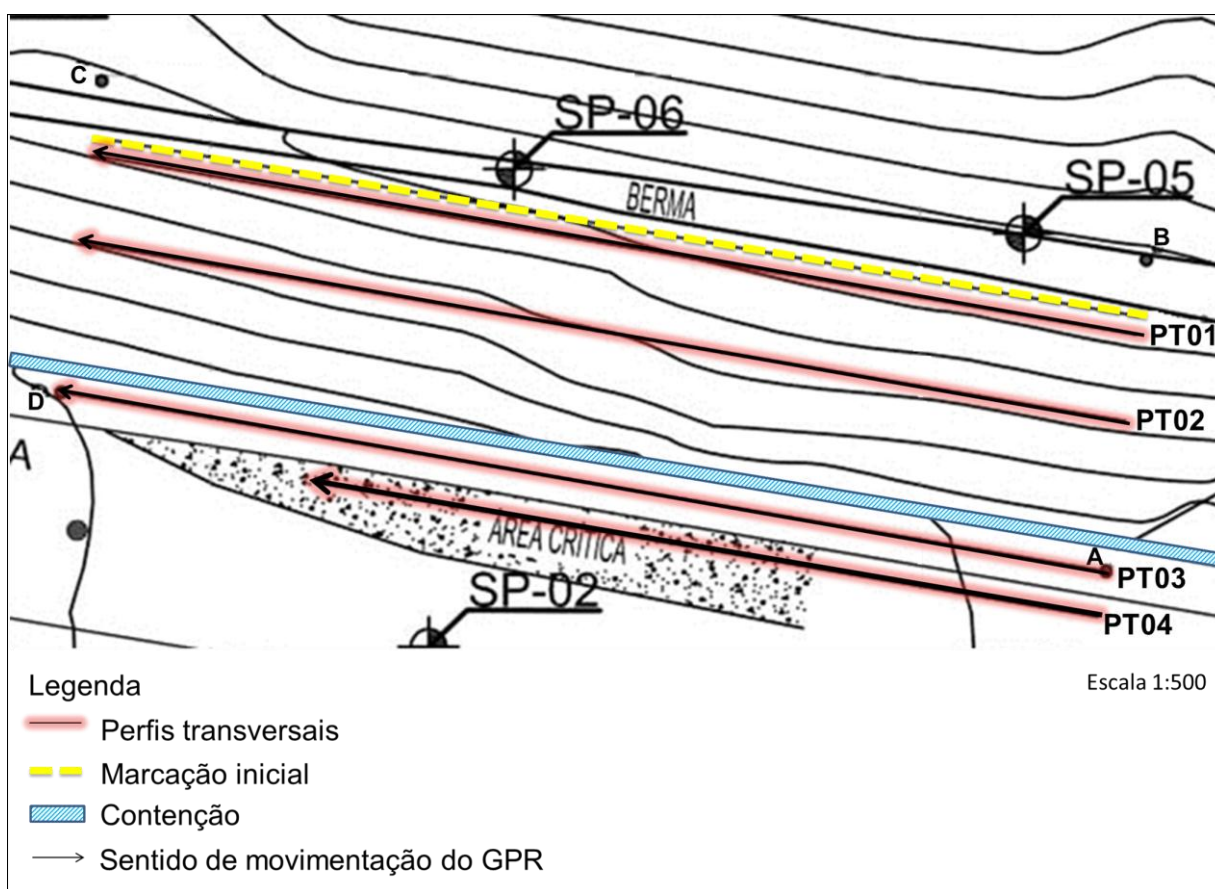
Sendo assim, foram implementados 38 perfis longitudinais à face do talude, espaçados de 1 m, nomeados sequencialmente da direita para esquerda, sentido de A para D, iniciando em PL01 (ponto A) e finalizando em PL38, a aproximadamente 30 cm do ponto D (Figura 19). Estes perfis foram utilizados para a investigação geofísica em ambos os períodos pluviométricos (seco e chuvoso).

Figura 19: Posicionamento dos perfis longitudinais.



Para o período pluviométrico úmido optou-se por realizar a investigação, além dos perfis longitudinais, em quatro perfis transversais, sendo 2 na face do talude e 2 na via, nomeados sequencialmente de baixo para cima de PT01, PT02, PT03 e PT04 (Figura 20). A distância entre PT01 e a marcação inicial é de, aproximadamente, 0,65 m, já entre PT03 e a mesma marcação é de 3,70 m; enquanto que as distâncias entre PT03 e a contenção e PT04 e a contenção são, respectivamente, 0,90 m e 2,52 m. Os perfis transversais PT01 e PT2 interceptam os longitudinais em, aproximadamente, 0,65 m e 3,70 m.

Figura 20: Posicionamento dos perfis transversais.



3.3.5. Investigação geofísica

O GPR utilizado nas investigações geofísicas é o *TerraSIRch SIR (Subsurface Interface Radar) System-3000* da GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), com antenas blindadas e biestáticas (200 MHz). O equipamento é composto por uma unidade de controle portátil, par de antenas, cabos de conexão e *Survey Wheel*, que é uma roda que auxilia na captação dos perfis em solo, fornecendo as medidas de distância.

Inicialmente os parâmetros definidos para a utilização do GPR para este tipo de investigação em ambos os períodos seriam os mesmos utilizados nos ensaios preliminares para a antena adotada. Porém, buscando melhorar a qualidade das reflexões, houve uma

mudança de configurações para a investigação no período seco e outra para o período chuvoso, que serão descritos a seguir.

O processo de investigação de cada um dos perfis longitudinais foi o mesmo utilizado nos ensaios preliminares onde o deslocamento do GPR foi realizado de baixo para cima, com auxílio de um sistema de cordas. Na investigação dos perfis transversais, o deslocamento do GPR se deu da direita para a esquerda (sentido de A para D), também auxiliada por sistema de cordas. O fim da investigação dos perfis era definido e/ou imposto pelas condições físicas do trajeto, como presença de árvores, arbustos, cupinzeiros e barreiras na via, por exemplo, no caminho que o GPR deveria percorrer.

3.3.5.1. Investigação geofísica no período seco

Esta etapa foi realizada no dia 21 de setembro de 2017 através da investigação sequencial dos 38 perfis longitudinais definidos para o local, sendo PL01 o primeiro e o PL38 o último. O processo de investigação de cada um dos perfis foi registrado através de fotografias e anotações relacionadas ao procedimento realizado e consideradas importantes para auxiliar na posterior análise dos radargramas.

Os principais parâmetros utilizados para a aquisição dos dados no período seco foram: a) Frequência central da antena: 200 MHz; b) Samples: 1.024; c) Range (janela de tempo): 200 ns; d) T_rate: 100 MHz, e) Scan/unit: 20; f) Stacking: 64. O método de aquisição foi o de reflexão simples, no modo distância, com as antenas orientadas perpendicularmente à direção dos perfis, assim como os ensaios preliminares, conforme representado na Tabela 8

Tabela 8: Parâmetros das antenas utilizadas na investigação geofísica no período seco.

Frequência central da antena	200 MHz
Samples	1024
Range	200 ns
Scan/m	20
Stacking	64
Método de aquisição	Refl. Simples
Orientação das antenas	Perpendicular
Modo	Distância

Após os dados coletados, realizou-se a análise prévia dos mesmos (pré-processamento) e, posteriormente, o processamento. Devido a problemas na coleta dos dados desta fase, que serão descritos na parte de Resultados, foi necessário o ajuste dos parâmetros de operação do GPR.

3.3.5.2. Teste de configurações de GPR

Estes testes foram realizados no dia 06 de dezembro de 2017 em uma área já conhecida localizada no CEFET-MG Campus II, utilizando a antena de 200 MHz no mesmo perfil e variando um parâmetro por vez de forma a compreender qual deles pode estar impedindo a obtenção de bons resultados nas investigações anteriores. Os testes foram realizados em nove perfis, nomeados sequencialmente de Perfil A até Perfil I, variando os seguintes parâmetros: *Samples*, *Stacking* e *Scan/Unit*.

A Tabela 9 contém todas as variações dos parâmetros utilizadas neste teste. A primeira variação foi no parâmetro *Samples*, onde o Perfil B utiliza de metade do valor utilizado no Perfil A. Depois testou a variação do *Stacking*, alterando seu valor de forma gradativa: 0,3,5,10 e 32 foram os valores utilizados, respectivamente, no Perfil C, Perfil D, Perfil E, Perfil F e Perfil G. Já no Perfil H e Perfil I houve o aumento do *Scan/Unit*, sendo 50 para o primeiro e 100 para o segundo.

Tabela 9: Variação de parâmetros utilizada nos testes de configurações.

Teste de Configurações									
Parâmetros	Perfil A	Perfil B	Perfil C	Perfil D	Perfil E	Perfil F	Perfil G	Perfil H	Perfil I
Frequência (MHz)	200	200	200	200	200	200	200	200	200
T_rate (KHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Samples	1024	512	512	512	512	512	512	512	512
Range (ns)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Scan/unit	20	20	20	20	20	20	20	50	100
Stacking	64	64	0	3	5	10	32	3	5
Modo	Distância	Distância	Distância	Distância	Distância	Distância	Distância	Distância	Distância
Posição antenas	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil	Perpend. ao perfil

3.3.5.3. Investigação geofísica no período chuvoso

Esta etapa foi realizada no dia 25 de janeiro de 2018 através da investigação dos mesmos 38 perfis longitudinais do período seco (PL01 à PL38), além dos 4 perfis transversais (PT01 à PT04). Assim como foi feito na investigação realizada no período seco, o processo de cada um dos perfis, tanto longitudinais quanto transversais, também foi registrado através de fotografias e anotações relacionadas ao procedimento realizado.

Os parâmetros utilizados nesta etapa foram: a) *Samples*: 512; b) *Scan/unit*: 100; c) *Stacking*: 0. Os demais parâmetros (frequência central da antena, range, T_rate) bem como método (reflexão simples) e modo de aquisição (distância) e orientação das antenas (perpendicular) foram os mesmos dos utilizados nas investigações anteriores, conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros das antenas utilizadas na investigação geofísica no período chuvoso.

Frequência central da antena	200 MHz
Samples	512
Range	200 ns
Scan/m	100
Stacking	0
Método de aquisição	Refl. Simples
Orientação das antenas	Perpendicular
Modo	Distância

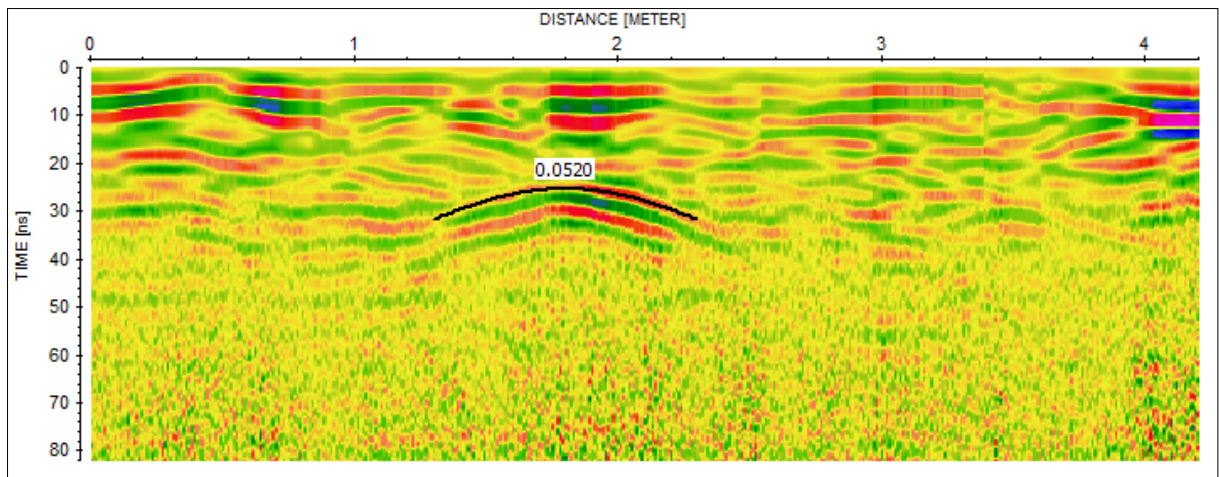
Durante a etapa de pré-processamento, verificou-se que a qualidade dos radargramas foi claramente superior nesta investigação se comparado com o período seco. Sendo assim, o processamento foi realizado buscando melhorar ainda mais sua qualidade para que a interpretação das imagens seja mais precisa e correspondente com a realidade.

3.3.5.4. Processamento de dados

Para a aquisição e processamentos de todos os dados coletados com GPR foram utilizados os softwares *ReflexW 2D data-analysis* e *Gradix Interpex*. Na etapa de pré-processamento foram feitas a verificação da qualidade de todos os radargramas obtidos, através análise das reflexões e ruídos existentes, e edição dos dados, como mudança de direção do perfil necessária em alguns perfis específicos. No processamento dos radargramas, as etapas realizadas e os respectivos valores foram *Set time zero* (-20 ns), *Dewow* (8 ns time window), *Bandpass butterworth filter* (50-600 MHz), *Background removal*, *Running average* (3 traces) e *Gain* (AGC-100). Além disso, foram realizadas também análise de velocidade, correção da topografia e conversão de tempo/profundidade.

Nos perfis obtidos no período chuvoso, puderam ser identificadas algumas hipérboles que foram utilizadas para determinar a velocidade média de propagação das ondas no meio através dos softwares (Figura 21). As correções de tempo em profundidade, bem como a correção de topografia de todos os perfis obtidos foram feitas baseadas no valor médio obtido $v = 0,052 \text{ m/ns}$.

Figura 21: Velocidade média de propagação da onda no meio.



Todas as etapas de pré-processamento e processamento aqui descritos foram realizadas em cada um dos radargramas resultantes dos ensaios preliminares, investigação no período seco e investigação no período chuvoso.

3.3.5.5. Análise dos radargramas

Os radargramas obtidos em cada uma das investigações geofísicas (ensaios preliminares, investigação no período seco e chuvoso) foram analisados quanto à profundidade de penetração da onda, presença e intensidade de ruídos, qualidade da definição das imagens (análise de amplitude e quantidade de detalhamento) e comportamento das reflexões obtidas.

4. RESULTADOS

4.1. Ensaios preliminares

As distâncias percorridas em cada um dos perfis investigados se encontram na Tabela 11, sendo que os da Seção 2 são aproximadamente 3 m maiores que os da Seção 1.

Tabela 11: Distâncias percorridas pelo GPR durante os ensaios preliminares.

Perfil	Seção	Antena	Dist. Percorrida (m)
S1-100	Seção 1	100 MHz	5,750
S1-200	Seção 1	200 MHz	5,575
S2-100	Seção 2	100 MHz	8,750
S2-200	Seção 2	200 MHz	8,475

As Figuras 22, 23, 24 e 25 exibem os radargramas resultantes do processamento executado em S1-100, S1-200, S2-100, S2-200, respectivamente.

Figura 22: Radargrama S1-100, obtido na Seção 1 com antena de 100 MHz.

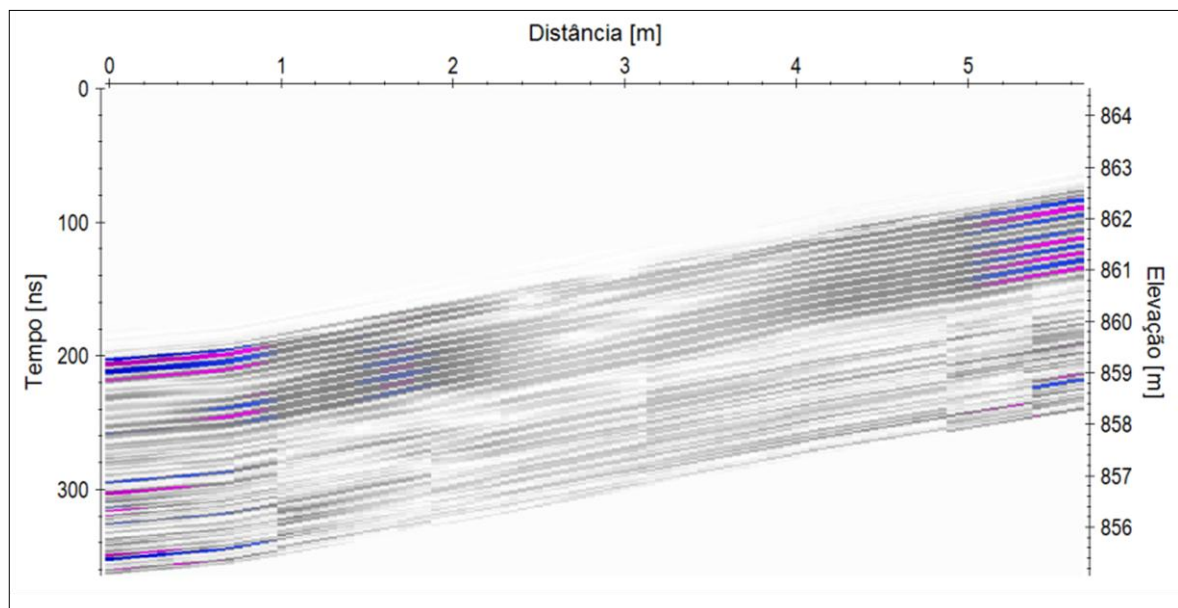


Figura 23: Radargrama S1-200, obtido na Seção 1 com antena de 200 MHz.

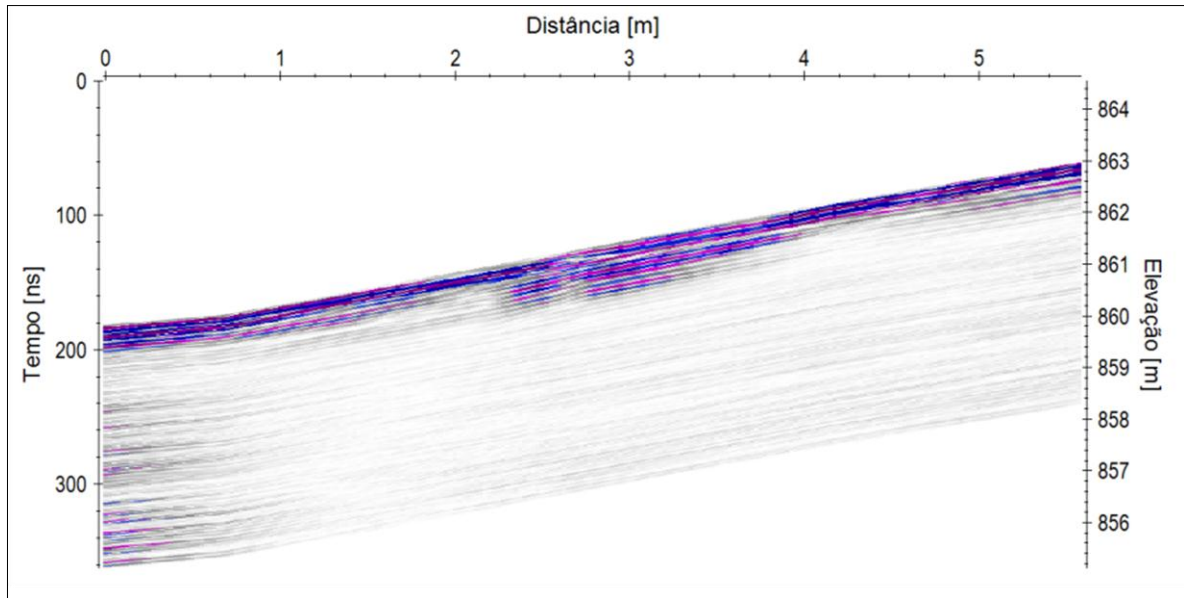


Figura 24: Radargrama S2-100, obtido na Seção 2 com antena de 100 MHz.

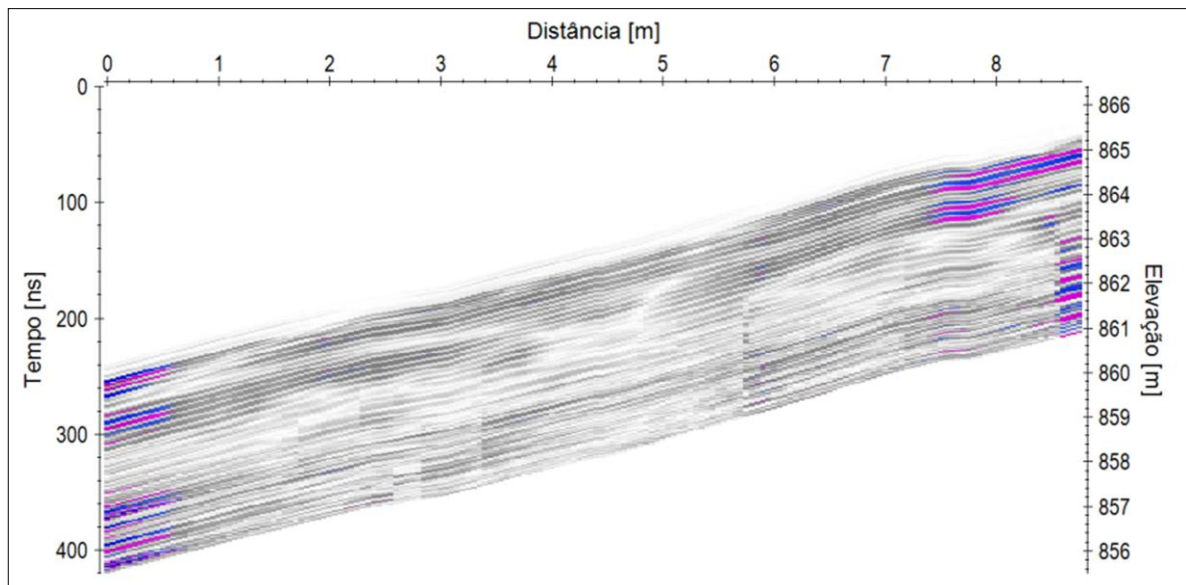
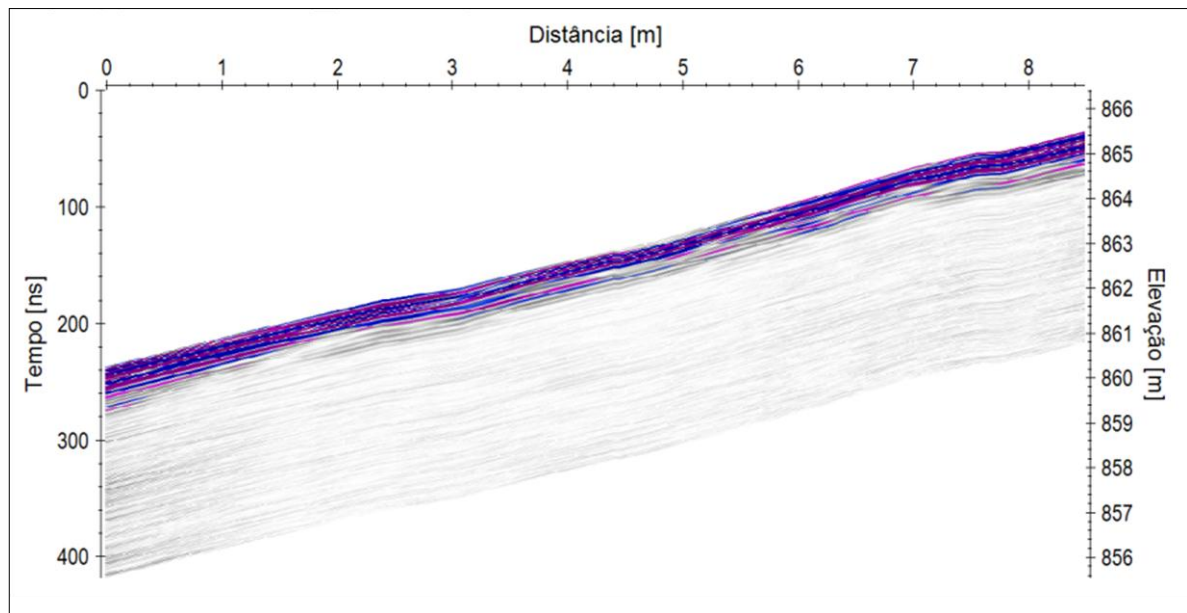


Figura 25: Radargrama S2-200, obtido na Seção 2 com antena de 200 MHz.



