

ÉRDESON SOARES FARIAS

**INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS PARA
AVALIAÇÃO DO MACIÇO DE UMA BARRAGEM DE TERRA**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais da Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientadora: Prof. Dra. Fernanda Puga Santos Carvalho

Salvador
2024

Integração de Técnicas Geofísicas para Avaliação do Maciço de uma Barragem de Terra.

Érdeson Soares Farias

Resumo

Os métodos geofísicos são ferramentas poderosas disponíveis para investigação geotécnica de um modo não intrusivo/destrutivo. O seu uso permite, dentre outros aspectos, a extrapolação dos resultados pontuais das investigações geotécnicas de forma muito mais segura e confiável. Dentre os diversos métodos existentes, destacam-se pelo seu uso frequente o georadar (GPR) e a eletrorresistividade (ER), apesar do crescente uso das técnicas sísmicas para investigações rasas. Ressalta-se, contudo, que mesmo quando diferentes técnicas geofísicas são empregadas em uma mesma área, a interpretação dos resultados obtidos se dá usualmente de forma não acoplada, sem o compartilhamento das informações obtidas pelos diferentes métodos. Neste trabalho, resultados de sondagens à percussão (SPT) são empregados para calibrar as seções de ER para elaboração de um modelo inicial do maciço da barragem. Em seguida, os dados de GPR são analisados com vista a delimitar as camadas que compõem o maciço, além de serem analisados em conjunto com os resultados obtidos com a eletrorresistividade. Por fim, procurou-se identificar as regiões mais críticas do maciço da barragem face aos menores valores de resistividade elétrica e atenuação da velocidade do sinal de radar, ou seja, nas regiões mais úmidas.

Palavras-chave: Radar de Penetração no Solo; Eletrorresistividade; Barragem de Terra; Inspeção Geofísica de Maciço.

Abstract

Geophysical methods are powerful tools available for geotechnical investigation in a non-intrusive/destructive manner. Its use allows, among other aspects, the extrapolation of specific results from geotechnical investigations in a much safer and more reliable way. Among the various existing methods, georadar (GPR) and electroresistivity (ER) stand out for their frequent use, despite the increasing use of seismic techniques for shallow investigations. It should be noted, however, that even when different geophysical techniques are used in the same area, the interpretation of the results obtained generally occurs in a decoupled manner, without sharing the information obtained by the different methods. In this work, results from percussion soundings (SPT) are used to calibrate the ER sections to create an initial model of the dam mass. Next, the GPR data is analyzed in order to delimit the layers that make up the massif, in addition to being analyzed together with the results obtained with electroresistivity. Finally, we sought to identify the most critical regions of the dam massif given the lowest values of electrical resistivity and radar signal speed attenuation, that is, in the wetter regions.

Keywords: Ground penetrating radar; Electroresistivity; Earth Dam; Geophysical Inspection of the Massif.

1 INTRODUÇÃO

A inspeção de segurança de barragem é um instrumento importante para monitorar o estado de conservação da barragem, observar a ocorrência de anomalias na sua fase inicial e avaliar o nível de perigo da barragem. Devem ser realizadas a pé e podem utilizar alguns equipamentos como drones, binóculos e outras ferramentas. Para tanto, são vistas o barramento principal e suas estruturas associadas como ombreiras, talude de montante, talude de jusante, extravasor, dreno de fundo e os instrumentos vinculados ao monitoramento de barragem que estão instalados pelo empreendedor. As inspeções devem ter uma metodologia bem definida e periódica.

Segundo Miranda (2006), a inspeção do barramento de uma barragem, seja ela uma barragem de rejeito ou não, pode ser feita de duas maneiras, sendo apenas um profissional, ela é feita através de um caminhamento em “zigue zague” pelo mesmo. Caso seja mais de um, pode ser realizada através de caminhamentos paralelos à estrutura, essa inspeção é a chamada inspeção visual.

Contudo, esse tipo de inspeção não é suficiente para monitorar o estado de conservação do maciço da barragem como um todo, pois são apenas inspeções visuais, e não avalia o estado de conservação interna do barramento, como possível falhas, fraturas, nível e avanço da água e possível zonas de fragilidade causada pela percolação e concentração da água.