Através da análise dos radargramas obtidos nos ensaios, notou-se que a profundidade de penetração foi relativamente baixa, onde as reflexões mais profundas se encontram a, aproximadamente, 1,5 m da superfície para a antena de 100 MHz (Figuras 22 e 24) e 1,0 m para a antena de 200 MHz (Figuras 23 e 25).

Além disso, notou-se também que a qualidade da definição das imagens dos radargramas obtidos com a antena de 200 MHz (Figuras 23 e 25) é visivelmente superior aos obtidos com antena de 100 MHz (Figuras 22 e 24).

Ao analisar o comportamento das ondas (ondulação de cor vermelha) durante os ensaios realizados, notou-se a presença de fortes ruídos (ondulações de cor preta), conforme representado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26: Comportamento da onda na Seção 1: (a) S1-100 e (b) S1-200.

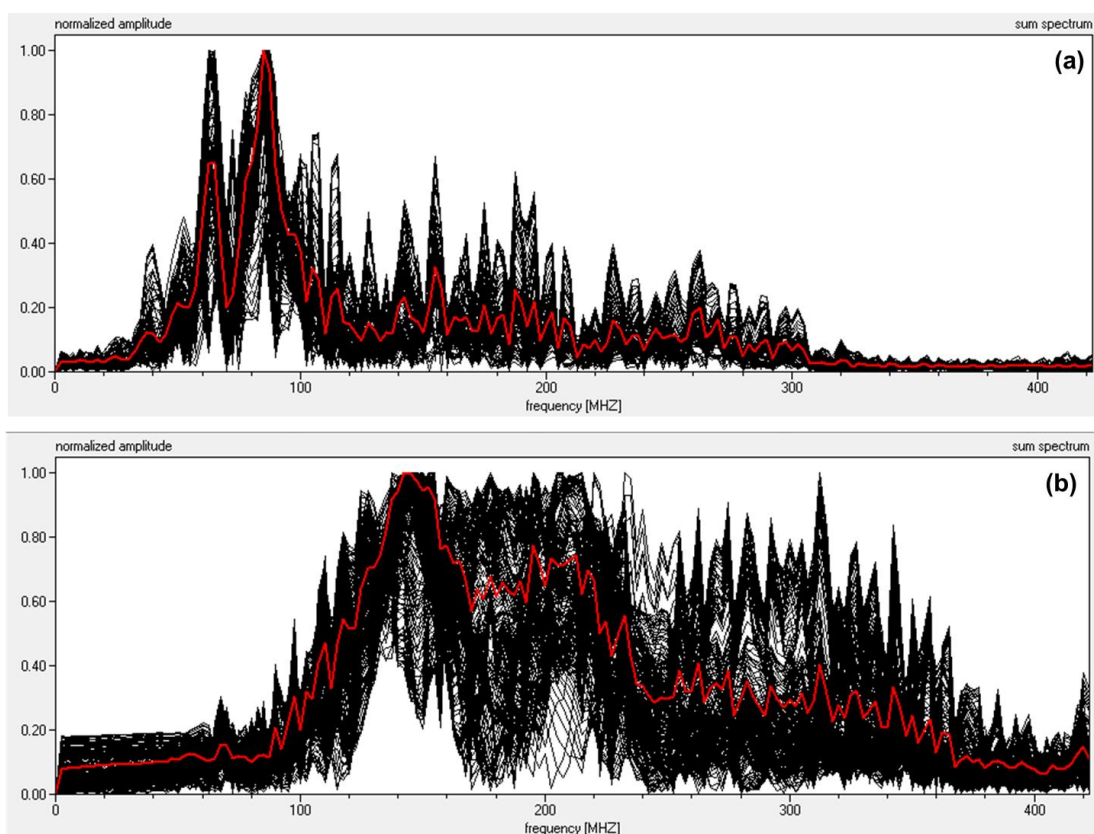
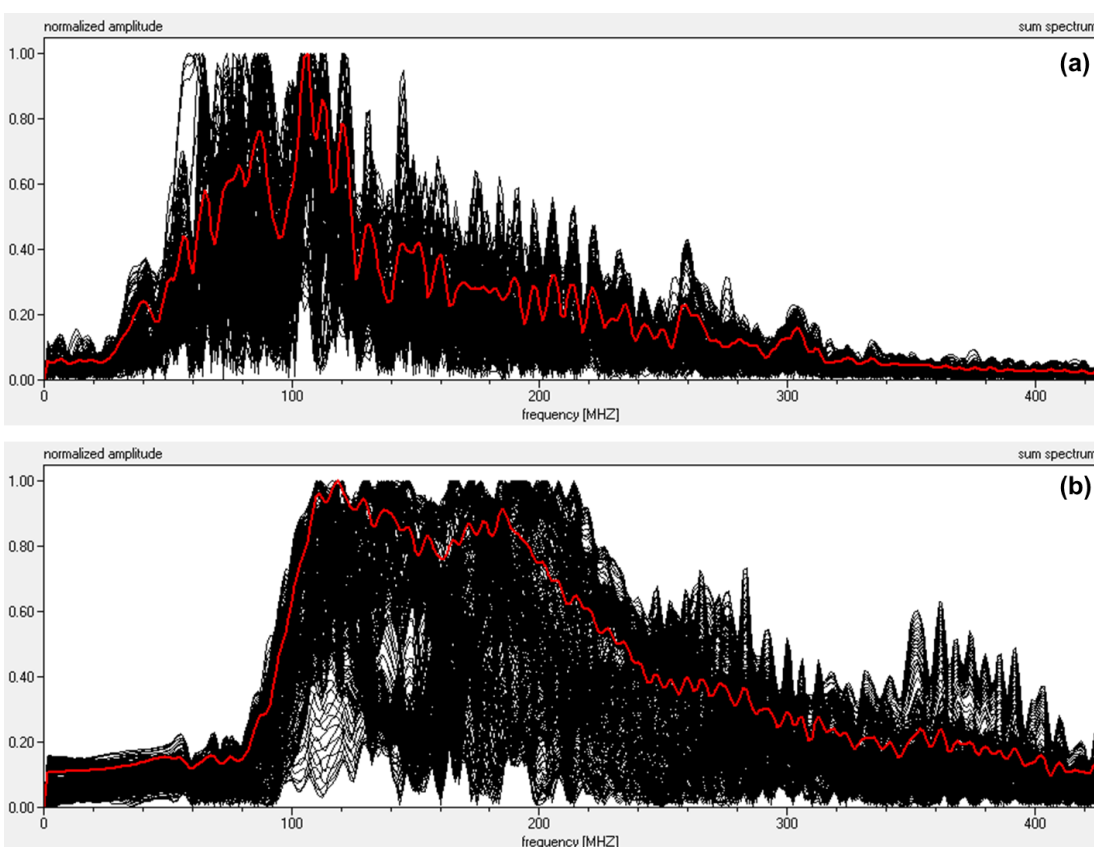


Figura 27: Comportamento da onda na Seção 2: (a) S2-100 e (b) S2-200.



Verifica-se que os ruídos são mais intensos nos radargramas da Seção 2 (Figuras 27a e 27b), do que nos da Seção 1 (Figuras 26a e 26b); e que o comportamento das ondas procedentes da antena de 100 MHz, tanto na Seção 1 (Figura 26a) quanto na Seção 2 (Figura 27a), sofrem maior perturbação do forte ruído presente no local do que a antena de 200 MHz (Figuras 27b e 27b).

Após analisar os resultados dos ensaios preliminares utilizando antenas de 100 MHz e 200 MHz, optou-se por utilizar nas investigações subsequentes apenas as antenas de maior frequência (200 MHz), uma vez que essas forneceram radargramas um pouco mais nítidos que os resultantes das antenas de 100 MHz.

Visando atingir maior profundidade de penetração da onda, menor interferência dos ruídos e obter reflexões mais nítidas, realizou-se a redefinição de alguns parâmetros para utilização do equipamento nas próximas investigações.

4.2. Perfis geotécnicos de sondagem

A investigação geotécnica profunda foi realizada através de sondagem à percussão em treze diferentes pontos da área dividida em três sequências de furos: a primeira é composta por três perfurações realizadas na rua; a segunda, por cinco furos na região central do corpo do talude e a terceira, por cinco na base do talude (Figura 15).

A primeira sequência de furos realizada na área, compostas por SP01, SP02 e SP03, que estão localizadas na via, é basicamente composta por camadas de argila. O primeiro furo (SP01) possui cinco camadas e é basicamente constituído por material fino (silte e argila), sendo a primeira com presença de pedregulho, com exceção da terceira camada que é formada por pedregulhos rochosos. O segundo furo (SP02) possui suas quatro camadas compostas por argila, sendo que na primeira há presença de pedregulho e na última, fragmentos vegetais. O SP03 possui quatro camadas e é basicamente argiloso, sendo que na primeira há pedregulhos presentes, e a segunda é composta por areia argilosa com fragmentos tecnogênicos e pedregulhos (Tabela 12).

Tabela 12: Caracterização da primeira sequência de furos de sondagem composta por SP01, SP02 e SP03.

	SP01	SP02	SP03
1ª CAMADA	Argila arenosa com pedregulhos	Argila siltosa com pedregulhos	Argila arenosa com pedregulhos
2ª CAMADA	Silte arenoso	Argila arenosa	Areia argilosa com fragmentos tecnogênicos e pedregulhos
3ª CAMADA	Pedregulhos rochosos	Argila siltosa micácea	Argila arenosa
4ª CAMADA	Argila pouco siltosa	Argila pouco siltosa com fragmentos vegetais	Argila pouco siltosa
5ª CAMADA	Argila pouco arenosa	-	-

A segunda sequência de furos de sondagem à percussão, que se localiza no meio do talude, inicia-se pelo SP04, que possui as cinco camadas constituídas por materiais finos (silte e argila) com presença de pedregulho, exceto a quarta camada que não possui esse tipo de material granular. O SP05 é composto por cinco camadas todas compostas por finos (silte e argila) com pedregulhos presentes, com exceção da quarta camada que é composta por argila sem esse tipo de material granular. O SP06 possui quatro camadas e é basicamente constituído por finos (a última possui laminações de areia fina), exceto a segunda camada que é composta por areia siltosa. O SP07 é possui suas quatro camadas com as mesmas características do furo anterior, diferenciando-se apenas pelas espessuras de cada uma das camadas. O SP08 é possui suas três camadas constituídas por argila, sendo que na última há laminações de areia fina (Tabela 13).

Tabela 13: Caracterização da segunda sequência de furos composta por SP04, SP05, SP06, SP07 e SP08.

	SP04	SP05	SP06	SP07	SP08
1ª CAMADA	Argila siltosa com pedregulhos	Silte pouco arenoso com pedregulhos	Silte argiloso	Silte argiloso	Argila arenosa
2ª CAMADA	Argila pouco arenosa com pedregulhos	Argila siltosa com pedregulhos	Areia siltosa	Areia siltosa	Argila pouco siltosa
3ª CAMADA	Argila arenosa com pedregulhos	Silte arenoso com pedregulhos	Argila pouco siltosa	Argila pouco siltosa	Argila pouco siltosa com laminações de areia fina
4ª CAMADA	Silte arenoso	Argila siltosa	Argila pouco siltosa com laminações de areia fina	Argila pouco siltosa com laminações de areia fina	-
5ª CAMADA	Silte argiloso com pedregulhos	Argila siltosa com pedregulhos	-	-	-

A terceira sequência de furos está localizada no pé do talude e é composta pelos furos de SP09 à SP13. O SP09 é composto por cinco camadas, sendo a primeira constituída por areia com presença de pedregulhos, e as demais por materiais finos, onde na segunda camada há presença de fragmentos vegetais e na última, fragmentos de rochas. Os furos SP10, SP11 e SP12 têm constituições semelhantes: compostos por três camadas, sendo a primeira constituída por areia com presença de pedregulhos e as demais por argila, sendo que a segunda possui fragmentos vegetais presentes. O SP13 possui cinco camadas, basicamente constituídas por argila - com presença de entulhos de construção civil e detritos vegetais na terceira e fragmentos vegetais na quarta – com exceção da segunda camada que é composta por areia silto argilosa com pedregulhos. Foram encontrados nível de água em dois furos dessa sequência: SP09, com N.A. em 10,79 m de profundidade e SP10 com N.A. em 11,19 m (Tabela 14).

Tabela 14: Caracterização da terceira sequência de furos composta por SP09, SP10, SP11, SP12 e SP13.

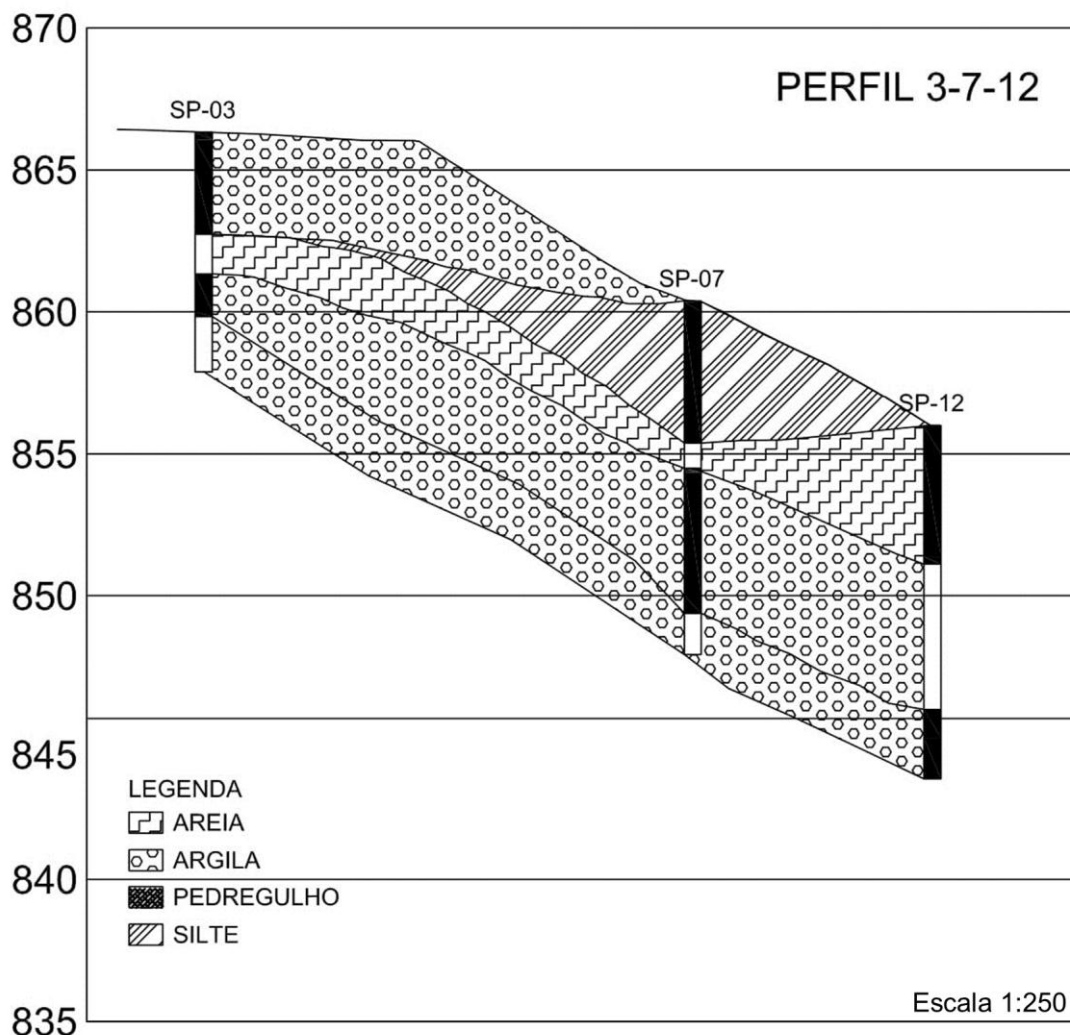
	SP09	SP10	SP11	SP12	SP13
1ª CAMADA	Areia siltosa com pedregulhos	Areia siltosa com pedregulhos	Areia siltosa com pedregulhos	Areia siltosa com pedregulhos	Argila arenosa
2ª CAMADA	Argila siltosa com fragmentos vegetais	Argila siltosa com fragmentos vegetais	Argila siltosa com fragmentos vegetais	Argila siltosa com fragmentos vegetais	Areia silto argilosa com pedregulhos
3ª CAMADA	Silte argiloso	Argila plástica siltosa	Argila plástica siltosa	Argila plástica siltosa	Argila siltosa com entulhos de const. civil e detritos vegetais
4ª CAMADA	Argila pouco siltosa	-	-	-	Argila siltosa com fragmentos vegetais
5ª CAMADA	Silte argiloso com fragmentos de rocha	-	-	-	Argila plástica siltosa

Como os furos de sondagem são investigações pontuais, não se pode afirmar como é a constituição do solo entre os furos. Entretanto, com base nas sondagens e no levantamento topográfico realizados, foram elaborados seis possíveis perfis geológicos geotécnicos entre os prováveis para área, sendo quatro longitudinais e dois transversais (Figura 16).

O Perfil 3-7-12 (Figura 28) é constituído basicamente por três tipos de material: argila, em sua maior parte, com faixas de material silto e arenoso. A primeira camada entre os furos

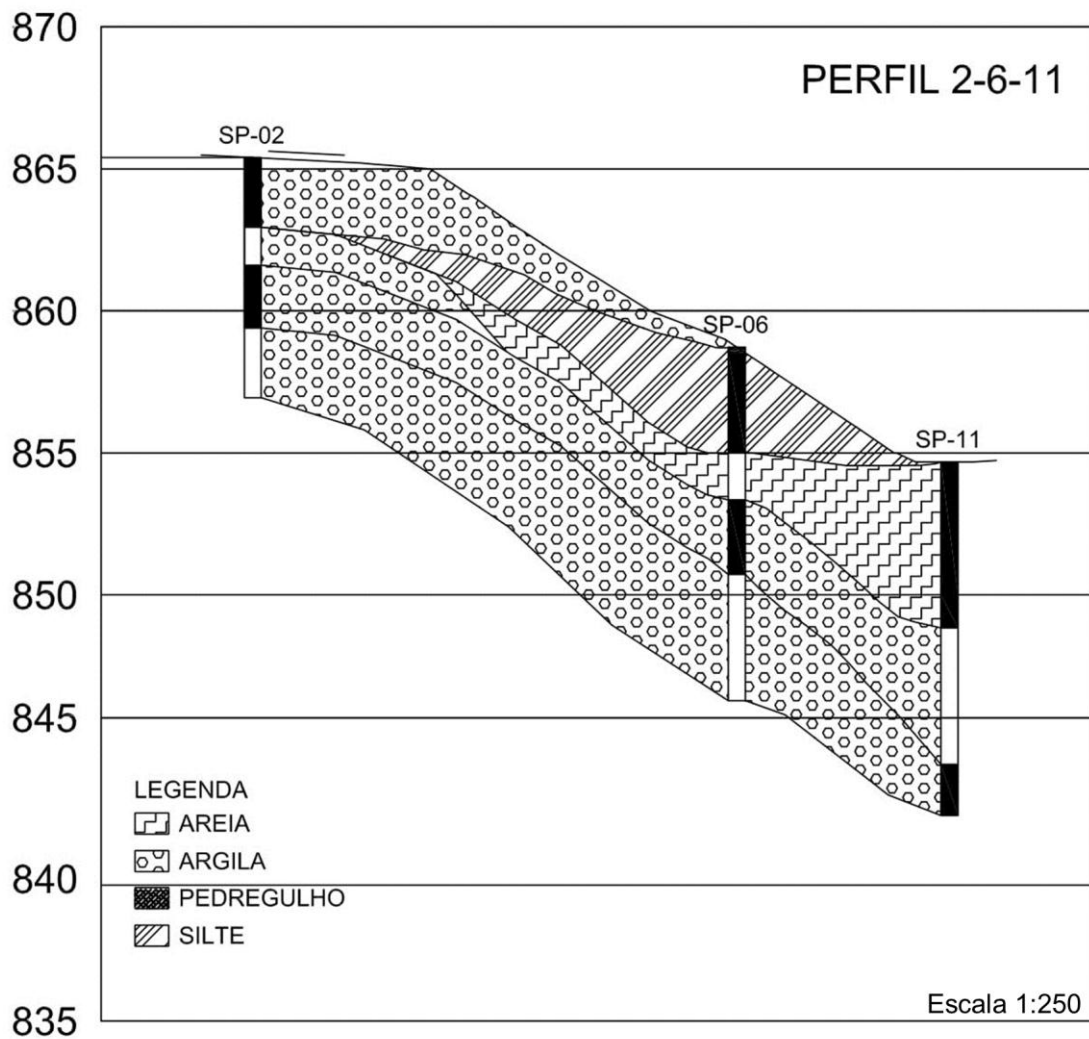
SP03 e SP07 é de transição entre argila e silte; a segunda é constituída por areia; e as demais por argila. Entre os furos SP07 e SP12, a primeira camada é de silte, a segunda, areia; e as demais de argila.

Figura 28: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 3-7-12.



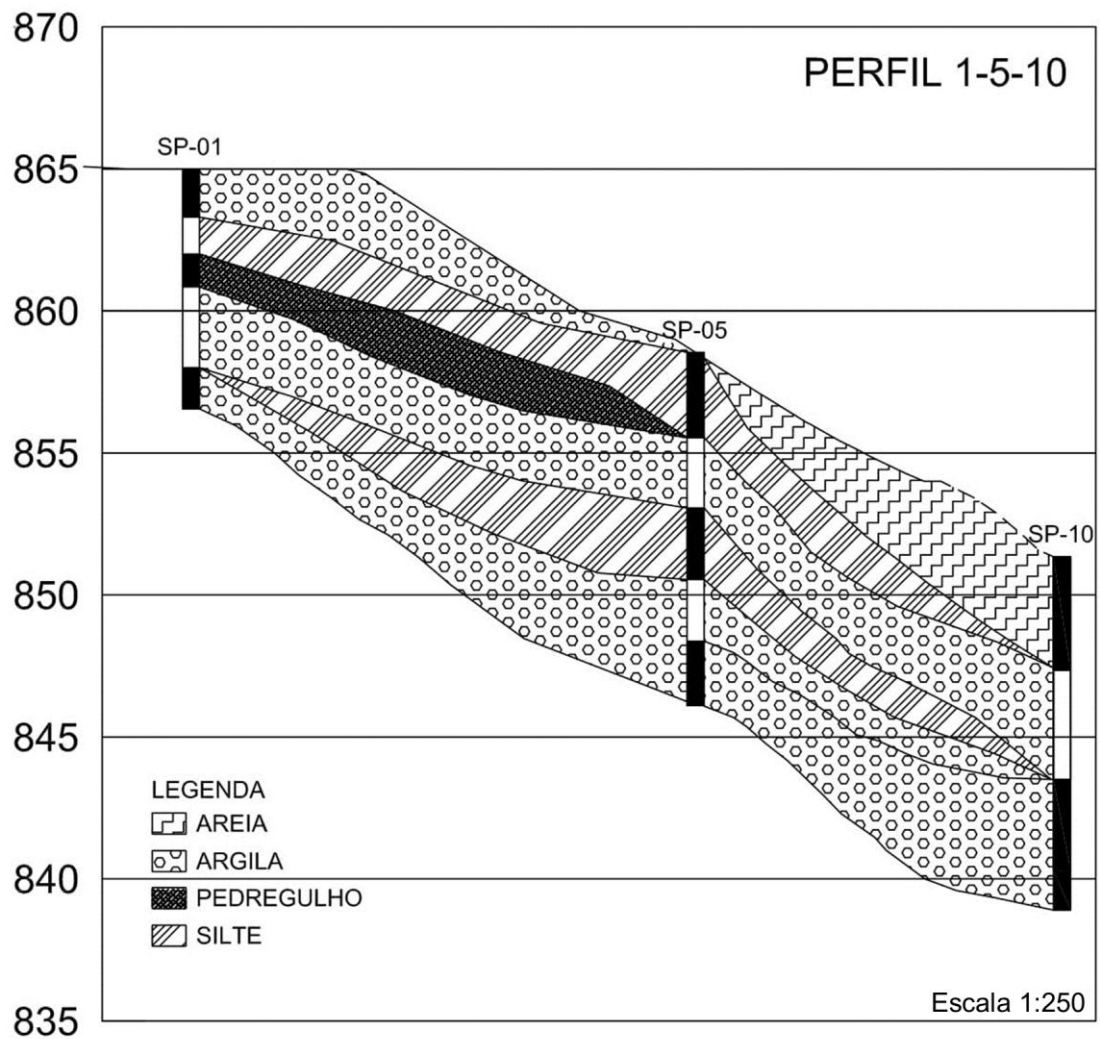
O Perfil 2-6-11 (Figura 29), de forma semelhante ao anterior, é constituído basicamente por material argiloso, em sua maior parte, siltoso e arenoso. A primeira camada entre os furos SP02 e SP06 é de transição entre os dois materiais finos (silte e argila); a segunda, também de transição, entre argila e areia; e as demais por material argiloso. Entre os furos SP06 e SP11, a primeira camada é constituída por silte, a segunda camada é arenosa e as demais por argila.

Figura 29: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 2-6-11.



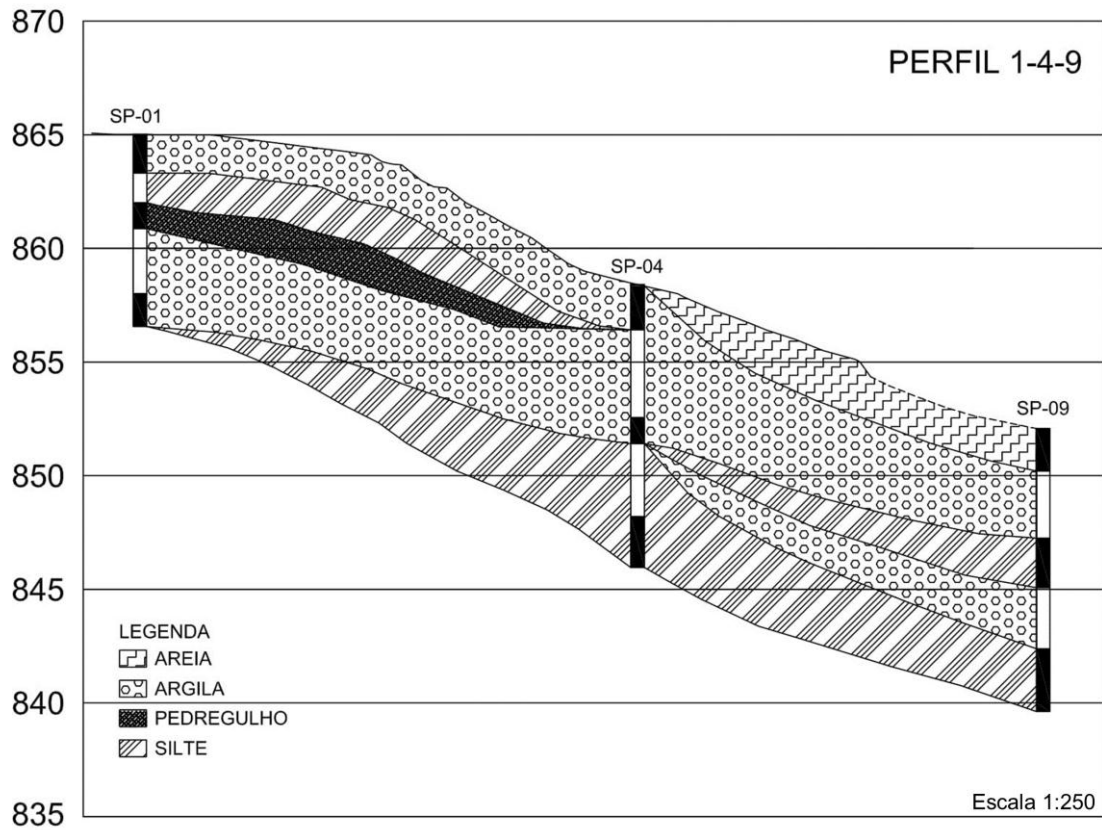
O Perfil 1-5-10 (Figura 30) é um dos mais heterogêneos dentre os elaborados, uma vez que há tanto a presença de materiais finos, como silte e argila, quanto de materiais granulares de diferentes dimensões, como areia e pedregulhos rochosos. Entre os furos SP01 e SP05, as duas primeiras camadas são constituídas por materiais finos: a primeira por argila e a segunda por silte; a terceira por materiais granulares (pedregulhos rochosos); e as demais novamente por finos: a quarta e a sexta por argila e a quinta por silte. Entre os furos SP05 e SP10, a primeira camada por areia e as demais por materiais finos intercalados nesta sequência: silte, argila, silte e argila.

Figura 30: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 1-5-10.



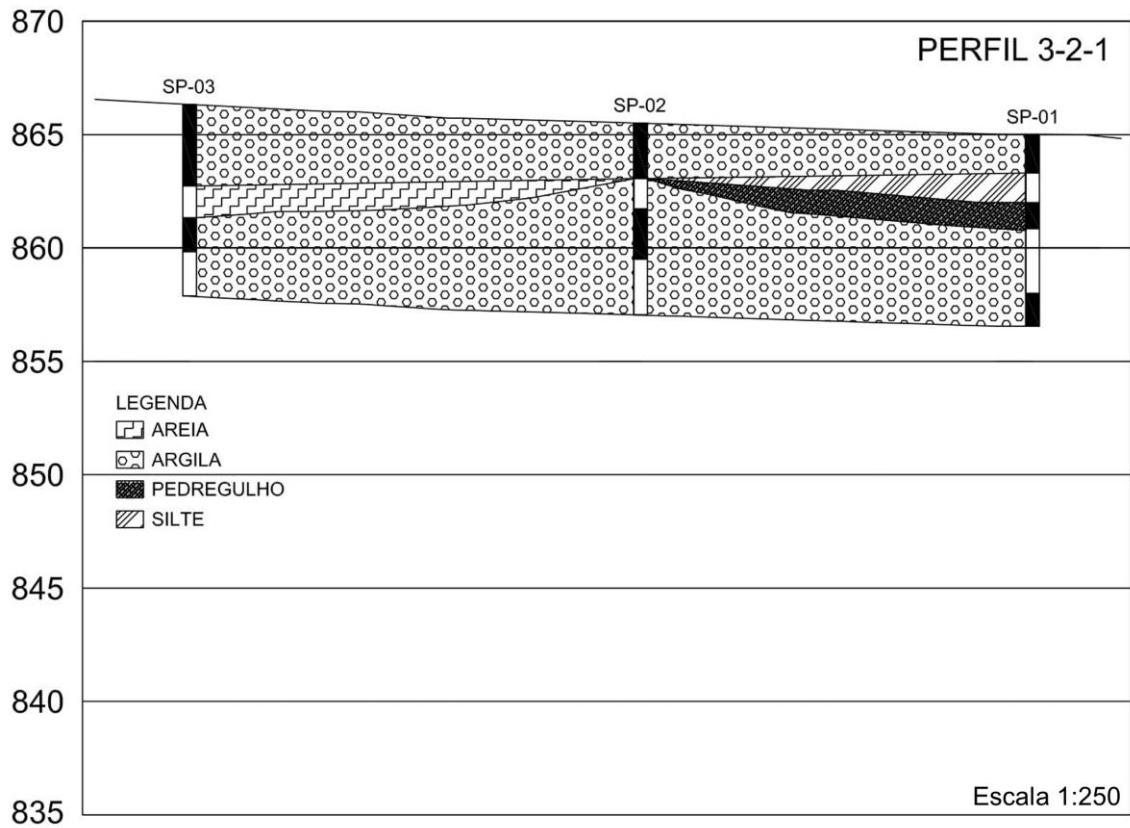
Assim como o anterior, o Perfil 1-4-9 (Figura 31) também é bastante heterogêneo, sendo constituído por diferentes materiais como silte, argila, areia e pedregulhos rochosos. Entre os furos SP01 e SP04, temos as duas primeiras camadas constituídas por finos, sendo a primeira de argila e a segunda de silte; uma camada de pedregulhos rochosos; uma espessa camada de argila, seguida de uma de silte. Já entre os furos SP04 e SP09, temos a primeira camada de areia e as demais por argila e silte intercalados.

Figura 31: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 1-4-9.



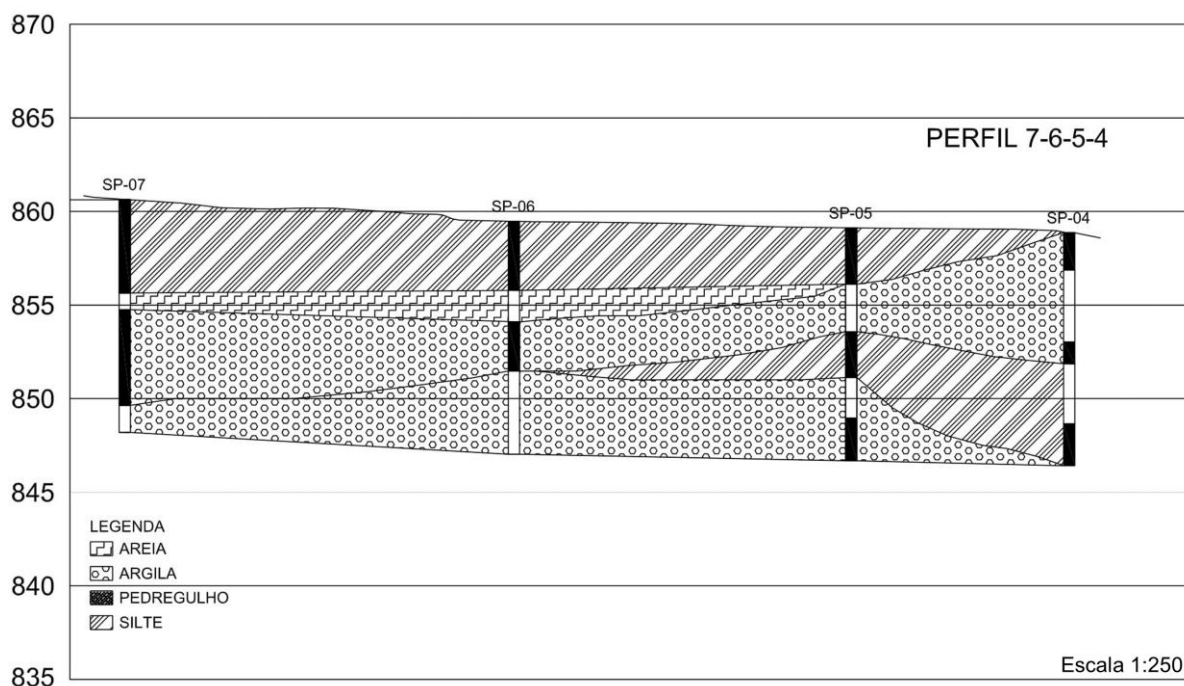
O Perfil 3-2-1 (Figura 32), localizado na rua, é constituído basicamente por duas grandes camadas de argila preenchidas com faixas de areia (entre os furos SP03 e SP02) e silte e pedregulhos rochosos (entre os furos SP02 e SP01).

Figura 32: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 3-2-1.



O Perfil 7-6-5-4 (Figura 33) tem sua primeira camada constituída basicamente por silte; seguida de uma pequena camada de areia (entre os furos SP07 e SP06 e SP06 e SP05); uma de argila (terceira camada entre SP07 e SP06 e SP06 e SP05, e segunda entre SP05 e SP04), novamente uma de silte (apenas entre SP06 e SP05 e SP05 e SP04), finalizando com uma de argila, entre todos os furos.

Figura 33: Possível perfil geotécnico para a área de estudo: Perfil 7-6-5-4.



O local de estudo compreende uma área limitada entre as duas primeiras sequências de furos, mais precisamente entre os furos SP01, SP02, SP03, SP04, SP05, SP06 e SP07. As primeiras camadas entre SP03 e SP07; SP02 e SP06; SP01 e SP05 são de transição entre argila e silte, enquanto que não há variação de material entre os furos SP01 e SP04. Não há variação transversal entre as primeiras camadas de SP01, SP02 e SP03, uma vez que todas são constituídas por argila, enquanto que há pouca variação de material na primeira camada da segunda sequência de furos: apenas entre os furos SP05 e SP04, onde há transição de silte para argila.

Nota-se também através das sondagens, que apenas em quatro (SP0, SP07, SP08 e SP13) dos treze furos de sondagem não foram detectada a presença de pedregulhos nas primeiras camadas. Em outras camadas também foram encontradas detritos e fragmentos vegetais, fragmentos tecnogênicos, laminações de areia fina e entulhos de construção civil.

4.3. Investigação geofísica

4.3.1. Período seco

Houve variação das distâncias percorridas nos perfis investigados, devido às condições físicas do trajeto realizado com o GPR, conforme pode ser observado na Tabela 15. O menor perfil é o PL09, com 5,15 m, e os maiores, o PL08 e o PL21, com 7,05 m cada.

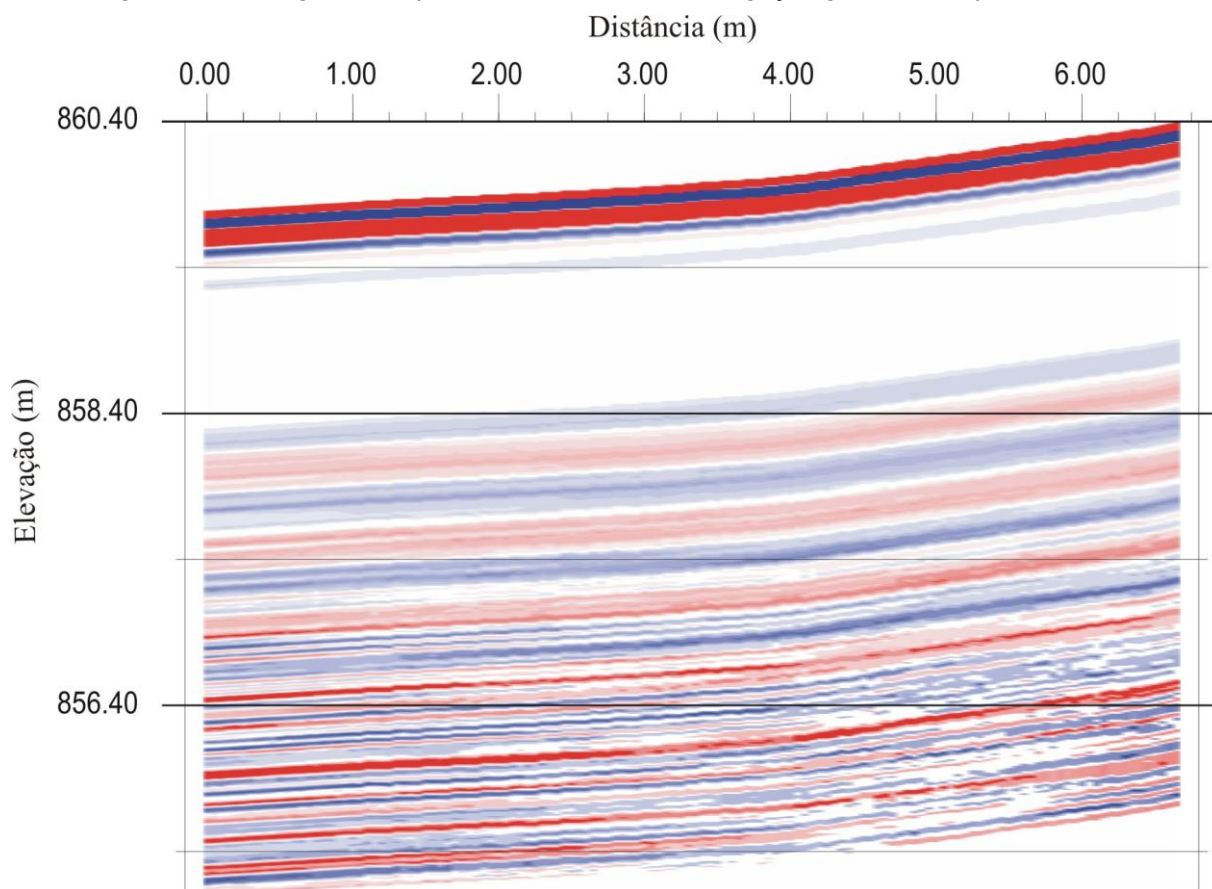
Tabela 15: Distâncias percorridas pelo GPR nos perfis longitudinais investigados nos período seco.

	Dist. Ponto A (m)	Dist. Percorrida (m)	Perfil	Dist. Ponto A (m)	Dist. Percorrida (m)
PL01	0	6,65	PL20	19	6,05
PL02	1	6,45	PL21	20	7,05
PL03	2	6,55	PL22	21	6,65
PL04	3	6,65	PL23	22	6,75
PL05	4	6,85	PL24	23	6,85
PL06	5	6,75	PL25	24	6,55
PL07	6	6,95	PL26	25	6,55
PL08	7	7,05	PL27	26	6,45
PL09	8	5,15	PL28	27	6,25
PL10	9	5,75	PL29	28	6,65
PL11	10	5,85	PL30	29	6,85
PL12	11	5,95	PL31	30	6,95
PL13	12	5,95	PL32	31	6,35
PL14	13	6,05	PL33	32	6,65
PL15	14	6,35	PL34	33	6,75
PL16	15	5,85	PL35	34	6,55
PL17	16	5,85	PL36	35	6,85
PL18	17	6,25	PL37	36	6,65
PL19	18	6,35	PL38	37	6,65

Mesmo com a mudança dos parâmetros utilizados na obtenção destes dados e após o processamento, os radargramas tiveram poucas reflexões nítidas e baixa profundidade de penetração. Como esse comportamento ocorreu em todos os perfis longitudinais investigados no período seco, optou-se por apresentar apenas um deles.

Nota-se pela Figura 34 que o radargrama possui reflexões até a profundidade de 12 ns ou 0,31 m. Abaixo disso nenhuma reflexão nítida é observada, apenas ruídos. Estas reflexões de comportamento retilíneo que aparecem no radargrama são correspondentes apenas às ondas diretas, não obtendo nenhuma informação da subsuperfície.

Figura 34: Radargrama do perfil PL01 obtido na investigação geofísica no período seco.



Sendo assim, houve novamente a modificação dos parâmetros a serem utilizados na próxima investigação geofísica. Para auxiliar na definição dos parâmetros, foram realizados testes nas configurações do GPR variando alguns destes parâmetros, buscando compreender a causa da má qualidade dos dados e baixa profundidade de penetração da onda até então obtidos.

4.3.2. Teste de configurações

Os nove perfis investigados durante estes testes tiveram pouca variação na distância percorrida com o equipamento, uma vez que o local estava livre de qualquer obstrução no caminho. O primeiro perfil, Perfil A, utilizou as mesmas configurações das utilizadas na investigação geofísica no período seco. O Perfil B, com relação ao Perfil A, variou o parâmetro *Samples*; do Perfil C ao Perfil G houve a variação do parâmetro *Stacking*, com relação ao Perfil B, e nos Perfil H e Perfil I variamos o parâmetro *Scan/Unit*, o primeiro com relação D e o segundo com relação ao Perfil E, conforme pode ser observado na Tabela 16.