Em virtude das limitações das inspeções visuais, os métodos geofísicos se apresentam como ferramentas complementares às inspeções tradicionais, podendo trazer informações valiosas quanto a inspeção interna do maciço. Além disso, os métodos geofísicos abrangem grandes áreas de investigações e podem atingir profundidades que extrapolam as fundações do maciço da barragem.

Dentre várias técnicas geofísicas que podem ser empregadas para tal objetivo, os métodos GPR e Eletrorresistividade (ER) se destacam por se complementarem e são essenciais para imagear, delimitar e quantificar as estruturas internas do barramento da barragem (LUCAS; FANKHAUSER; SPRINGMAN, 2017).

O GPR, tem como principal vantagem sobre os outros métodos a sua rapidez nas investigações e no fornecimento dos resultados, principalmente quando se usa a técnica de aquisição conhecida como afastamento constante. A ER apresenta-se como uma excelente ferramenta de investigação do subsolo, sendo uma das grandes vantagens de sua utilização a possibilidade de imagear o subsolo horizontalmente e verticalmente através da técnica do

caminhamento elétrico (CE), além de permite obter uma visão mais ampla do barramento, principalmente para as variações de resistividade elétrica.

GPR e a ER são técnicas geofísicas que quando usadas individualmente apresentam vantagens e limitações. Seu uso em conjunto permite extrair respostas mais precisas e confiáveis do que o uso somente de uma dessas ferramentas.

Com isso, nessa pesquisa foram utilizados o GPR e a ER, através do afastamento constante e caminhamento elétrico, respectivamente, para inspecionar o maciço de uma barragem localizada no Estado da Bahia. Neste trabalho, as técnicas GPR e ER são utilizadas e tiveram seus dados analisados de forma integrada, de modo a produzir informações mais assertivas acerca das condições internas do maciço da barragem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho, vantagens e limitações das técnicas geofísicas GPR e ER, separadamente, e verificar se o uso integrado das duas técnicas é capaz de mapear zonas mais resistentes do maciço da barragem e também as mais críticas quanto ao avanço da água, ou seja, regiões de baixa resistividade elétrica e atenuação do sinal de radar.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aquisição de dados de GPR e Eletrorresistividade e processamento dos dados;
- Calibração das seções de ER e elaborar um modelo geoelétrico/geológico interpretado com o tipo de material e suas faixas de resistividade elétrica;
- Detectar o contato entre camadas de solo do maciço da barragem;
- Identificar as zonas resistentes e as críticas/úmidas acerca dos valores de baixa resistividade elétrica e atenuação do sinal de GPR;
- Identificar o nível da água.

2 MÉTODOS DE ESTUDOS

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação do subsolo, através de aquisição dos dados, processamento e interpretação. Suas aplicações se estendem nas mais variadas áreas das geociências e também na engenharia geotécnica. Na geotecnia os métodos geofísicos se destacam principalmente por extrapolar o alcance de investigação dos métodos geotécnicos tradicionais e fornecerem informações da subsuperfície em grande escala que podem auxiliar nas tomadas de decisões em um projeto de geotecnia. Dentre os métodos existentes, destacam-se pelo seu uso frequente o radar de penetração no solo (GPR) ou georadar e a eletrorresistividade (ER), apesar do crescente uso dos métodos sísmicos.

2.1 ELETRORRESISTIVIDADE

As propriedades elétricas dos materiais geológicos estão diretamente ligadas com as propriedades físicas que interferem na circulação da corrente elétrica ou propagação de ondas eletromagnéticas no meio. Eletricamente, as rochas são compostas por conjuntos de agregados heterogêneos de grãos isolantes ou condutores.

O fluxo de cargas elétricas no meio pode ocorrer na forma eletrônica (elétrons livres, como nos metais) ou eletrolítica (íons provenientes da dissociação de sais) e depende de alguns fatores intergranulares como a porosidade, composição mineralógica, grau de saturação e salinidade (NGUYEN, 2014). Um dos principais parâmetros elétricos que caracterizam uma rocha, é a resistividade elétrica (ρ), que é uma propriedade que mede a dificuldade da passagem da corrente elétrica pelo meio circundante (TELFORD; GELDAR; SHERIFF, 1990).