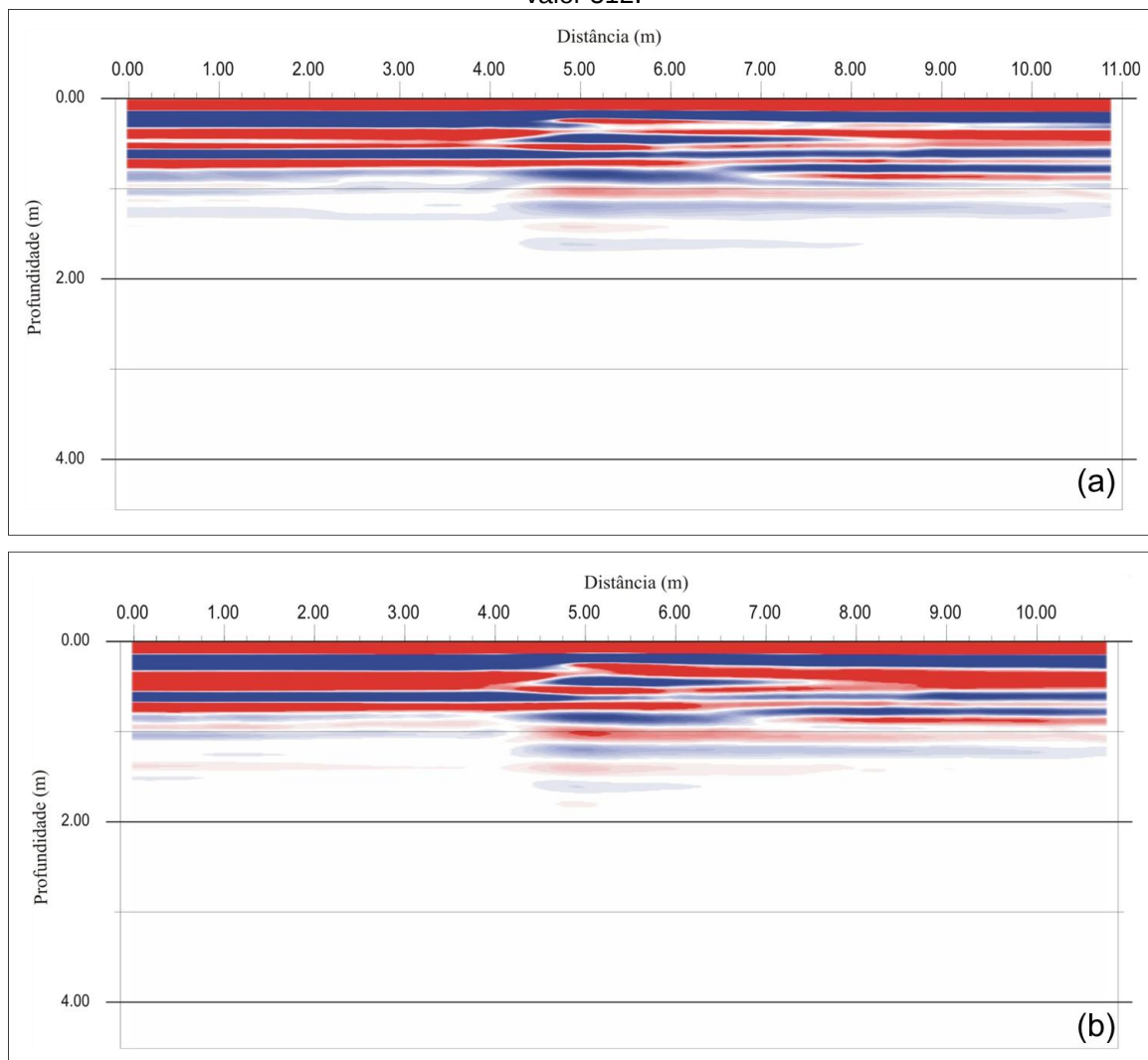
Tabela 16: Parâmetros variados, valores utilizados e distâncias percorridas pelo GPR no teste de configurações.

Perfil	Parâmetro variado	Comparação	Valor utilizado	Dist. Percorrida (m)
Perfil A	-	-	Período Seco	10,85
Perfil B	<i>Samples</i>	Perfil A	512	10,75
Perfil C	<i>Stacking</i>	Perfil B	0	10,75
Perfil D	<i>Stacking</i>	Perfil B	3	10,75
Perfil E	<i>Stacking</i>	Perfil B	5	10,75
Perfil F	<i>Stacking</i>	Perfil B	10	10,75
Perfil G	<i>Stacking</i>	Perfil B	32	10,75
Perfil H	<i>Scan/Unit</i>	Perfil D	50	10,62
Perfil I	<i>Scan/Unit</i>	Perfil E	100	10,71

A variação do parâmetro *Samples*, que está diretamente relacionado com a resolução vertical, pode ser comparada entre o Perfil A e o Perfil B, onde os valores utilizados foram, respectivamente, 1024 e 512, que são geralmente os valores recomendados e utilizados em equipamentos da GSSI.

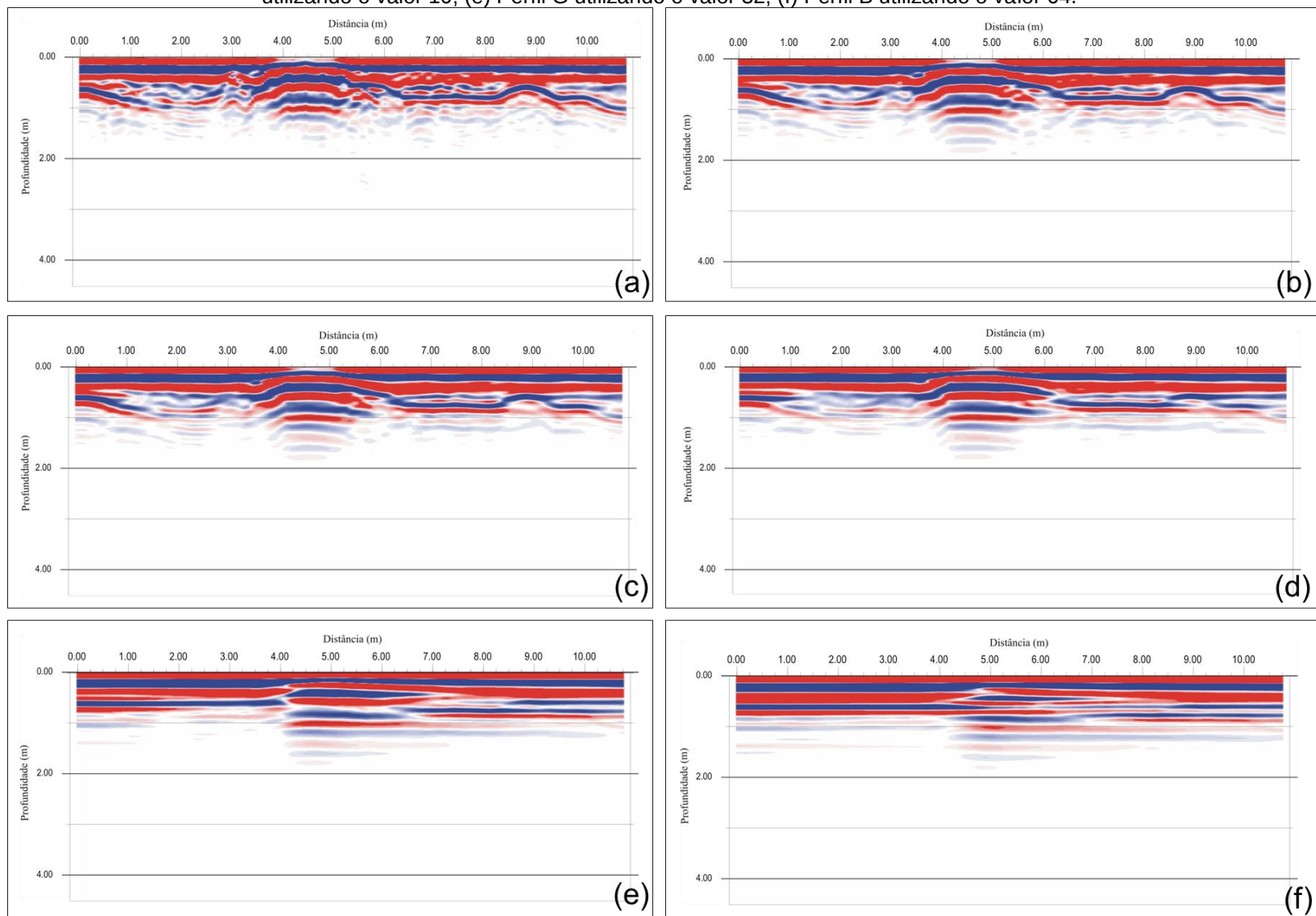
Nota-se através da Figura 35, que as reflexões do primeiro perfil (Figura 35a) são mais intensas (cores mais fortes) que as do segundo perfil (Perfil 35b).

Figura 35: Variação do parâmetro *Samples*: (a) Perfil A utilizando o valor 1024; (b) Perfil B utilizando o valor 512.



A variação do parâmetro *Stacking* pode ser comparada entre os Perfis C, D, E, F, G e B, com o aumento gradativo dos valores; os demais parâmetros permaneceram inalterados. Os valores utilizados esses perfis foram, respectivamente, 0, 3, 5, 10, 32 e 64. Este é um parâmetro que não é mencionado nas recomendações do Manual, sendo necessária a realização de mais testes de variação de valor. Os radargramas resultantes do teste deste parâmetro estão representados na Figura 36.

Figura 36: Variação do parâmetro Stacking: (a) Perfil C utilizando o valor 0; (b) Perfil D utilizando o valor 3; (c) Perfil E utilizando o valor 5; (d) Perfil F utilizando o valor 10; (e) Perfil G utilizando o valor 32; (f) Perfil B utilizando o valor 64.



Nota-se através da Figura 36 que a variação crescente dos valores do parâmetro *Stacking* implica em uma suavização das reflexões, as deixando mais horizontais à medida que o seu valor aumenta. Os valores de *Stacking* utilizados nos ensaios preliminares e investigação no período seco foram, respectivamente, 32 e 64, semelhantes à Figura 36e e Figura 36f.

Os resultados do teste com a variação deste parâmetro explicam a má qualidade dos dados coletados em campo nas duas primeiras investigações com o GPR, cujos radargramas continham poucas reflexões, todas suavizadas pelos altos valores do *Stacking*.

A última variação foi do parâmetro *Scan/Unit*, que está diretamente relacionada com a resolução horizontal, pode ser comparada entre os Perfis D e H, onde o primeiro utilizou o valor 20 e o segundo, 50; e os Perfis E e I, onde a variação foi, respectivamente, de 20 para 100. Os radargramas gerados nestes testes estão representados nas Figuras 37 e 38.

Figura 37: Variação do parâmetro *Scan/unit*: (a) Perfil D utilizando o valor 20; (b) Perfil H utilizando o valor 50.

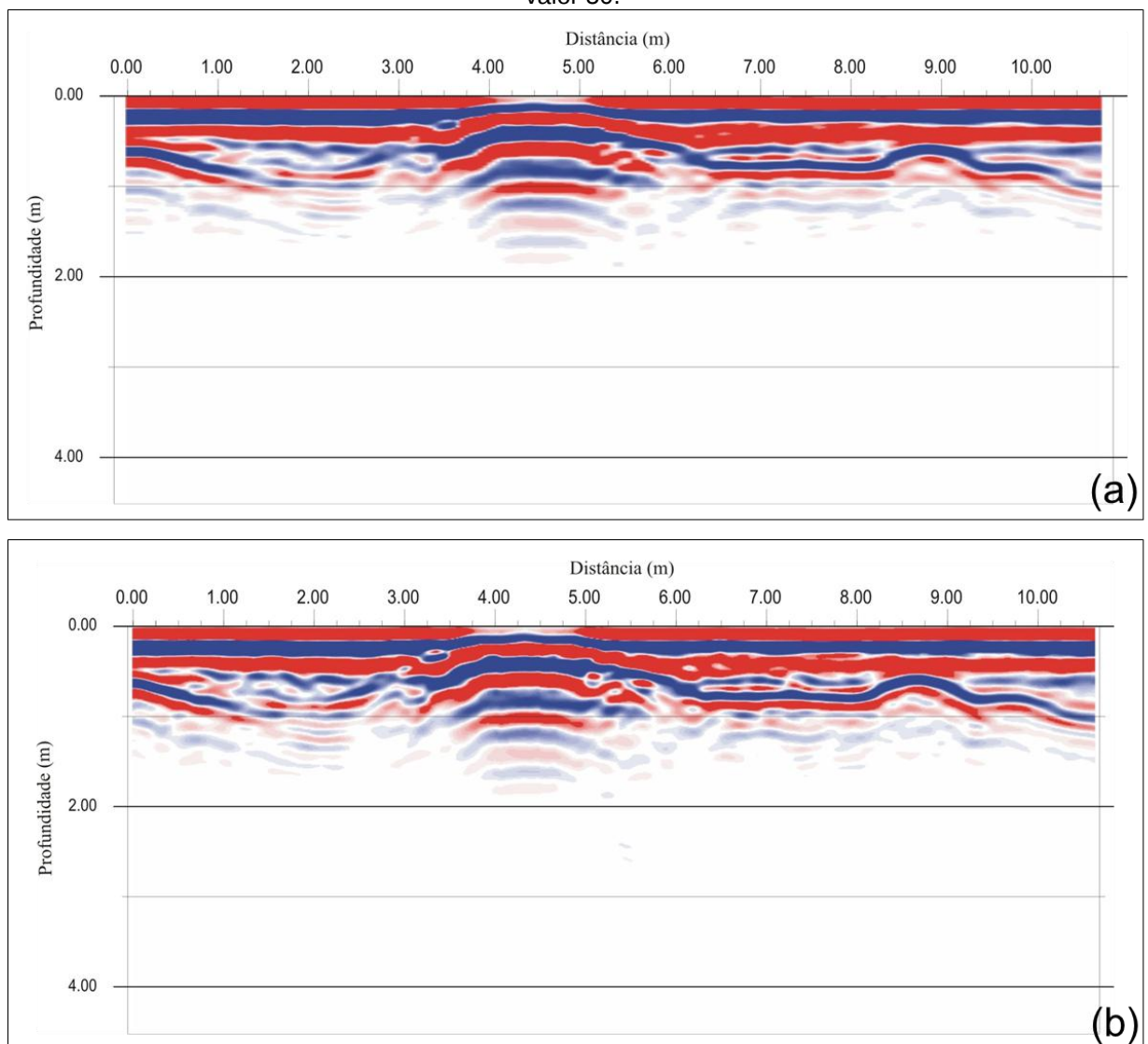
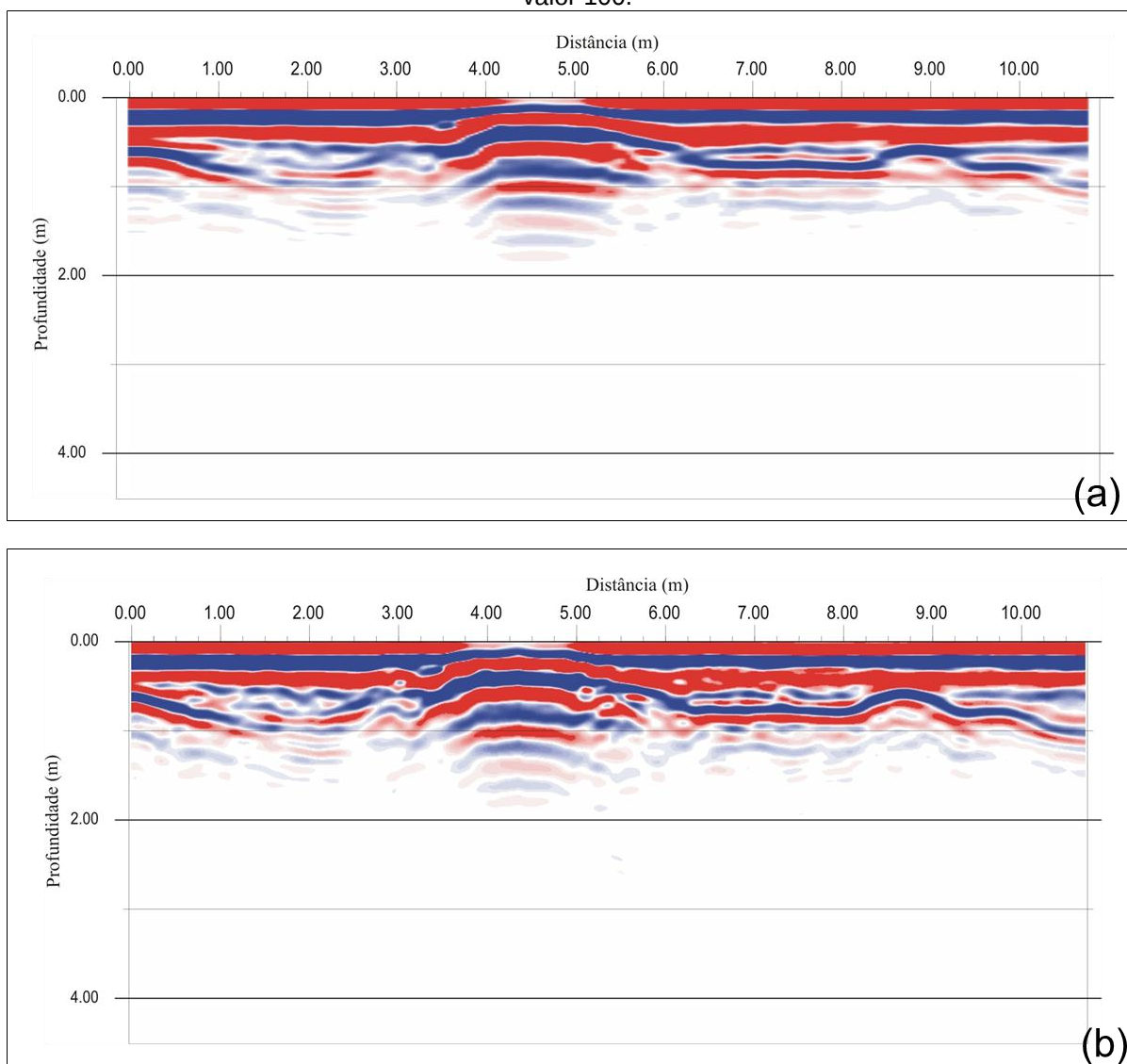


Figura 38: Variação do parâmetro Scan/unit: (a) Perfil E utilizando o valor 20; (b) Perfil I utilizando o valor 100.



Verifica-se através das Figuras 37 e Figura 38 que o aumento do valor do parâmetro implica na melhoria da resolução horizontal, ou seja, quanto maior o valor do *Scan/unit* maior o detalhamento obtido da subsuperfície. O Perfil H (Figura 37b), que utilizou o valor 50, possui mais detalhes que o Perfil D (Figura 37a), que utilizou o valor 20.

Isto fica ainda mais evidente quando a diferença entre os valores é grande, que é o caso dos testes representados na Figura 38, entre os Perfis I (Figura 38b) e Perfil E (Figura 38a), onde foram utilizados os valores de 100 e 20, respectivamente, para o parâmetro.

Com base nos resultados do teste de configurações foram definidos os valores dos parâmetros a serem utilizados na investigação do período úmido: *Samples* 512; *Stacking* 0 e *Scans/unit* 100. Os demais parâmetros frequência central da antena (200 MHz), *range* (200

ns), T_{rate} (100 KHz), modo de aquisição e orientação das antenas seguiram inalterados com relação à investigação do período seco.

4.3.3. Período úmido

A variação das distâncias percorridas pelo GPR nos perfis investigados está representada pelas Tabelas 17 e 18. O perfil longitudinal de menor comprimento foi o PL09, com 4,55 m, e o maior foi o PL04, com 7,35 m. Os perfis transversais investigados possuem praticamente o mesmo comprimento, aproximadamente 37,0 m, já que atravessam todos os perfis longitudinais, exceto o PT04, que possui aproximadamente 28,0 m, devido à imposição física da barreira existente na via.

Tabela 17: Distâncias percorridas pelo GPR nos perfis longitudinais investigados nos período úmido.

Perfil	Dist. Ponto A (m)	Dist. Percorrida (m)	Perfil	Dist. Ponto A (m)	Dist. Percorrida (m)
PL01	0	6,83	PL20	19	5,95
PL02	1	6,95	PL21	20	6,63
PL03	2	7,31	PL22	21	6,83
PL04	3	7,35	PL23	22	7,31
PL05	4	5,91	PL24	23	6,83
PL06	5	6,87	PL25	24	6,91
PL07	6	6,95	PL26	25	6,11
PL08	7	7,31	PL27	26	7,07
PL09	8	4,55	PL28	27	7,11
PL10	9	5,87	PL29	28	7,19
PL11	10	5,75	PL30	29	7,27
PL12	11	6,43	PL31	30	7,11
PL13	12	6,03	PL32	31	7,27
PL14	13	5,79	PL33	32	6,91
PL15	14	5,99	PL34	33	7,03
PL16	15	5,75	PL35	34	6,55
PL17	16	5,43	PL36	35	7,11
PL18	17	6,15	PL37	36	7,11
PL19	18	5,99	PL38	37	6,51

Tabela18: Distâncias percorridas pelo GPR nos perfis transversais investigados nos período úmido.

Perfil	Local	Dist. Percorrida (m)
PT01	Base do talude. Sentido → . 0,65 m da referência.	37,06
PT02	Meio corpo talude. Sentido → 3,70 m da referência.	36,94
PT03	Calçada. Sentido →. 0,90 m da contensão.	36,99
PT04	Rua próximo à calçada. Sentido →. 2,52m da contensão.	28,03

Os radargramas de todos os perfis investigados neste período se encontram no Apêndice B. Todos os perfis longitudinais (PL01 à PL39) estão com escala horizontal 1:50 e vertical 1:1, enquanto que os transversais (PT01 à PT04) estão em escala horizontal 1:200 e vertical 1:1.

Conforme pode se observar no referido apêndice, todos os radargramas dos perfis obtidos possuem uma aparência comum: possuem reflexões fortes e visíveis até, aproximadamente, 1,20 m de profundidade; entre 1,20 m e 2,0 m aparece uma “faixa branca” de atenuação do sinal, onde as reflexões presentes nesta zona são visivelmente mais fracas que as mais superficiais; e a partir de 2,0 m não há mais visibilidade das reflexões, uma vez que foram encobertas pelos ruídos existentes no local.

Serão apresentados nessa parte, os perfis obtidos nas regiões críticas do talude. São eles: os perfis de PL09 à PL18, que estão localizados na cicatriz de escorregamento existente no talude; os perfis entre PL30 e PL 38, contidos na grande rachadura presente na calçada; e os todos os perfis transversais (PT01 à PT04).

A Figura 39 apresenta os perfis PL09, PL10, PL11 e suas respectivas interpretações. Em todos eles há reflexões curvadas para cima (linhas cheias pretas) coincidentes no início (base do talude) dos perfis investigados. Demais reflexões de comportamento semelhante estão presentes ao longo da extensão destes perfis que, em alguns momentos, tendem a se conectar, como a partir de 2,30 m do PL09 e 3,0 m do PL11.

Nestes perfis também ocorrem interrupções, ora verticalizadas, ora inclinadas, nas reflexões presentes, que estão indicadas por linhas pontilhadas na cor verde. Geralmente estas interrupções vêm acompanhadas de inversão de polaridade da onda (representadas pelas cores azul e vermelha no radargrama). Em outros momentos estas “falhas” mostram pequenos deslocamentos verticais.

O perfil PL10 possui em, aproximadamente, 4,70 m de distância de seu início, uma reflexão repetitiva em profundidade (tracejado rosa), típica de objetos. Em PL11 também ocorrem duas reflexões repetitivas (tracejado rosa) entre 1,20 e 3,0 m de distância, porém de comportamento diferentes: o da primeira reflexão é mais retilíneo, enquanto que o da segunda é irregular.

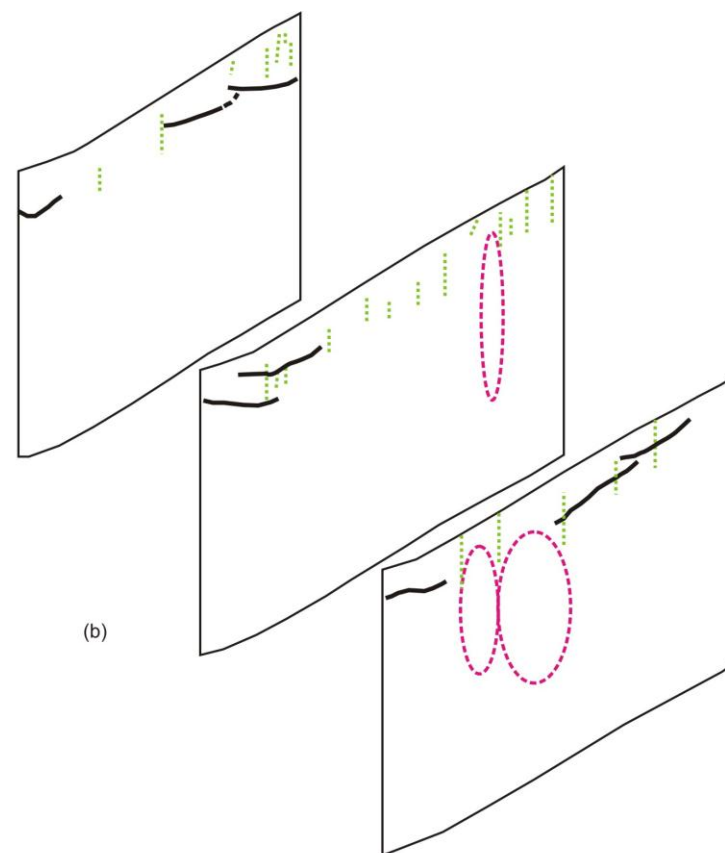
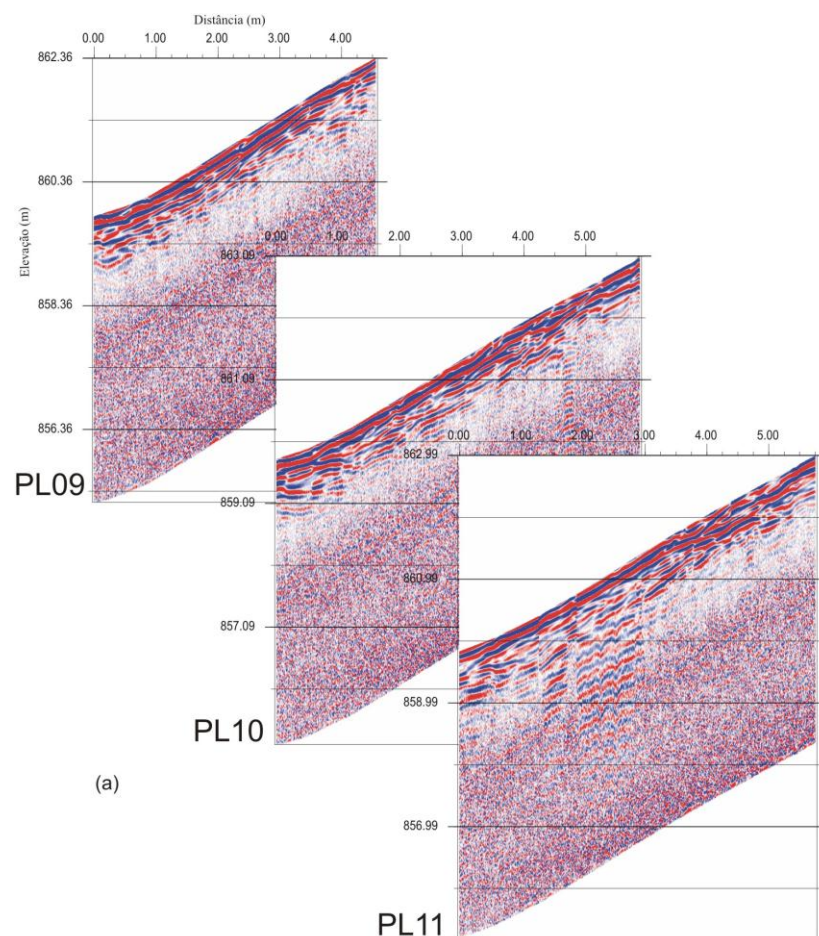
Os perfis PL12, PL13 e PL14 (Figura 40) possuem, de forma semelhante aos anteriores, as reflexões curvadas (linhas cheias pretas) no início de seus perfis. Ao longo destes perfis há diversas reflexões, de diferentes comprimentos, mas de mesmo comportamento (curvadas para cima), que se conectam em alguns pontos. Nota-se que este tipo de reflexão foi mais recorrente nestes perfis (PL12, PL13 e PL14) que nos anteriores.

As interrupções das reflexões (pontilhado verde) seguem presentes nestes perfis. A aproximadamente 2,0 m de distância do início da investigação de PL12, uma reflexão mais forte (tracejado roxo), indicando mudança das características do material naquela região.

Através da Figura 41 nota-se que os perfis PL15, PL16, PL17 e PL18 também possuem a típica reflexão curvada (linha cheia preta) no início da investigação existente em todos os perfis da cicatriz (PL09 à PL18). Demais reflexões de mesmo comportamento (curvadas para cima) estão presentes ao longo da extensão de cada um destes perfis, sendo que algumas se conectam umas as outras.

Assim como os demais perfis anteriores, há bastantes pontos de interrupções das reflexões contínuas (pontilhados verdes) distribuídas ao longo dos perfis investigados.

Figura 39: Perfis PL09, PL10 e PL11 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.



Legenda:

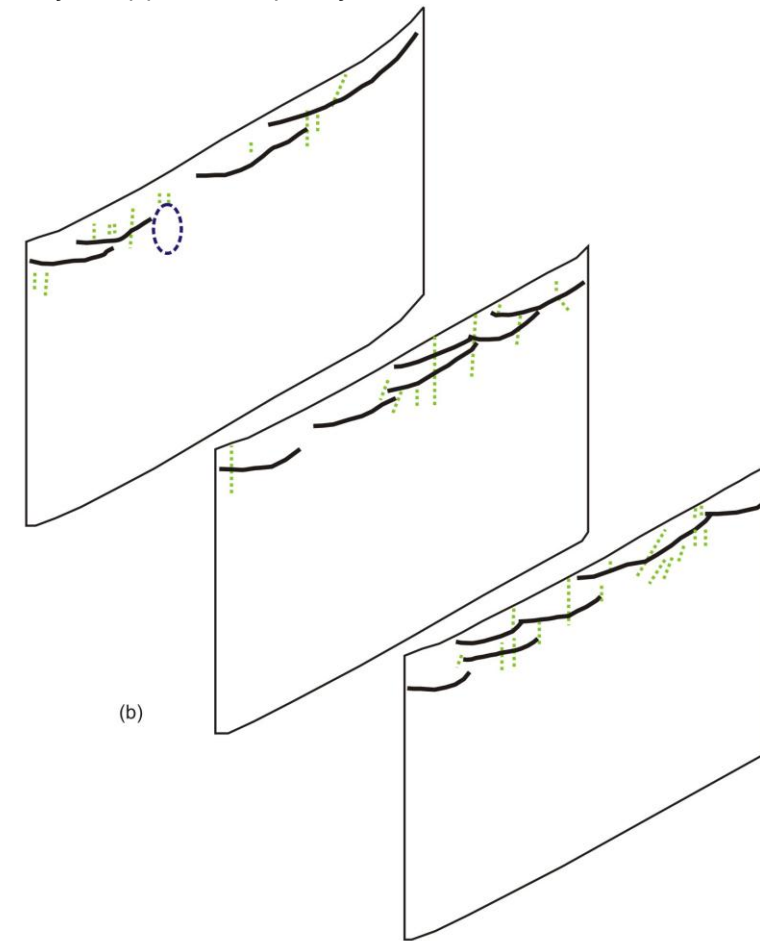
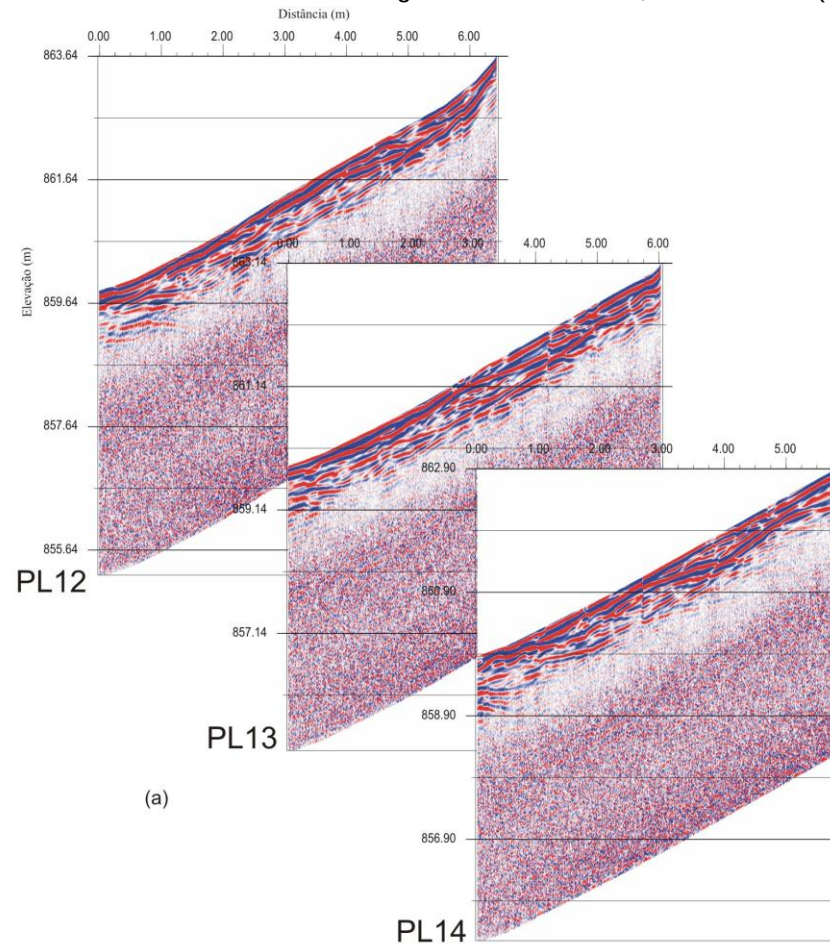
— Reflexões curvadas para cima (superfícies de ruptura)

○ Reflexões repetitivas (material não condutor)

/// Descontinuidade de reflexões (processos de movimentação do talude ou movimentação do GPR)

○ Reflexão mais intensa (mudança de característica do material)

Figura 40: Perfis PL12, PL13 e PL14 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.



Legenda:

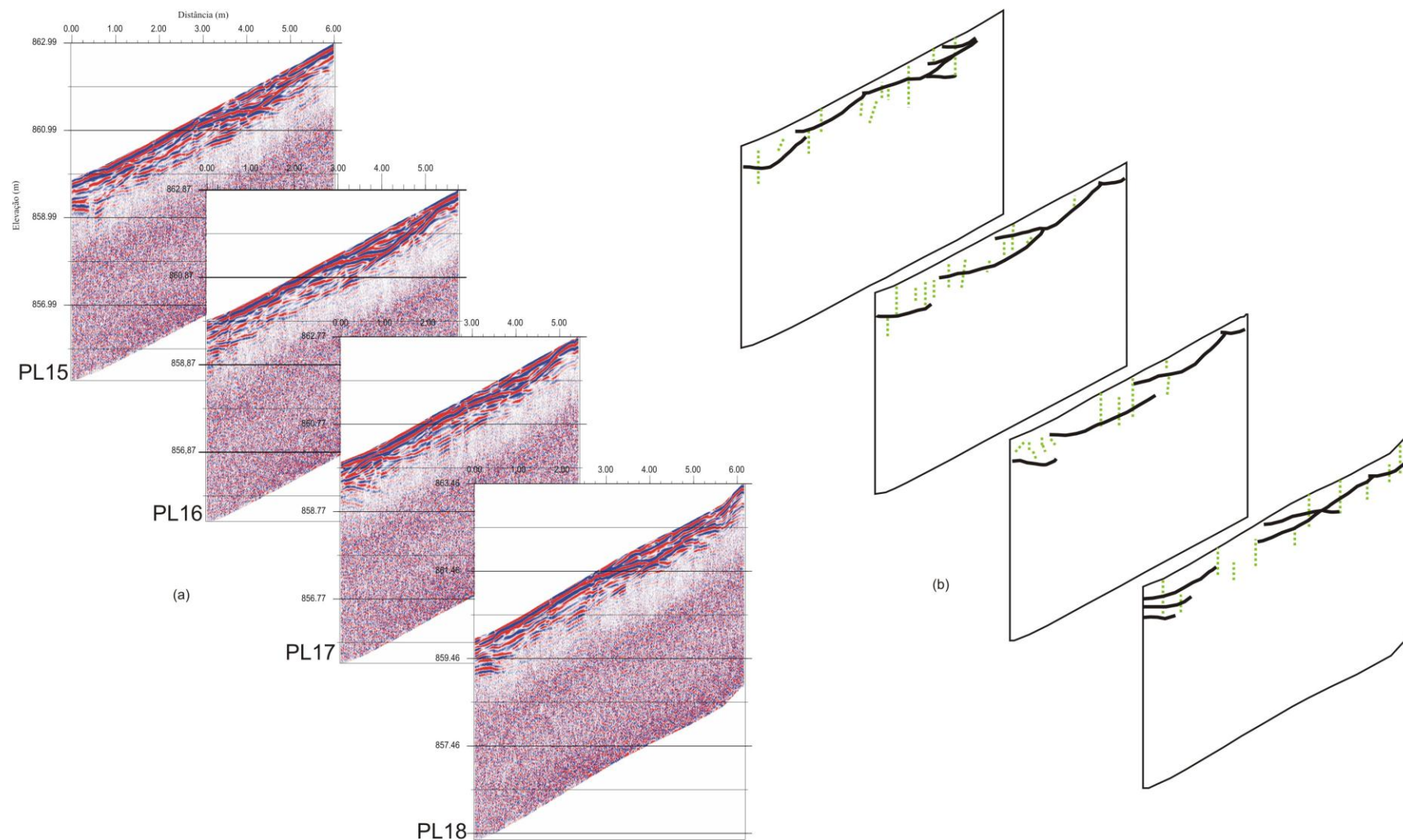
— Reflexões curvadas para cima (superfícies de ruptura)

○ Reflexões repetitivas (material não condutor)

/// Descontinuidade de reflexões (processos de movimentação do talude ou movimentação do GPR)

○ Reflexão mais intensa (mudança de característica do material)

Figura 41: Perfis PL15, PL16, PL17 e PL18 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.



A Figura 42 apresenta os perfis PL30, PL31 e PL32 e suas interpretações. Nota-se que não há mais as reflexões típicas no início dos perfis anteriores, porém esse comportamento (curvatura para cima – linha cheia preta) permanece nas demais reflexões existentes nos perfis. No perfil PL31 há a conexão dessas reflexões, a aproximadamente 5,0 m do seu início. Reflexões de menor intensidade são representadas por linhas tracejadas, conforme apresentada em PL31 e PL32.

Aparece em PL30 a, aproximadamente, 1,0 de distância do início da investigação uma reflexão de curvatura convexa (hipérbole), destacada em linha cheia preta, que pode indicar a presença de uma estrutura enterrada. Em PL32, a 1,5 m de distância, há uma reflexão acentuada indicando mudança das características do material naquele espaço. As interrupções (pontilhado verde) das reflexões contínuas seguem presentes nestes perfis.

Verifica-se, através da Figura 43, que os perfis PL33, PL34 e PL35 possuem a reflexão curvada para cima (linha cheia preta) no início de suas investigações. Diversas reflexões, de comportamentos e comprimentos variados, todas destacadas representadas por linhas cheias pretas, são encontradas nestes perfis.

O perfil PL33, a aproximadamente 6,0 m do início da sua investigação, apresenta uma reflexão mais intensa (tracejado roxo), indicando uma mudança na característica do material nessa região.

Nota-se também que há nestes perfis (PL33, PL34 e PL35) o aumento da frequência das interrupções (pontilhado verde) das reflexões contínuas se comparado a todos os perfis anteriores. O tamanho dessas interrupções também aumentou para este grupo de perfis.

Os perfis PL36, PL37, PL38 (Figura 44) possuem alta frequência dos pontos de interrupções (pontilhado verde) das reflexões contínuas, assim como o grupo de perfis anteriores (Figura 45).

Algumas das reflexões contínuas presentes ao longo destes perfis (linhas cheias pretas) possuem reflexões paralelas e de mesmo comportamento, no sentido da superfície, conforme pode ser observado nos perfis PL37 e PL38.

No início do perfil PL36 (aproximadamente 0,35 m de distância), identificou uma zona de reflexão mais intensa (pontilhado roxo); a 1,0 m uma reflexão de curvatura convexa (linha cheia rosa).

Figura 42: Perfis PL30, PL31 e PL32 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.

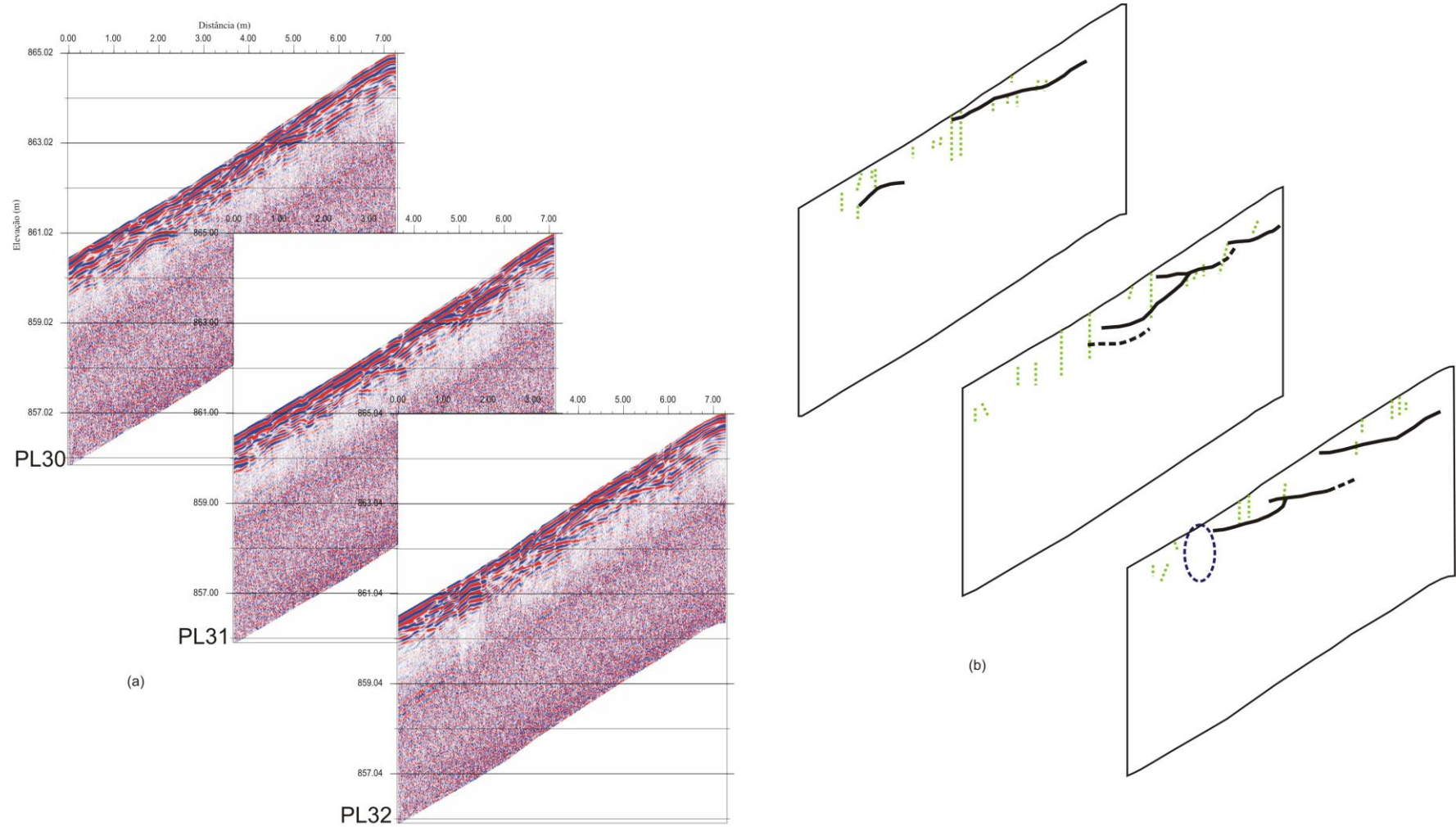
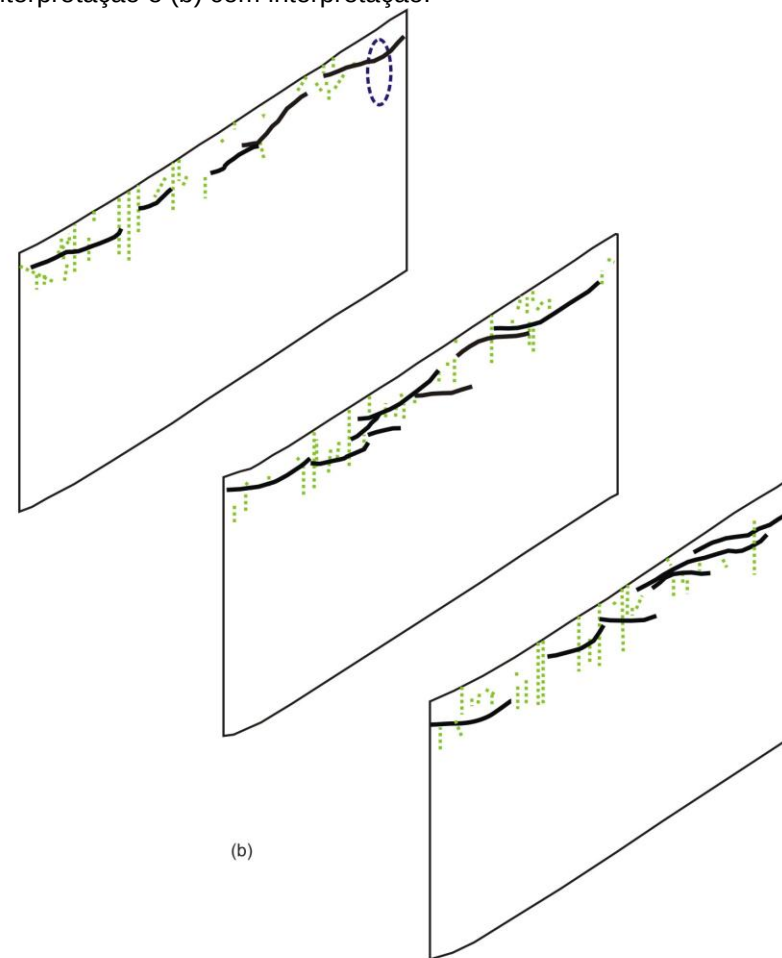
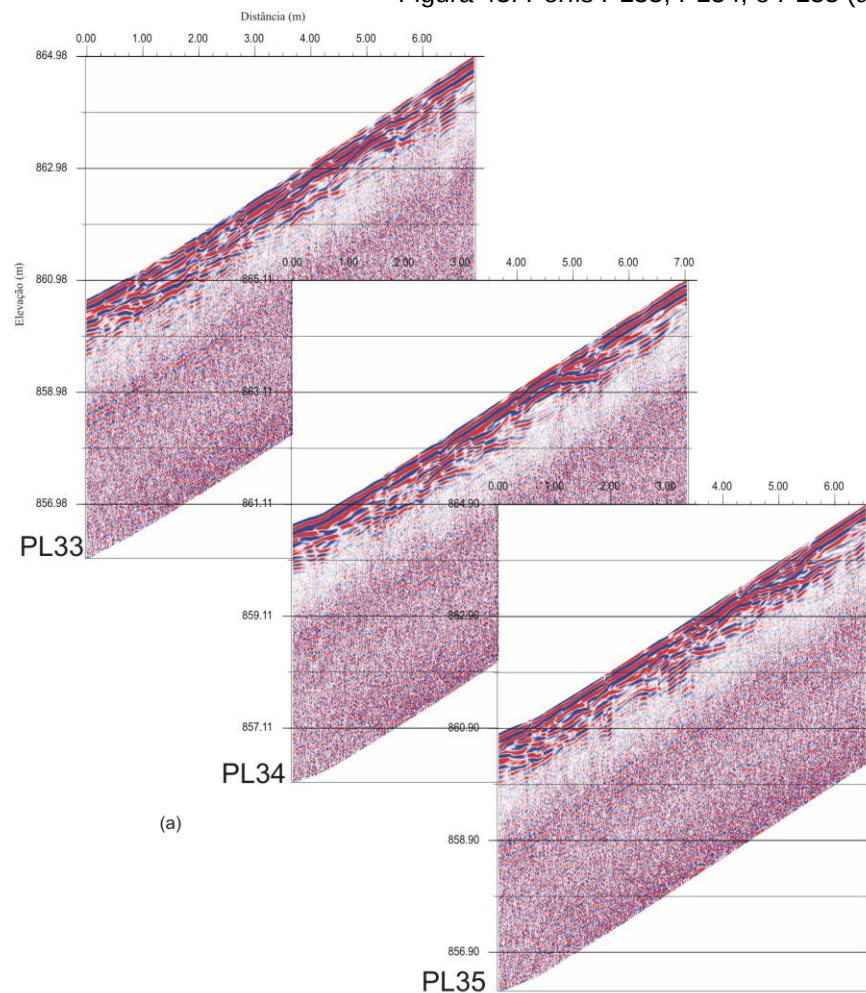