De um modo geral, as rochas apresentam alta resistividade à circulação das cargas elétricas, o contrário ocorrendo se o meio apresentar falhas, fraturas ou fissuras preenchidas por fluido eletrolítico. Nos solos e formações porosas, o grau de saturação e a natureza eletrolítica dos fluidos contidos nos poros controlam os valores de resistividade elétrica (ou seu inverso, a condutividade elétrica). A porosidade e o grau de saturação estão intimamente ligados com a resistividade, de forma que a mesma decresce à medida que o conteúdo de água do meio aumenta. (CAVALCANTI; LIMA, 2013). A Tabela 1, apresenta as faixas de variações de resistividade de alguns materiais geológicos estudados por Sharma (1986).

Tabela 1 – Tipos de materiais geológicos e faixa de resistividade

Materiais Geológicos	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Solo argiloso	10 – 20
Solo argilo-arenoso	20 – 40
Solo areno-argiloso	40 – 60
Solo arenoso	60 – 3×10^2
Argilito	10 – 20
Arenito	60 – 3×10^2
Calcário	10^2 – 5×10^3
Anidrita	10^4 – 10^5
Basalto	80 – 3×10^2
Metamórficas	2×10^2 – 6×10^3
Ígnea	10^3 – 6×10^3

Fonte:(BRAGA, 2016).

O princípio da aplicação do método consiste basicamente na injeção de corrente elétrica (I) no subsolo através de dois eletrodos de corrente, denominados de A e B, e a diferença de potencial (ΔV) pode ser medida por outros dois eletrodos, M e N. Em uma aquisição geoeletrica com o uso do método da eletrorresistividade, o meio investigado é considerado homogêneo e o parâmetro físico investigado é a resistividade elétrica aparente (ρ_a) e pode ser obtida através da Equação 1. No entanto, o meio não apresenta homogeneidade, e sim heterogeneidade, e a resistividade elétrica verdadeira é obtida a partir de um processo chamado inversão geofísica.

No sistema internacional de unidade (S.I.), a resistividade elétrica ρ é dada em ohm vezes metro ($\Omega \cdot m$); a condutividade elétrica σ , em Siemens por metro (S/m); a corrente elétrica I, em Ampére (A) e a diferença de potencial ΔV , em volt (v).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

Onde, K é o fator geométrico (Equação 2) que depende exclusivamente da configuração de eletrodos, sendo aplicado para qualquer configuração de quatro eletrodos.

$$K = 2\pi \times \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (2)$$

Existem vários arranjos de eletrodos ou configurações de eletrodos, dentre eles os principais são: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, pólo-dipolo e polo-polo. Os dois primeiros, geralmente são usados na forma de sondagem elétrica vertical, e os três últimos, na forma de caminhamento elétrico. Para este trabalho foi empregado o método da eletrorresistividade com uso da técnica do caminhamento elétrico e configuração de eletrodo dipolo-dipolo.

2.2 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO – GPR

O GPR (ou georadar ou ainda radar de penetração no solo) é um dos métodos integrantes dos métodos eletromagnéticos e sua aplicação tem como objetivo mapear em alta definição as camadas mais próximas à superfície, bem como as descontinuidades (falhas, fraturas, fissuras, interface), feições geológicas, objetos e interferências enterrados. O método apresenta algumas similaridades com o método sísmico de reflexão, enquanto a sísmica se baseia na propagação de ondas elásticas, o GPR, na propagação de ondas eletromagnéticas, cada um com suas vantagens e limitações.

Basicamente o método GPR consiste na emissão de um pulso eletromagnético de frequência que pode variar de 10 a 2500 MHz, a escolha da frequência é pré-definida e varia de acordo o objetivo e a profundidade de investigação, já que quanto maior a frequência, menor a profundidade de investigação e maior a resolução, enquanto que para frequências menores, a profundidade de investigação aumenta, porém, a resolução é menor. O pulso emitido pela antena transmissora se propaga pelo meio e ao se deparar com uma interface que separa dois meios com propriedades elétricas distintas, o pulso sofre reflexão, refração ou difração. O sinal refletido ou difratado para a superfície é captado pela antena receptora e armazenado em forma de traço que é registrado em função do tempo de chegada, o conjunto de traços registrados forma o radargrama, que ao passar por etapas de processamentos básico ou avançado, passa a ser denominado de seção de GPR ou seção de georadar.

Segundo Pestana e Botelho (1997) a velocidade e atenuação do pulso eletromagnético, depende das propriedades elétricas e da constante dielétrica ou permissividade dielétrica do meio em que se propaga, tais propriedades podem variar em função da composição mineralógica do meio, da porosidade e do teor de umidade. A caracterização do meio ocorre em

função dos contrastes das propriedades eletromagnéticas, principalmente da condutividade elétrica (AMPARO et al., 2007). A Tabela 2 apresenta alguns materiais com seus respectivos valores de constante dielétrica ϵ_r , condutividade elétrica σ , velocidade de propagação V e atenuação α do pulso eletromagnético.

Tabela 2.2: Tipos de materiais e valores de constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade de propagação e atenuação da onda eletromagnética.

Material	ϵ_r	$\sigma(mS/m)$	$V(m/ns)$	$\alpha(dB/m)$
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-2}
Água	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^3	0,01	103
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,001
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1	0,06	0,03 – 3
Calcário	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
Argila xistosa	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Silte	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argila	5 – 40	2 – 100	0,06	1 – 300
Granito	4 – 60	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
Gelo	3 – 4	0,01	0,16	0,01

Fonte: (DAVIS; ANNAN, 1989)

As técnicas de aquisição com o sistema GPR são bastante similares às empregadas na sísmica de reflexão. Geralmente as duas principais técnicas de aquisição utilizadas para as aplicações de GPR são: afastamento constante e ponto médio comum (ANNAN, 1992). Neste trabalho será utilizado a técnica do afastamento constante.

O afastamento constante é uma técnica de execução rápida, sendo que a distância entre as antenas transmissora e receptora é mantida fixa e permite que toda a geometria do arranjo seja deslocada ao longo da linha investigada (Figura 2.1). Esse tipo de técnica permite investigar mudanças laterais ao longo de uma superfície de interesse e os resultados obtidos podem ser analisados em forma de radargramas, onde no eixo horizontal são localizadas as distâncias percorridas pelo sistema GPR e no vertical, o tempo de trânsito (ida e volta) percorrido pelo pulso eletromagnético refletido.

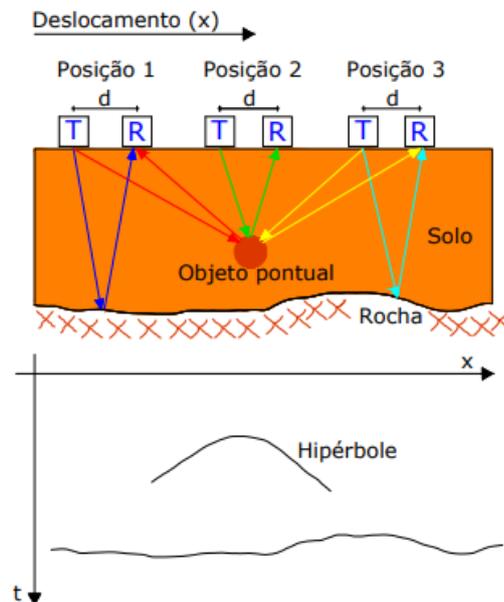
O radargrama é originado devido às reflexões dos pulsos emitidos decorrentes dos contrastes dielétricos existentes no subsolo. O sinal refletido quando proveniente de um alvo pontual, resulta em uma hipérbole no radargrama. As reflexões também podem ocorrer em

camadas de solos, porém no radargrama terá como resultado um forte refletor ou até mesmo hipérboles, porém, nesse último caso não se trata de um alvo pontual, e sim de um contato entre meios geológicos com propriedades elétricas distintas.