Figura 43: Perfis PL33, PL34, e PL35 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.

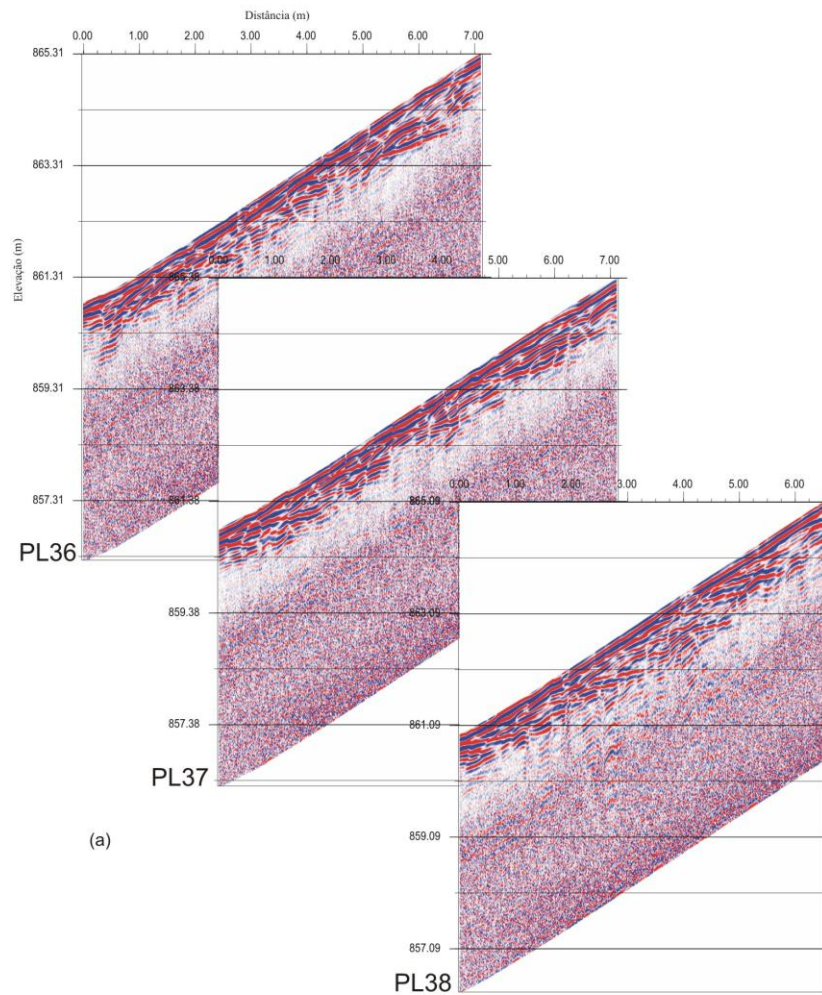


Legenda:

- Reflexões curvadas para cima (superfícies de ruptura)
- - - Tracejado (reflexões de menor intensidade)
- Reflexão curvada para baixo – hipérbole (estrutura enterrada)

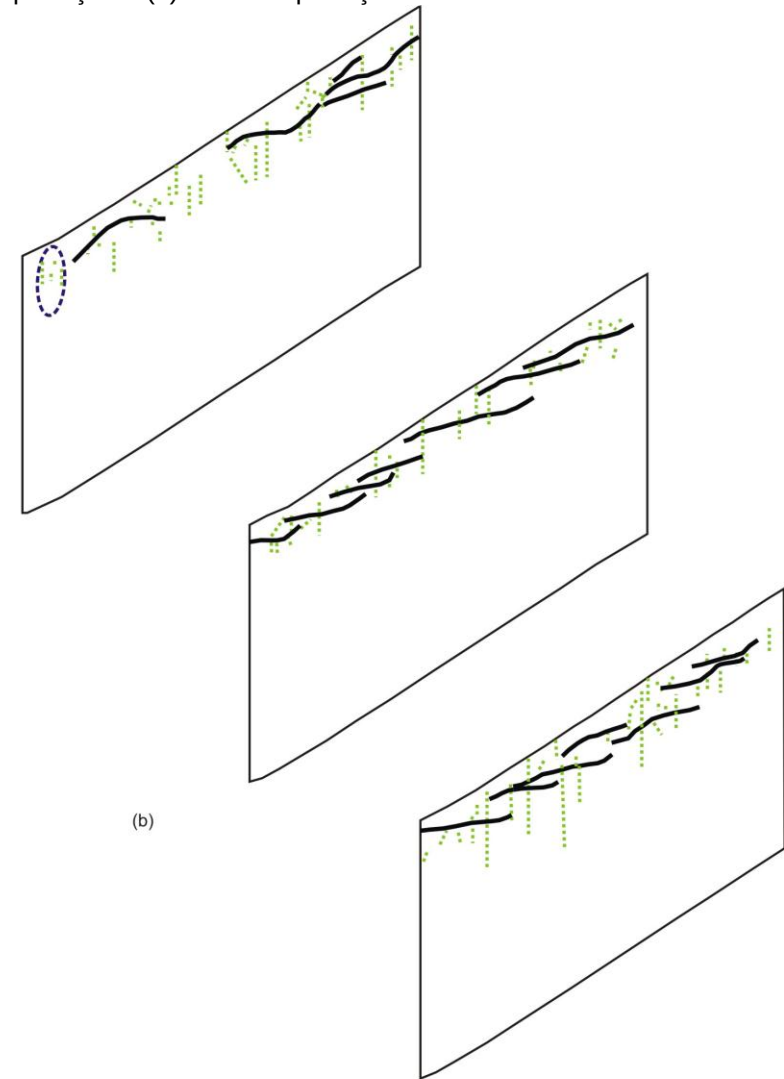
- Descontinuidade de reflexões (processos de movimentação do talude ou movimentação do GPR)
- Reflexão mais intensa (mudança de característica do material)

Figura 44: Perfis PL36, PL37 e PL38 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.



Legenda:

- Reflexões curvadas para cima (superfícies de ruptura)
- - - Tracejado (reflexões de menor intensidade)
- ⤿ Reflexão curvada para baixo – hipérbole (estrutura enterrada)



- ⋯ Descontinuidade de reflexões (processos de movimentação do talude ou movimentação do GPR)
- Reflexão mais intensa (mudança de característica do material)

Os dois primeiros perfis transversais investigados interceptam os longitudinais em 0,65 m e 3,70 de seus inícios. Para facilitar a compreensão, foram marcadas as posições de interseção entre esses perfis e os longitudinais PL01, PL11, PL21, PL29 e PL38, conforme pode ser observado na Figura 45.

Basicamente foram identificadas em PT01 algumas reflexões correspondentes a superfícies de contato entre camadas, zonas com mudança no comportamento no padrão das reflexões, hipérbole, reflexões com amplitudes diferentes e, ainda, as interrupções nas reflexões ao longo de todo o perfil.

Entre 6,0 m e 10 m de distância, ou seja, entre os perfis PL07 e PL11, foi identificado uma área com mudança no comportamento no padrão das reflexões (tracejado azul), indicando mudança de característica do material. Nota-se entre PL08 e PL18, a aproximadamente 0,45 m de profundidade, uma reflexão bem marcada (linha preta cheia), praticamente retilínea, indicando uma superfície de contato entre camadas. Sabe-se que nessa área ocorreu algum episódio de escorregamento devido à presença de uma grande cicatriz no talude, compreendida entre PL09 e PL18.

Entre PL21 e PL26, há duas reflexões paralelas (linha preta cheia) que podem indicar superfície de contato entre camadas: a primeira a 0,20 m e a segunda a 0,40 m de profundidade. Na posição de PL29, nota-se a presença de uma reflexão nítida em forma de hipérbole (pontilhado amarelo), a aproximadamente 0,7 m de profundidade. Essa reflexão coincide com o ponto de saída de água durante os ensaios realizados em 2015 simulando a água da chuva. Entre as posições dos perfis PL29 e PL38, foram identificadas algumas reflexões nítidas mais superficiais, indicadas por linhas cheias pretas, e alguns pontos de aumento da intensidade das reflexões (tracejados roxos). As interrupções (pontilhado verde) nas reflexões estão presentes ao longo de toda a extensão de PT01.

No perfil PT02, localizado no meio do corpo do talude, pode-se identificar, até 4,0 m de distância, reflexão nítida (linha preta cheia) que pode indicar uma superfície de contato entre camadas. Logo em seguida, indicado por círculos tracejados roxos, duas regiões de maior intensidade da reflexão, seguida de outra reflexão, semelhante à região inicial (linha preta cheia), até, aproximadamente, PL09.

Entre PL09 e PL27 uma grande reflexão (linha preta cheia), semelhante à existente entre PL08 e PL18 em PT01, a aproximadamente a 0,50 m de profundidade, indicando superfície de contato entre camadas. Acima desta reflexão, entre PL17 e PL21, nota-se uma faixa de

mudança no comportamento da reflexão (tracejado azul). Abaixo dela, entre PL22 e PL25, há uma reflexão de comportamento irregular (linha cheia rosa).

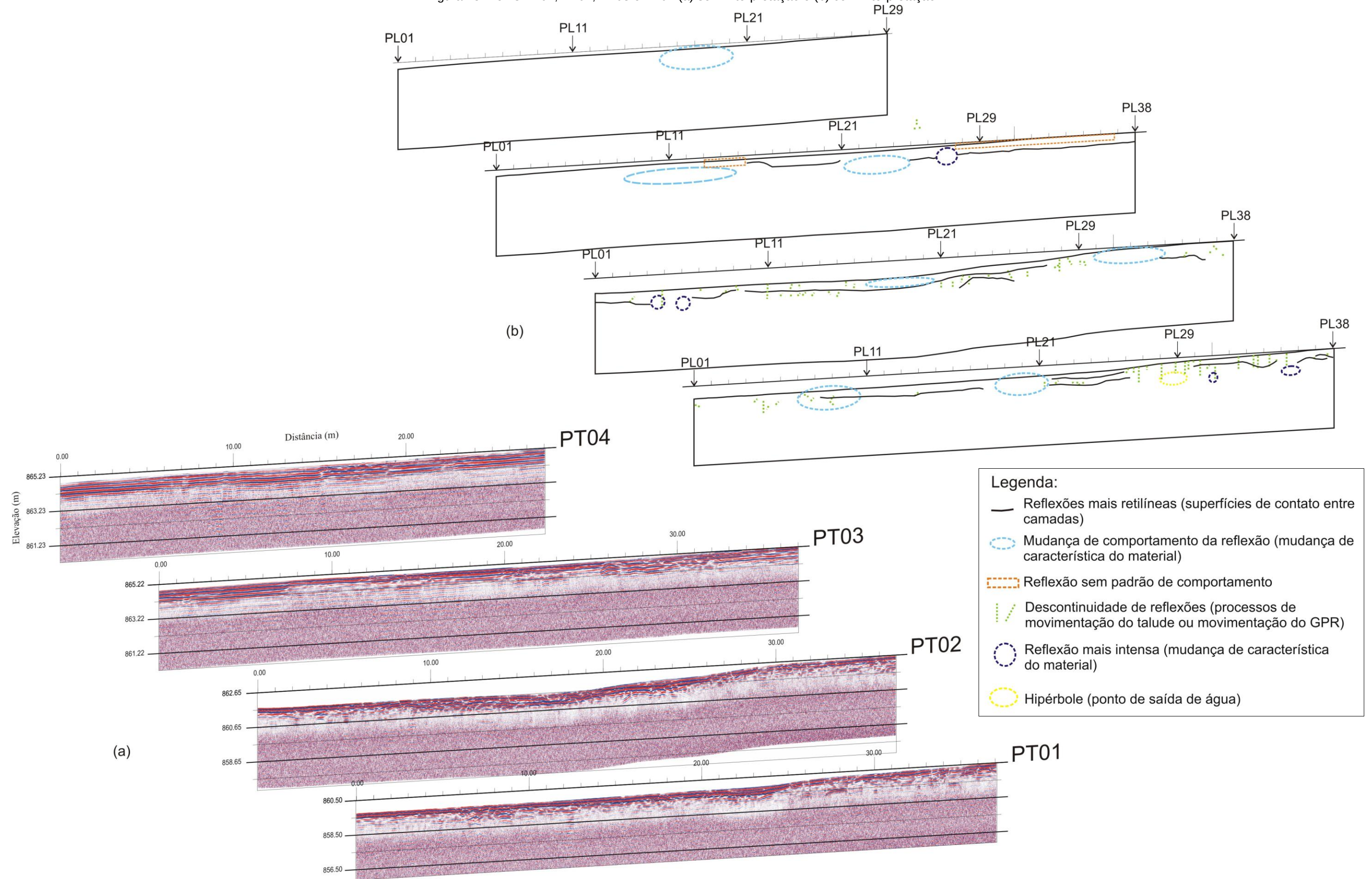
Há também entre a posição de PL30 e PL34, uma zona com mudança no comportamento da reflexão (tracejado azul), o que indica a mudança das características do material. Logo em seguida, é identificada uma reflexão (linha preta cheia) de comportamento semelhante uma existente em PT01, porém com menor comprimento e diferente posicionamento. Ao longo de todo o perfil PT02, foram identificados interrupções (pontilhado verde) verticalizadas e inclinadas das reflexões.

Observa-se que entre as posições de PL08 e PL15 do perfil PT03, que está localizado na calçada, existe uma zona de mudança no comportamento da reflexão (pontilhado azul) através da atenuação do sinal, o que pode indicar, por exemplo, presença de material úmido nessa área. Entre PL13 e PL15 e PL27 e PL37, há, na superfície, reflexões referentes a onda direta sem padrão de regularidade para esse comportamento, que foram indicadas por retângulos tracejados laranjas.

Entre as posições de PL15 e PL21, há uma reflexão bem nítida de comportamento regular (linha cheia rosa) que coincide com a cratera aberta na calçada em 2015, já mencionada anteriormente. Entre PL21 e PL25, nota-se uma faixa de mudança no comportamento da reflexão da área (pontilhado azul). Logo em seguida, vem uma grande reflexão (linha preta cheia), a aproximadamente 0,60 m de profundidade, até o fim do perfil, sendo que na posição de PL27 há um ponto de mudança na intensidade e comportamento da reflexão (tracejado roxo).

Já no PT04, perfil investigado na via, nota-se um padrão regular na reflexão, havendo uma mudança desse comportamento (tracejado roxo) entre as posições dos perfis PL16 e PL20.

Figura 45: Perfis PT01, PT02, PT03 e PT04 (a) sem interpretação e (b) com interpretação.



As reflexões curvadas no sentido superior (côncavas) de diversos tamanhos, encontradas em todos os perfis longitudinais, com profundidades semelhantes (as mais profundas localizadas a 1,20 m da superfície) e muitas vezes conectadas, foram interpretadas como sendo superfícies de ruptura do talude estudado, conforme mostraram Aranha *et al.* (2006); Carpentier *et al.* (2012); Borecka, Herzig, Durjasz-Rybacka (2015) em estudos semelhantes.

Dando ênfase apenas às superfícies de ruptura encontradas nos 38 perfis longitudinais investigados pelo GPR, observa-se que há basicamente cinco grupos de perfis com padrões de características diferentes. A Figura 46a mostra que o primeiro grupo é formado pelos perfis de PL01 à PL08, o segundo, pelos perfis PL09, PL10 e PL11; o terceiro por dez perfis, de PL12 à PL21; o quarto, pelos perfis de PL22 à PL32; e o último pelos perfis PL33 à PL38.

As superfícies de rupturas existentes no perfis que compõe o Grupo 1 (PL01 à PL08) são em grande quantidade ao longo dos perfis, porém, de modo geral, pequenas em tamanho. Há no início de todos esses perfis uma superfície de ruptura coincidente na mesma profundidade (aproximadamente 0,40 m) e na parte final uma bem curvada, chegando bem próxima da superfície.

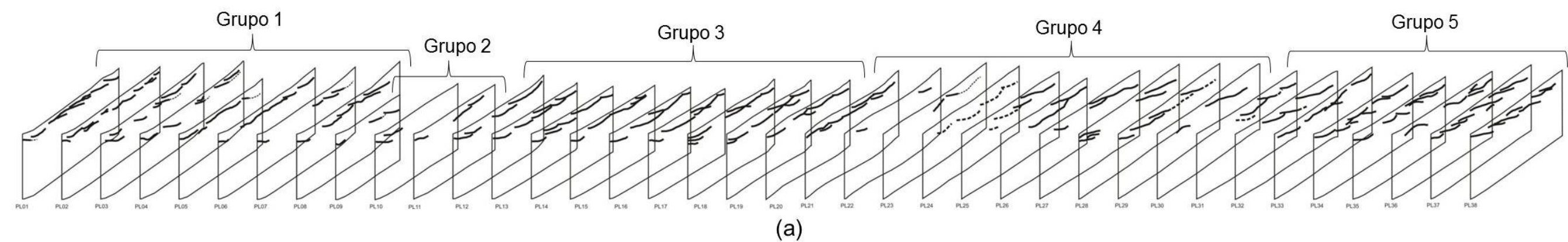
O segundo grupo, composto pelos perfis PL09, PL10 e PL11, possui a mesma superfície de ruptura no início dos perfis do grupo anterior, porém, ao longo dos perfis, foram encontradas poucas dessas marcações.

No grupo formado pelos perfis de PL12 à PL21 nota-se a mesma superfície de ruptura no início dos perfis, assim como nos perfis anteriores; algumas de grande comprimento ao longo do perfil, se estendendo até próxima da superfície, que, em alguns momentos, se conectam, e em grande quantidade.

Os perfis entre PL22 e PL32 (Grupo 3) possuem cicatrizes grandes, que também chegam bem próximo da superfície, porém em menor quantidade que o grupo anterior. O quinto e último grupo, composto pelos perfis de PL33 e PL38, possui grande quantidade de pequenas superfícies de ruptura de comportamento semelhantes.

As superfícies de ruptura de perfis consecutivos e com características e comportamento semelhantes foram associadas a um mesmo processo de movimentação existente no talude. Sendo assim, foi possível elaborar um mapa que possibilita ver essas marcações de escorregamento, também chamadas de cicatrizes de escorregamento, ao longo de toda a área de estudo (Figura 46b). As marcações foram representadas por linhas cheias, quando a superfície de ruptura se estendia até bem próximo da superfície; e linhas tracejadas, quando essa superfície de ruptura era mais profunda que a anterior.

Figura 46: Superfícies de rupturas encontradas nos perfis longitudinais investigados pelo GPR (a) e mapa das cicatrizes de escorregamento (b).