A Figura 2.1 ilustra esta técnica de aquisição, em que a antena transmissora (T) emite um pulso eletromagnético que se propaga pelo meio e ao incidir em um alvo pontual (contrastes dielétricos), o pulso será refletido para a superfície e captado por uma antena receptora (R). Na posição (1) inicia-se a construção da hipérbole, devido a presença do objeto pontual. O pico da hipérbole ocorre na posição (2), que é a maior aproximação da antena do objeto e o menor tempo de propagação do pulso.

O radargrama é gerado em função do deslocamento (x) das antenas e o tempo (t) de trânsito do pulso. No caso de um objeto pontual, no radargrama este é representado como uma hipérbole.

Figura 2.1 – Esquema de execução de ensaio utilizado para a construção do radargrama através da técnica afastamento constante.



Fonte: (AMPARO, 2006)

A velocidade média entre a superfície do solo e o objeto pontual nessa técnica pode ser obtida através da Equação 3, obtida no ajuste da hipérbole aos tempos de chegada medidos em diversas posições x.

$$v = \frac{2 + \sqrt{x^2 + z^2}}{t} \quad (3)$$

Em que, x é a posição central das antenas localizadas na superfície acima do objeto, z , é a profundidade na qual se encontra o alvo e t é o tempo de chegada da onda refletida.

3 METODOLOGIA

Nessa pesquisa foram utilizadas duas diferentes técnicas geofísicas, GPR e ER, além de resultados de ensaios de prospecção direta com o uso da técnica de sondagens de simples reconhecimento com SPT, obtidos de estudos anteriores realizados na crista da barragem. Procurou-se, com o emprego das diferentes técnicas de investigação, auxiliar na interpretação dos resultados obtidos em campo.

Os resultados das sondagens à percussão foram utilizados para melhor identificação dos tipos de materiais nas seções de GPR, enquanto nas seções de ER, foram utilizados para calibração das seções e construção de um modelo interpretado do tipo de material constituinte da crista da barragem.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A barragem alvo deste estudo, está localizada no estado da Bahia, e tem finalidade para acúmulo de rejeito. Basicamente é uma barragem de terra, constituída de materiais naturais (argila, silte e areia) e com face do talude de jusante constituída por cascalho e talude montante, por enrocamento, fragmento de rocha. O maciço da barragem tem uma altura média de 5 metros e extensão de aproximadamente de 380 metros. Os estudos de geofísica com GPR e ER, foram realizados na crista da barragem, passando pelos pontos onde foram realizadas as sondagens à percussão, e no mesmo alinhamento para melhor comparação entre os resultados.

3.2 PROSPECÇÃO DE CAMPO

Os dados para realização deste trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

Os dados de GPR foram coletados com o uso de um equipamento GPR da empresa Mala Geoscience, constituído de uma CPU, computador portátil, medidor de distância (no caso um odômetro similar a uma roda de bicicleta), antena de 250 MHz, blindadas, pertencente ao GEOAMB da EP-UFBA, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Imagem obtida em campo do equipamento empregado nas investigações de GPR.



A técnica utilizada foi afastamento constante e separação entre as antenas transmissora e receptora de 0.3 m. Foram levantados 10 radargramas (Bar_S4_0033 a Bar_S4_0042) ao longo de toda extensão da crista da barragem com alcance máximo de 6.4 metros de profundidade.

Para os dados de ER, foi empregado o arranjo dipolo-dipolo através da técnica do caminhamento elétrico. Para isso foi utilizado um resistímetro Gm408ex e um comutador de 32 canais (Figura 3.2), também pertencente ao GEOAMB EP- UFBA, e fabricados pela empresa Sistronix Sistema de Automação, um cabo manga de 160 m, eletrodos de cobre, fios de conexões e solução salina para reduzir a resistência de contato entre o eletrodo e o solo, facilitando a injeção da corrente elétrica. Para a obtenção de imagens com maior resolução, nas sondagens de ER utilizaram-se espaçamentos entre eletrodos de 5 m. Procurou-se investigar todo alinhamento da crista da barragem, a qual foi possível obter uma única seção de aproximadamente 380 metros e alcance máximo de 30 metros que extrapolaram as profundidades máximas das sondagens geotécnicas e de GPR.