Legenda:

- Superfície de ruptura chegando bem próxima da superfície
- - - Superfície de ruptura mais profunda

Através da Figura 46b observa-se que as cicatrizes aparecem em todos os grupos de perfis, porém estão mais concentradas no Grupo 3 (entre os perfis PL12 e PL21) e Grupo 5 (entre os perfis PL33 e PL38). A diferença entre esses dois grupos é que o Grupo 3 é composto por cicatrizes maiores, envolvendo até 6 perfis consecutivos; enquanto que o Grupo 5 é composto por cicatrizes menores, envolvendo, geralmente, 2 ou 3 perfis consecutivos. Nota-se também uma grande cicatriz no início de 21 perfis consecutivos, entre PL01 e PL21, que depois se repete três vezes, porém em menor escala.

5. DISCUSSÃO

A utilização de métodos geofísicos, como o GPR, em estudos de acidentes ambientais como deslizamentos de terra vem crescendo cada vez mais devido à sua eficiência e facilidade de aplicação (BRUNO, MARTILLIER (2000); BICHLER et al. (2004), ROCH et al. (2005); ARANHA et al. (2006); ARANHA, SOBREIRA (2006); BEDNARCZYK (2008); CARPENTIR et al. (2012); JENG, CHEN (2012), BORECKA, HERZIG, DURJASZ-RYBACKA (2015)). Esta técnica permite obter informações relevantes que podem auxiliar na compressão dos processos de deslizamento, como espessura de camadas, superfícies de ruptura existentes, intensidade e orientação das descontinuidades, e na prevenção de novos episódios.

Os ensaios preliminares realizados no presente trabalho utilizaram duas antenas de diferentes frequências, 100 MHz e 200 MHz, com objetivo de decidir através dos resultados obtidos qual delas seria utilizada nas investigações posteriores. A definição da frequência da antena de 200 MHz foi baseada nos resultados obtidos com as antenas de diferentes frequências, considerando as particularidades do local, tais como característica do solo, presença de objetos geradores de ruídos próximos ao local, que influenciam diretamente nas respostas obtidas com o GPR.

O solo do aterro estudado é basicamente argiloso, caracterizado por ter alta condutividade, o que causa forte atenuação de sinal do equipamento e, com isto, limitação na profundidade de penetração da onda. Segundo Annan (1992), a atenuação do sinal é diretamente proporcional à condutividade elétrica do meio investigado, sendo que quanto maior a condutividade, maior a atenuação da onda eletromagnética.

Essa característica explica a baixa profundidade de penetração da onda nas investigações geofísicas realizadas. Segundo o manual do equipamento, a profundidade de penetração esperada para antenas de 100 MHz e 200 MHz em condições favoráveis, é aproximadamente 20,0 m e 8,0 m, respectivamente (GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, 2011).

Outro fator que pode ter limitado a profundidade de penetração da onda é a presença de uma torre de alta tensão próxima do local de estudo. Os autores Schrott, Sass (2008), Boudreault et al. (2010) e Jeng, Chen (2012) ressaltaram em seus trabalhos as limitações de se utilizar equipamentos de investigação geofísica como o GPR em áreas urbanas devido aos fortes ruídos e possíveis interferências nos dados coletados.

A configuração do equipamento influenciou os resultados obtidos nas três coletas (preliminares, período seco e período chuvoso). Existem diversos parâmetros que devem ser configurados, entre eles o Scan/Unit, Range, Samples, Stacking. Dentre os estudos presentes na bibliografia analisada e que utilizaram o mesmo tipo e modelo de GPR deste estudo, como Porsani, Sauck (2007), Silva et al. (2010), Porsani, Jangelme, Kipnis (2010), Porsani et al (2012) e Martini et al (2016), geralmente, além do método de aquisição e espaçamento das antenas e perfis, é mencionado apenas à configuração do parâmetro Scan/unit. Demais parâmetros não foram especificados.

A falta de informação quanto a alguns parâmetros pode provocar a definição incorreta dos mesmos e, com isso, comprometer o resultado das investigações. A diferença de configuração utilizada entre os ensaios preliminares, investigação no período seco e

investigação no período úmido e das respostas obtidas em cada uma dessas investigações evidenciam isto.

O contraste da qualidade de definição das imagens dos radargramas entre os ensaios preliminares e investigação no período está diretamente ligada com a diferença entre os parâmetros utilizados. Durante os ensaios iniciais utilizou-se *Scan/unit* 40 e *Stacking* 32, enquanto que para as investigações no período seco, *Scan/unit* 20 e *Stacking* 64.

Este contraste também foi perceptível, principalmente, entre as investigações de ambos os períodos pluviométricos, seco e úmido, onde a variação entre os parâmetros *Samples*, *Scan/unit* e *Stacking* foi grande. Para a primeira investigação foram utilizados os valores de 1024, 20 e 64, enquanto que para a segunda, 512, 100 e 0, respectivamente.

Através dos resultados obtidos nos testes de configurações realizados, onde foram variados os parâmetros citados (*Samples*, *Scan/unit* e *Stacking*), pôde-se comprovar a importância da correta definição dos parâmetros para a obtenção de radargramas com qualidade da definição da imagem, sobretudo com relação ao *Stacking*. Este parâmetro foi o principal responsável pelos resultados obtidos nas duas primeiras investigações com o GPR, cujos radargramas continham poucas reflexões, todas suavizadas pelos altos valores utilizados.

Após o ajuste adequado dos parâmetros, a investigação no período úmido obteve resultados nitidamente superiores às investigações anteriores. Os radargramas obtidos nesta etapa apresentaram reflexões até 2,0 m de profundidade; abaixo disso as reflexões não ficaram evidentes, devido aos fortes ruídos.

Segundo o *SIR System-3000 Manual* (2011), para a utilização de antenas de 200 MHz a profundidade máxima de penetração da onda é 8,0 m, isso para condições altamente favoráveis. O presente trabalho foi realizado em meio argiloso, úmido, devido às condições pluviométricas apresentados no período desta investigação, e em uma área urbana próxima de uma torre de alta tensão, o que não permitiu reflexões tão profundas. Apesar disso, foram obtidas informações importantes durante a investigação.

De forma geral, as respostas mais perceptíveis nos radargramas da investigação no período úmido, mostraram-se relacionadas a feições de prováveis superfícies de ruptura, zonas de atenuação de sinal, reflexões sem padrão regular de comportamento, reflexões típicas de material não condutor, interrupções verticais e inclinadas das reflexões, superfícies de contato entre camadas e estruturas enterradas.

As superfícies de ruptura, com comportamento de curvatura no sentido superior são, segundo Highland, Bobrowsky (2008), típicas de escorregamento rotacional, onde movimento de massa é aproximadamente rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude. Este é o tipo mais comum de escorregamento em aterro, que é o caso do presente trabalho, e geralmente é desencadeado devido à saturação do solo, principalmente causada por chuva. No entanto, segundo profissionais experientes da área de geotecnia, na prática quando há diversas superfícies circulares de ruptura superficiais, as mesmas se configuram como planar.

Nessa perspectiva, as diversas reflexões deste tipo encontradas em cada um dos perfis mostram as superfícies de pequenos processos de deslizamento presentes no local, que podem ser consideradas superfícies secundárias de ruptura. Abaixo dessas, em maior

profundidade, pode haver uma superfície principal de ruptura, de grande comprimento abrangendo as sucessivas superfícies secundárias, conforme encontrado nos estudos de Hu, Shan, Jiang (2016). Como no presente estudo houve limitação na profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas em aproximadamente 2,0 m, estas possíveis superfícies principais de ruptura não se manifestaram nas respostas de GPR obtidas. Dessa forma, não é possível afirmar o tipo de escorregamento em que o talude está submetido.

As zonas de mudança de comportamento das reflexões estão relacionadas com a mudança das características do meio. Como o aterro é composto basicamente de material argiloso, principalmente nas camadas mais superficiais, as áreas com atenuação do sinal foram relacionadas com aumento do teor de umidade do local. As regiões com reflexões sem um padrão de comportamento devem ser investigadas pontualmente, através de técnicas de investigação diretas, para que seja sua possível sua interpretação.

Em determinados pontos dos radargramas foram encontradas reflexões fortes e repetitivas, típicas de materiais não condutores, como objetos metálicos. Algumas delas, de reflexão estreita, foram associadas a vergalhões de aço, conforme mostrou Chlaib (2014), evidenciados pela possibilidade de esse tipo de material ser encontrado ao longo aterro, já que foram encontrados entulhos de construção civil nas sondagens. Outras, de tamanho maior, podem estar associadas a peças metálicas facilmente encontradas na superfície do talude.

As interrupções nos refletores obtidos, seja com mudança de polaridade ou apenas com pequenos deslocamentos verticais nos refletores contínuos, estão presentes na extensão de todos os perfis investigados no talude. Esse comportamento pode indicar pequenos processos de movimentações verticais presentes no talude, confirmados pelos problemas ocorridos como afundamento da via, inclinação do guarda corpo e rachaduras na calçada, ou apenas movimentação do equipamento no momento de aquisição, devido à irregularidade na superfície do talude e, ainda, dificuldade de manter o equipamento com movimentação retilínea e de velocidade constante.

Analisando os radargramas obtidos, nota-se que estas discontinuidades nas reflexões ficaram mais evidentes a partir do perfil longitudinal PL33, coincidentes com a rachadura presente na calçada, evidenciando a hipótese de contínuos processos de movimentação nessa região.

Nos perfis investigados foram encontrados também refletores contínuos que indicam superfície de contato entre materiais de características diferentes. Apesar de os resultados de sondagem indicar a camada de solo menos espessa com tendo 1,70 m, os resultados de GPR mostram diferenças mais superficiais entre camadas.

Algumas reflexões em forma de hipérbole, equivalentes a estruturas enterradas, foram encontradas nos radargramas obtidos. Uma dessas hipérboles, próxima do início do PL29, está relacionada com a cavidade presente nessa área e ponto de saída de água nos testes realizados em 2015, confirmando a hipótese de ruptura hidráulica do talude.

As principais contribuições dessas imagens de GPR e que podem auxiliar na compreensão dos processos de deslizamento de terra ocorridos na área são informações referentes à superfícies de ruptura dos perfis. Percebe-se a existência de pequenos, porém muitos planos desse tipo. Além disso, as interrupções das reflexões presentes na extensão de todo

o talude investigado são importantes evidências de que o mesmo está sob processos de movimentação vertical.

O mapa das cicatrizes de escorregamento elaborado mostra que a maior concentração dessas marcações está justamente nas áreas consideradas críticas da área de estudo: entre os perfis PL09 e PL18, localizados na cicatriz de escorregamento visível existente no talude e na área onde houve a abertura da cratera na calçada; e PL30 e PL 38, contidos na grande rachadura atualmente presente na calçada.

Os resultados dos furos de sondagem, apesar de estarem fora da área investigada pelo GPR, forneceram informações importantes para o estudo, como o tipo de material do aterro e as características de cada camada. A presença de pedregulhos em quase todas as camadas dos furos de sondagens indica que essa é uma característica do talude estudado. A presença desse tipo de material granular nas camadas de argila e silte (materiais finos) do aterro podem gerar maior instabilidade e permeabilidade na área, características favoráveis para a ocorrência de processos de deslizamentos.

Entretanto, esperava-se que os resultados dos radargramas complementassem as informações pontuais dos furos de sondagem, demanda esta frequente em estudos geotécnicos. Na presente pesquisa, isto não foi possível devido à baixa profundidade de penetração da onda eletromagnética na subsuperfície, principalmente quando comparado com as profundidades obtidas com os ensaios de SPT. Assim, o bom detalhamento do comportamento da subsuperfície foi obtido em baixas profundidades (dentro de 2m) pelo GPR mas não foi possível ser relacionado com a resistência obtida nos ensaios de SPT (medida pela quantidade de golpes a cada metro). Portanto, as diferentes escalas dos métodos impediram uma maior correlação entre estas informações.

Mesmo com todas as limitações enfrentadas, como características do local e problemas de configurações, foram obtidas informações importantes durante as investigações no período úmido, que é a condição mais desfavorável devido à condição de umidade, quando ocorrem mais acidentes.

Diante de tudo que foi exposto, nota-se a importância da geofísica em estudos de áreas sob o risco de deslizamento de terra. As investigações com GPR são capazes de fornecer informações importantes como a presença das superfícies de rupturas do local do talude e suas características (extensão, profundidade, comportamento, etc) que são essenciais na análise dos processos de deslizamento.

O presente trabalho, assim como os estudos de Aranha *et al.* (2006), Carpentier *et al.* (2012); Borecka, Herzig, Durjasz-Rybacka (2015), Hu, Shan, Jiang (2016), permitiu a obtenção desse tipo de informações que pode auxiliar em planos da Defesa Civil que visem a prevenção de novos processos de deslizamento do talude estudado.

6. CONCLUSÃO

A situação adversa para a aplicação da técnica geofísica com o GPR no local de estudo, como o tipo de solo altamente condutivo, sua condição de umidade elevada devido ao período pluviométrico, e sua localização em área urbana, agravada pela presença de uma torre de alta tensão, apesar de dificultarem não inviabilizaram o estudo. A utilização do método GPR na caracterização da presente área permitiu a obtenção de informações importantes para compreender os processos de deslizamentos já ocorridos no talude.

As superfícies de ruptura, presentes em cada um dos perfis investigados, indicaram uma maior concentração entre os perfis transversais PL11 e PL21 e entre os perfis PL30 e PL38, estando relacionados a localização de indícios visuais de movimentação na superfície, como rachaduras nas calçadas. Entretanto, devido à baixa profundidade de penetração da onda eletromagnética não foi possível concluir qual tipo de escorregamento está ocorrendo no talude.

A antena de 200 MHz foi capaz de fornecer essas informações sobre as superfícies de ruptura em meio com características predominantemente argilosa e siltosa, atingido a profundidade média de penetração da onda eletromagnética de 2 metros.

A correlação entre as informações obtidas com a técnica de GPR e ensaios SPT foi limitada as camadas menos profundas, devido também as diferentes escalas dos métodos, mas se mostra um potencial para o uso de antenas com maior alcance ou menor frequência (do 200 MHz), dependendo do tipo do meio a ser analisado.

A ausência de informações com o GPR no período seco, por problemas técnicos, não permitiu avaliar a influência da pluviosidade sobre o processo de movimentação da subsuperfície e nem a velocidade desse movimento no tempo. Entretanto, o retrato obtido com os radagramas no período chuvoso junto com as informações visuais do local permitem concluir processo de movimentação da subsuperfície.

Assim, a técnica de GPR pode auxiliar a tomada de decisão de órgãos como Defesa Civil na prevenção de acidentes nas áreas de risco de deslizamento, que são frequentes nos grandes centros urbanos do país devido a junção dos problemas de alta concentração populacional com fatores ambientais como pluviosidade e terrenos acidentados.

7. TRABALHOS FUTUROS

As seguintes propostas são apresentadas como continuidade deste trabalho:

- Realizar investigação geofísica com GPR utilizando antenas com menor frequência (menor que 200 MHz) visando obter informações mais profundas na área.
- Correlacionar informações de radargramas obtidos com diferentes antenas visando verificar a viabilidade de obtenção de linhas de ruptura em diferentes escalas.
- Correlacionar informações de radargramas obtidos com antenas de menor frequência com ensaios de SPT, visando complementar as informações pontuais fornecido por este último.
- Utilizar outras técnicas de investigação geofísica, como a eletrorresistividade, visando mapear o caminho preferencial da água na suposta ruptura hidráulica do talude.
- Realizar investigação geofísica com GPR em diferentes períodos pluviométricos e em datas diferentes, de forma a quantificar a influência da chuva sobre o processo de movimentação bem como a velocidade de movimentação do talude.
- Realizar estudos que possam auxiliar na compreensão da influência dos ruídos gerados pela antena de alta tensão na investigação com o GPR, através da medição de sua frequência em diferentes períodos do dia, principalmente pela madrugada, que possivelmente é o horário com menor interferência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Revista Geonomos*, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p. 17-22, 1998.
- ANAGNOSTOPOULOS, C., GEORGIADIS, M. Analysis of rainfall data and correlation to landslides: The case of Sykia-Pieria, Greece. In: *International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Proceedings, 1: 483 – 487. 1997.
- ANJOS, C. A. M., CERRI, L. E. S., GANDOLFI, N. Situações de risco e medidas de prevenção de acidentes em encostas ocupadas na cidade de Maceió (AL), Brasil. In: *Pan am. Symp. of Landslides & Braz. Conf. on Slope Stability*, 2 PSL/COBRAE, Rio de Janeiro, Proceedings, II:773 – 782. 1997.
- ANNAN, A. P. GPR – History, trends and future developments, *Subsurface sensing Technologies and applicattions*, v. 3 (4), p. 253-270. 2002.
- ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software Inc, Canadá, 2001.
- ANNAN, A. P. Ground penetration radar workshop notes. Sensors; Software, Inc., Internal Report, p. 130 . 1992.
- ARANHA, P. R. A.; PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C. B.; BEIRIGO, E. A. Aplicação do GPR na análise da estabilidade de taludes na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. *Revista de Geologia*, v. 19, n. 1, p. 87-98. 2006.
- ARANHA, P. R. A.; SOBREIRA, F. G. Utilização do Geo-radar na identificação de feições associadas ao escorregamento ocorrido em Realeza, Manhuaçu – MG. *Revista de Geologia*, v. 19, n. 1, p. 35-47. 2006.
- ARAÚJO, E. H. S. de. Sistema inteligente para estimar a porosidade em sedimentos a partir de análise de sinas de GPR. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- ATTEWELL, P. B.; FARMER, I. W. Principles of engineering geology. Springer Science & Business Media, 2012.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: *Conferência Brasileira sobre Estabilidade de encostas*, 1a COBRAE, Rio de Janeiro. Anais, II: 721 – 73. 1992.
- AUGUSTO FILHO, O. Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para planos de seguro em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba, SP. 196 f. Tese de Doutorado (Instituto de Geociências e Ciências Exatas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.
- AUGUSTO FILHO, O. Escorregamento em encostas naturais e ocupadas: Análise e controle. In: O.,Y., Bitar (ed.) *Curso de Geologia Ambiental*. São Paulo, ABGE/IPT, 77-100. 1995.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: *Geologia de Engenharia*. ABGE, São Paulo. 1998.
- AYALA CARCEDO, F. J. Introducción a los riegos geológicos. *Riesgos Geológicos*; I.G.M.E. Madrid, v. 1. 1987
- BÃO, R.; GIUDICE, D.S. A análise da distribuição pluviométrica na cidade de Salvador e seus impactos ambientais: o caso dos deslizamentos em São Caetano no período de 2007 a 2012. *Revista Geografar*, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 180-199, jun. 2014.
- BARBOSA, E. E. M.; PRADO, R. L.; MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M. Estimativas do teor de umidade empregando o método GPR: uma avaliação comparativa em experimentos de laboratório e campo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, n. 4, p. 691-701, 2010.

BEDNARCZYK, Z. Application of GPR Scanning for Landslide Investigations in Polish Carpathians. In: Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2008.

BELO HORIZONTE. Gestão compartilhada. Disponível em: <<http://gestaocompartilhada.pbh.gov.br/estrutura-territorial/regioes-administrativas>>. Acesso em 28 de abril de 2017.

BERES, M.; HAENI, F. P. Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologie studies. Ground water, v. 29, n. 3, p. 375-386, 1991.

BICHLER, A., BOBROWSKY, P., BEST, M., DOUMA, M., HUNTER, J., CALVERT, T., BURNS, R. Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. Landslides, v. 1, n. 1, p. 29-40, 2004.

BITARÃES, G. O.; NUNES, M. S. Espacialização da ocorrência de movimentos de massa no município de Belo Horizonte: Levantamento de eventos no período entre os anos de 2010 e 2014. XI SINAGEO.Geomorfologia: compartimentação de paisagem, processo e dinâmica. Maringá, Paraná. 2016.

BOGOSLOVSKY, V. A.; OGILVY, A. A. Geophysical methods for the investigation of landslides. Geophysics, v. 42, n. 3, p. 562-571, 1977.

BORECKA, A.; HERZIG, J.; DURJASZ-RYBACKA, M. Ground penetrating radar investigations of landslides: a case study in a landslide in Radziszów. Studia Geotechnica et Mechanica, v. 37, n. 3, p. 11-18, 2015.

BORGES, W. R. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, 2007.

BORGES, W. R. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, 2002.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: Engenharia Sanitária e Ambiental, v.15, n. 4, p. 367-374, 2010.

BOUDREAULT, J. P., DUBÉ, J. S., CHOUTEAU, M., WINIARSKI, T., & HARDY, É. Geophysical characterization of contaminated urban fills. Engineering Geology, v. 116, n. 3-4, p. 196-206, 2010

BRUNO, F.; MARTILLIER, F. Test of high-resolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup Landslide in the Swiss Alps. Surveys in geophysics, v. 21, n. 4, p. 335-350, 2000.

BUSCH, A.; AMORIM, S. A tragédia da região serra no Rio de Janeiro em 2011: procurando respostas. ENAP, Casoteca de Gestão Pública, 2011.

CAMPOS, L. C. Proposta de reanálise do risco geológico-geotécnico de escorregamentos em Belo Horizonte – Minas Gerais. 139 f. Dissertação de Mestrado (Escola de Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CARPENTIER, S. *et al.* Geophysical imaging of shallow subsurface topography and its implication for shallow landslide susceptibility in the Urseren Valley, Switzerland. Journal of applied geophysics, v. 83, p. 46-56, 2012.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de riscos de deslizamento em encostas: Guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.

CARVALHO, C., S., HACHICH, W. Gerenciamento de Riscos Geotécnicos em Encostas Urbanas. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, 20 (3): 179-187. 1997.

- CERRI, L. E. S. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Tese de Doutorado – UNESP, Rio Claro, 1993.
- CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. Riscos Geológicos. In: Oliveira, A.M dos S., Brito, S.N. (organizadores), *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), 1998.
- CHLAIB, H. K. MAHDI, H., AL-SHUKRI, H., Su, M. M., CATAKLI, A., ABD, N. Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows. *Journal of Applied Geophysics*, v. 103, p. 121-131, 2014.
- COMDEC. Registro histórico das condições físicas dos elementos construtivos, talude de aterro e pavimentação instalados em trecho de via pública. 2017
- CRUDEN, D. M, VARNES, D. J. Landslides Types and Process. In: Turner, A. & Schuster (Ed) *Landslides- Investigation and Mitigation*, Special Report 247, Washington, D.C., R.L. National Academy Press, 36-75p. 1996.
- DANIELS, J. J. Fundamentals of ground penetrating radar. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1989*. Society of Exploration Geophysicists, p. 62-142. 1989.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater, and geotechnical projects: selected case histories. *Ground penetrating radar*, Geological Survey of Canada, 1992.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of oil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 531-551, 1989.
- DENNESS, B.; CONWAY, B. W.; MCCANN, D. M.; GRAINGER, P. Investigation of a coastal landslip at Charmouth, Dorset. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 8, n. 2, p. 119-140, 1975.
- DONNELLY, L. J.; CULSHAW, M. G.; HOBBS, P. R. N.; FLINT, R. C.; JACKSON, P. D. Engineering geological and geophysical investigations of a slope failure at Edinburgh Castle, Scotland. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 64, n. 2, p. 119-137, 2005.
- DUARTE, O. de O. Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia. 2ª ed. , SBGf/Petrobrás, Rio de Janeiro, 352 p. 2003.
- EIDT, R. C. The climatology of south America. In: *Biogeography and ecology in South America*. Springer, Dordrecht, 1968.
- FEIJÓ, R. L., PAES, N. M., D'ORSI, R. N. Chuvas e movimentos de massa no município do Rio de Janeiro. In: *Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, III COBRAE*, Rio de Janeiro, Anais, 1: 223 – 230. 2001.
- FERNANDES, N. F. AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Bertrand: Rio de Janeiro, 1996.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista brasileira de Geomorfologia*, UGB, v. 2, n. 1, p. 51-71. 2001.
- FERNÁNDEZ, M. A. Los gobiernos locales de América del Sur enfrentando la gestión de desastres. *DIRDN-Informa*, edição especial, 1996.
- FRAGA, N. C.; SIMAS, F. A. de O.; JAYME, N. S.; SILVEIRA, H. M. da. Geografia e acidentes socioambientais no Brasil – Vale do Itajaí/SC (2008) e Região Serrana/RJ (2011).: Uma apreciação socioambiental dos desastres naturais e ações antrópicas. *Revista Presença Geográfica*, Rio de Janeiro, v. 2., n.1, p. 83-102. 2015.

- GALAGEDARA, L. W.; PARKIN, G. W.; REDMAN, J. D. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 18, p. 3615-3628, 2003.
- GALVÃO, T. C. de B.; ELSHAREIF, A. M.; VIANA, C. S. Rain induced landslides in risk areas of Belo Horizonte City, Brazil. In: S. Bin, Fang, H. Y (ed) *Environmental Geotechnology*, Nanjing, China, Nanjing University Press, 102-108, 1999.
- GANDOLFO, O. C.; SOUZA, L. A.; TESSLER, M. G.; RODRIGUES, M. Estratigrafia rasa da Ilha Comprida (SP): Um exemplo de aplicação do GPR. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 19, n. 3, p. 217-250, 2001.
- GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. GSSI Antenna Manuals. 2011.
- GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. SIR System-3000 Manual. 2011.
- GLADE, T.; STARK, P.; DIKAU, R. Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refraction—a case study in Rheinhessen, Germany. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 64, n. 2, p. 151-158, 2005.
- GROTE, K.; HUBBARD, S.; RUBIN, Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water resources research*, v. 39, n. 11, 2003.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo, Edgard Blücher Ltda & Universidade de São Paulo, 170p. 1976.
- GUSMÃO FILHO, J. A. Encostas Urbanas: Aspectos ambientais, Sociais e Políticos. In: Pan-American Symposium of Landslides, 2º COBRAE, Rio de Janeiro, Anais, 3: 315 – 331. 1997.
- HERRMANN, M. L.; PELLERIN, J. R. G. M.; SAITO, S. M. Análise das ocorrências de escorregamentos no estado de Santa Catarina com base nos formulários de avaliação de danos da defesa civil 1980 a 2003. In: Anais do Simposio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook – A guide to understanding landslide. Reston, Virginia, U. S. Geological Survey Circular 1325, 2008.
- HU, Z.; SHAN, W.; JIANG, H. Landslide investigations in the northwest section of the lesser Khingan range in China using combined HDR and GPR methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 75, n. 2, p. 591-603, 2016.
- HUISMAN, J. A.; BOUTEN, W. Accuracy and reproducibility of mapping surface soil water content with the ground wave of ground-penetrating radar. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v. 8, n. 2, p. 67-75, 2003.
- HUISMAN, J. A.; HUBBARD, S. S.; REDMAN, J. D.; ANNAN, A. P. Measuring soil water content with ground penetrating radar. *Vadose zone journal*, v. 2, n. 4, p. 476-491, 2003.
- HUISMAN, J. A.; SPERL, C.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J. M. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, v. 245, n. 1, p. 48-58, 2001.
- INMET. Relatório de Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 05 abr 2018.
- INTERPEX. Gradix User's Manual. Interpex Limited, Golden, Colorado, EUA, p. 222. 1996.
- IPT. Manual de ocupação de encostas. CUNHA, M. A. (Coord.) Publicação IPT nº 1831. 216p. 1991.
- IPT. Métodos geofísicos aplicados à engenharia e geotecnia. Comunicação técnica nº 171299. 2012.

- JENG, Y.; CHEN, C. Subsurface GPR imaging of a potential collapse area in urban environments. **Engineering geology**, v. 147, p. 57-67, 2012.
- KELLER, G. V. Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1, pp. 13-51. 1987
- KNIGHT, R. Ground penetrating radar for environmental applications. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 29, n. 1, p. 229-255, 2001.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading, 2006.
- LAPENNA, V.; LORENZO, P.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; RIZZO, E.; SDAO, F. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy. Geophysics, v. 70, n. 3, p. B11-B18, 2005.
- LARA, A. A., MARQUES, E. A. G., ALMEIDA, L. C. R. Mapeamento de risco de acidentes associados a escorregamentos - Morro da Serrinha, Rio de Janeiro, Brasil. In: Pan-American Symposium of Landslides, 2, COBRAE, Rio de Janeiro, Anais, 2: 837 - 846. 1997.
- LOPES,V. Jornal Estado de Minas, Belo Horizonte, 11 nov. 2016a. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/11/11/interna_gerais,823025/rua-do-bairro-sagrada-familia-completa-um-ano-de-interdicao.shtm>. Acesso em: 10 mai. 2017.
- LOPES,V. Jornal Estado de Minas, Belo Horizonte, 22 fev. 2016b. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/02/22/interna_gerais,736375/problema-que-se-arrasta.shtml>. Acesso em: 10 mai. 2017.
- LUCAS, T. P. B. Chuvas persistentes e ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, IGC, Belo Horizonte,158 p. 2007.
- LUCAS, T. P. B; ABREU, M. L. Caracterização climática dos padrões de ventos associados a eventos extremos de precipitação em Belo Horizonte - MG. Cadernos de Geografia, Belo Horizonte, v. 14, n. 23, p. 135-152, 2004.
- LUDWIG, R.; GERHARDS, H.; KLENK, P.; WOLLSCHLÄGER, U.; BUCHNER, J. Electromagnetic methods in applied geophysics. Practical course environmental physics. Institute of Environmental Physics Heidelberg University. Heidelberg, Baden Württemberg, Germany. 2011.
- MARTINI, R. J., CAETANO, T. R., SANTOS, H. D. A., ARANHA, P. R. A. Disposal of iron tailings in reservoirs: a GPR application. Revista Ambiente & Água, v. 11, n. 4, p. 878-890, 2016.
- MCCANN, D. M.; FORSTER, A. Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. Engineering Geology, v. 29, n. 1, p. 59-78, 1990.
- MELLETT, James S. Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. Journal of Applied Geophysics, v. 33, n. 1-3, p. 157-166, 1995.
- MENDES, R. M. Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP). Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MESQUITA, M. J. L.; LUIZ, J. G. Estimativas da Umidade de Solos com GPR: Revisão e Resultados. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2011. p. 410-414. 2011.
- MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C.. Monitoramento da Atenuação Natural de pluma de contaminação pelo método de Radar de Penetração no Solo (GPR). Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 4, p. 389-398, 2007.

- MOREIRA, J. L. B. Estudo da distribuição espacial das chuvas em Belo Horizonte e em seu entorno. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, 107 p. 2002.
- NUNES, A. J. C., FERNANDES, C. E. M., ILIESCO, M., CID, M. R. V. K., ALVES, R. I. V. e SILVA, L. J. R. D. B. Contribuição ao Conhecimento do Risco Geológico da Cidade de Petrópolis, RJ. In Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano, v.1, p. 102-114. ABGE, São Paulo. 1990
- NUNES, A. J. C.; FONSECA, A. M. C.; FERNANDES, C. E. de M.; CRAIZER, W. Intense rainstorms and ground slides. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, Rio de Janeiro, Proceeding, 3: 1627 – 1630. 1989.
- OLHOEFT, G. R. Application of ground penetrating radar. In: INT'L., CONF. ON GROUND PENETRATING RADAR GPR'96, 6th Sendai, 1996. Proceedings. Sendai, Sept 30- Oct 3, p. 1-4, 1996.
- ORELLANA, E. Prospeccion geoelectrica en corriente continua. Madrid, Paraninfo, 523p. 1972.
- PAIXÃO, M. S. G.; PRADO, R. L.; DIOGO, L. A. Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo. Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 2, p. 189-198, 2006.
- PARIZZI, M. G. Condicionantes e Mecanismos de Ruptura em Taludes da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. 212 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2004.
- PARIZZI, M. G. Desastres naturais e induzidos e o risco urbano. Revista Geonomos, v. 22, n. 1, 2014.
- PARIZZI, M. G.; SEBASTIÃO, C. S.; VIANA, C. S. PFLUEGER, M. C.; CAMPOS, L. C.; CAJAZEIRO, J. M. D; TOMICH, R. S.; GUIMARÃES, R. N.; ABREU, M. L.; SOBREIRA, F. G.; REIS, R. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. Geografias, v. 6, n. 2, p. 49-69, 2010.
- PEDROSA, A. P. Jornal O Tempo, Belo Horizonte, 05 ago. 2016. Disponível em < <http://www.otempo.com.br/cidades/obra-sem-data-para-come%C3%A7ar-1.1349782>>. Acesso em: 10 mai. 2017.
- POPINI, M. V. F. Processamento de dados de GPR utilizando métodos da sísmica de reflexão. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2001.
- PORSANI, J. L. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. 145 f. Tese de Doutorado (Instituto de Geociências e Ciências Exatas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1999.
- PORSANI, J. L., RUY, Y. B., RAMOS, F. P., YAMANOUTH, G. R. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. Journal of Applied Geophysics, v. 80, p. 25-31, 2012.
- PORSANI, J. L.; JANGELME, G. M.; KIPNIS, R.. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. Journal of archaeological science, v. 37, n. 6, p. 1141-1148, 2010
- PORSANI, J. L.; WALTER FILHO, M. ; VAGNER, R. E.; FISSEAHA, S., DOURADO, J.C.; MOURA, H. P. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. Journal of Applied Geophysics, v. 55, n. 3, p. 199-209, 2004.
- PORSANI, J. L; SAUCK, W. A. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: Artifact removal through effective data processing. Geophysics, v. 72, n. 6, p. J77-J83, 2007.
- PRUDENTE, C. N.; REIS, R. J. dos. Banco de dados de desastres naturais em Belo Horizonte – 1979 a 2008. Belo Horizonte: URBEL, 2008.

QUARESMA A. R.; DÉCOURT L.; FILHO A. R. Q.; ALMEIDA M. S. S.; DANZIGER F. Investigações geotécnicas. "In": Hachich W.; Falconi F. F.; Saes J. L.; Frota R. G. Q.; Carvalho C. S. e Niyama S., editores. Fundações: teoria e prática. 2ª ed. São Paulo: PINI; 1998.

REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley, Sons Ltd, 806 p. 1997.

ROCH, KARL-HEINZ; CHWATAL, W.; BRÜCKL, E. Potentials of monitoring rock fall hazards by GPR: Considering as example the results of Salzburg. Landslides, v. 3, n. 2, p. 87-94, 2006.

ROSA FILHO, A. CORTEZ, A. T. C. A problemática socioambiental da ocupação urbana em áreas de risco de deslizamento da "Suíça Brasileira". Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, p. 33-40, 2010.

SANTORO, J.; MENDES, R.M.; PRESSINOTI, M.M.N.; MANOEL, G.R. Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do plano preventivo de defesa civil em São Paulo, SP. In: Anais do 7 Simpósio de Cartografia Geotécnica e Geoambiental – 7SBCGG, Agosto, Maringá, Pr. ABGE, UEM, 2010. p 1- 14. 2010

SASS, O.; BELL, R.; GLADE, T. Comparison of GPR, 2D-resistivity and traditional techniques for the subsurface exploration of the Öschingen landslide, Swabian Alb (Germany). Geomorphology, v. 93, n. 1, p. 89-103, 2008.

SAUCK, W. A.; ALVES, J. G. V.; LUIZ, J. G..GPR in the middle Amazon Basin, Amazonas state, Brazil. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.1995 (a).

SAUCK, W. A.; ALVES, J. G. V.; LUIZ, J.G. Successful Application of GPR in the Lower Amazon Region, Belém, Pará, Brazil. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.1995 (b).

SCHMUTZ, M.; ALBOUY, Y.; GUÉRIN, R.; MAQUAIRE, O.; VASSAL, J.; SCHOTT, J. J.; & DESCLOÎTRES, M. Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super Sauze earthflow (France). Surveys in Geophysics, v. 21, n. 4, p. 371-390, 2000.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SCHROTT, L.; SASS, O. Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies. Geomorphology, v. 93, n. 1-2, p. 55-73, 2008.

SILVA, A. B., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C. C., & FRACALLOSSI, F. G. Caracterização dos depósitos sedimentares em subsuperfície no setor meridional da planície costeira sul de Santa Catarina. Gravel, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2010.

SILVA, A. S., CARVALHO, E. T, FANTINEL, L. M., ROMANO, A. W., VIANA, C. S. Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte. Convênio: PMBH, SMP, FUNDEP/ UFMG. 490p. 1995.

SIMÕES, T. K. S. L.; REIS, R. J. dos. Análise das chuvas intensas nas estações chuvosas 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 em relação às áreas de risco do município de Belo Horizonte. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis. 2006.

SMITH, D. G.; JOL, H. M. Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. Journal of Applied Geophysics, v. 33, n. 1-3, p. 93-100, 1995.

SOBREIRA, F. G. Riscos geológicos: definição de pontos críticos em Ouro Preto. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, 44 (3 e 4): 213-223. 1991.

SOBREIRA, F. G., FONSECA, M. A. Ação Antrópica e processos em encostas em Ouro Preto. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, VII, Goiania, Anais,15p. 1999.

SOUZA, L. A. P. de, GANDOLFO, O. C. B. Métodos geofísicos em geotécnica e geologia ambiental. In: Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental (RBGEA), V.2. 2013.

SOUZA, L. A. P. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado(Instituto Oceanográfico) - Universidade de São Paulo, 2006.

SOUZA, L. A. P.; PORSANI, J. L., SOUZA, O. C. D.; MOUTINHO, L. Levantamento experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense. Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 1, p. 67-72, 2002.

SUDECAP. Estudos geotécnicos – solução de estabilização e proteção. 2016.

TATIZANA, C., OGURA, A. T., CERRI, L. E. S., ROCHA, M. C. M. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, São Paulo, Anais, 2 : 225 – 236. 1987.

TOMINAGA, L. K. Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. 220 f. Tese de Doutorado (Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

URBEL. Áreas de vilas, favelas e conjuntos habitacionais produzidos até 1993. 2016. Disponível em < http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=urbel&tax=7491&lang=pt_BR&pg=5580&taxp=0&>. Acesso em 28 de abril de 2017.

URBEL. Guia Técnico do Programa Estrutural em Áreas de Risco (PEAR). 2012.

VAN ASCH, Th. W. J.; BUMA, J.; VAN BEEK, L. P. H. A view on some hydrological triggering systems in landslides. Geomorphology, v. 30, p. 25-32, 1999.

VIANA, C. S. Caracterização dos Processos Erosivos no Município de Belo Horizonte – Uma Contribuição à Gestão Ambiental e ao Planejamento Urbano. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Sanitária, Ambiental, Hidráulica e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

WIECZOREK, G. F. Landslide Triggering Mechanisms – In: Turner, A. K & Schuster, R.L. (ed.) Landslides – Investigation and Mitigation, Special Report 247. Washington D.C., National Academy Press, 76-90. 1996.

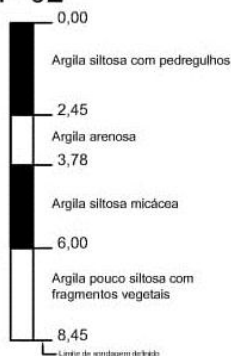
WOLLE, C. M., CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, v.12, p. 27 – 36. 1989.

ANEXO A

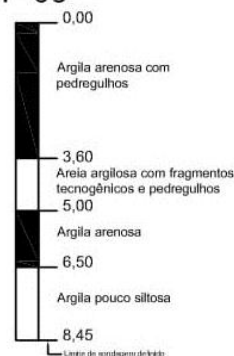
SP-01



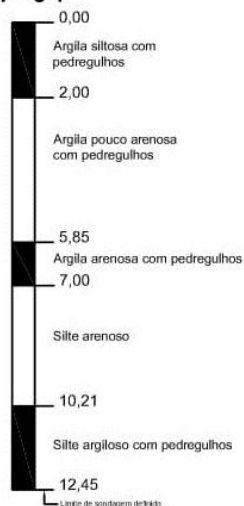
SP-02



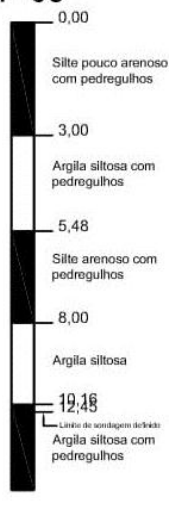
SP-03



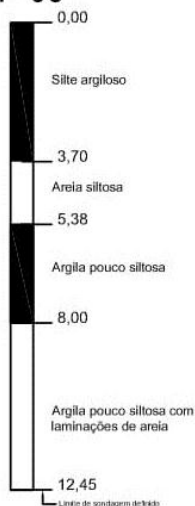
SP-04



SP-05



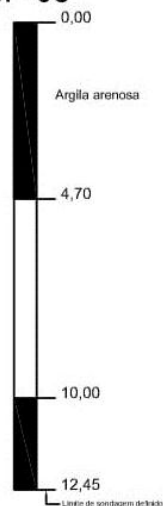
SP-06



SP-07



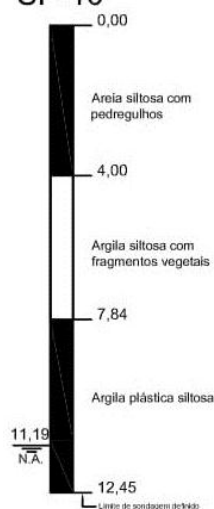
SP-08



SP-09



SP-10



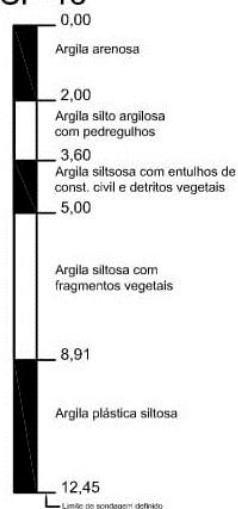
SP-11



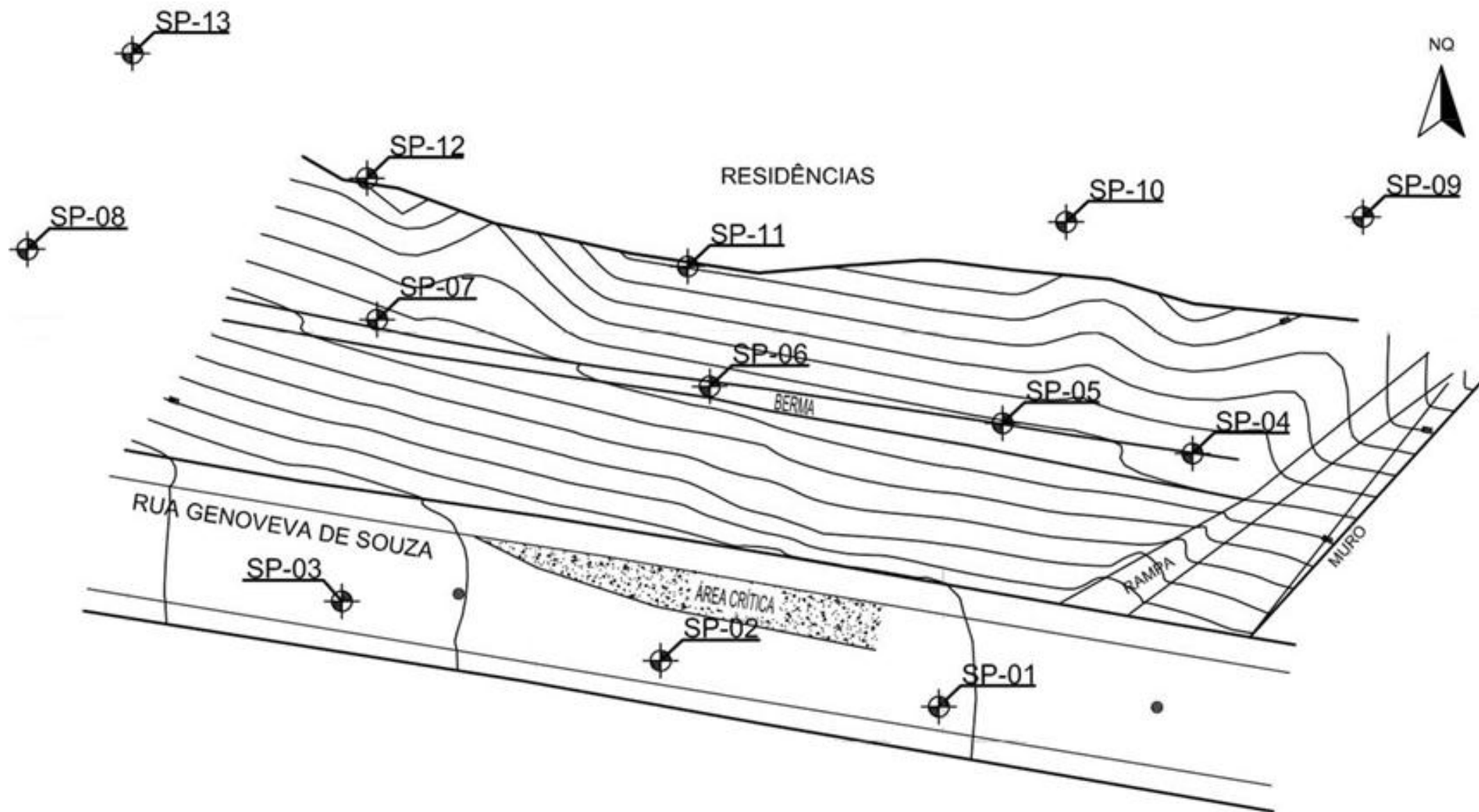
SP-12



SP-13



APÊNDICE A



APÊNDICE B