Figura 3.1 – Imagem obtida em campo do equipamento utilizado em campo para aquisição dos dados geoeletricos.



3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

3.3.1 GPR

Após a campanha de levantamento dos dados de GPR, os radargramas obtidos em campo com antena 250 MHz passaram por algumas etapas de processamento básicos, a fim de melhorar a razão sinal/ruído, transformando-os em produtos com melhor visualização, e assim, possibilitando uma melhor interpretação do comportamento das camadas do maciço em subsuperfície e identificação dos alvos/anomalias.

Inicialmente foi realizada a correção do tempo zero, com o intuito de reposicionar os receptores no tempo correto e evitar erros para conversão da profundidade. Na sequência os radargramas foram submetidos ao filtro *Dewow*, com o objetivo de corrigir o efeito de saturação de amplitude causado por um componente transiente de baixa frequência e que mascara o sinal de radar e dificulta a visualização. Após as duas primeiras etapas, foi aplicado um ganho (*gain*) para melhorar o aspecto visual dos radargramas e realçar as amplitudes mais profundas. Por fim, com os valores de velocidade calculados do ajuste das hipérbolas obtidas em campo, foi realizada a conversão para profundidade. Todas as etapas do processamento foram realizadas através de um *script* escrito na linguagem R, desenvolvido pelo GEOAMB da EP-UFBA.

3.3.2 ELETORRESISTIVIDADE

A campanha de aquisição dos dados geoeletricos possibilitaram realizar as leituras dos parâmetros físicos corrente elétrica, potencial telúrico natural e potencial induzido. Esses dados foram essenciais para determinação do parâmetro resistividade elétrica aparente através da

Equação 1. Para obtenção da seção invertida ou seção de resistividade elétrica verdadeira, os dados de resistividade aparente passaram por uma etapa de inversão geofísica, a fim de obter a melhor seção de distribuição de resistividade elétrica representativa das camadas internas do maciço da barragem. Os dados foram invertidos em um software comercial e o resultado da inversão em formato de arquivo .xyz (distância, profundidade e resistividade elétrica verdadeira) foram plotados utilizando um *Script* em R também desenvolvido pelo GEOAMB, com o objetivo de gerar uma seção 2D para melhor interpretação e comparação com os resultados obtidos com o GPR.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GPR

São apresentadas nesta subseção, as figuras com as seções de GPR (Figura 4.1 a 4.10), resumindo os resultados obtidos em campo com a antena de 250 MHz. Para fins de comparação e uma melhor análise das seções de GPR, os resultados das sondagens SPT (perfil de solo) foram plotados sobre os perfis de GPR. Cada SPT foi plotado na respectiva seção de GPR e na posição correspondente. Todas as camadas identificadas nas seções de GPR são representadas pela C (exemplo: C1, C2 e C3) e delimitadas com uma linha preta, bem como as regiões de maior concentração de sedimentos grossos (hachurado em verde). A seção de GPR também permite diferenciar, qualitativamente, regiões de baixa e alta resistividade elétrica, pois as regiões de baixa condutividade elétrica apresentam refletores de alta intensidade de reflexão e as anomalias cortadas pela seção (indicadas pelos triângulos amarelos) aparecem com maior intensidade. A Tabela 4.1 mostra os intervalos abrangidos por cada seção de GPR com início e fim, ao longo de todo alinhamento da crista da barragem, bem como seu respectivo nome (Ex.: Bar-0033-A1 a Bar-0042-A1).

Tabela 3 – Posicionamento de cada seção de GPR, com início e fim, ao longo de todo trecho investigado da Crista/Trecho 01 da barragem com antena de 250 MHz.

Seção de GPR	Início (m)	Fim (m)
Seção 1, Fig. 4.1 (Bar-0033-A1)	0	42
Seção 2, Fig. 4.2 (Bar-0034-A1)	42	84
Seção 3, Fig. 4.3 (Bar-0035-A1)	84	126
Seção 4, Fig. 4.4 (Bar-0036-A1)	126	168
Seção 5, Fig. 4.5 (Bar-0037-A1)	168	210.1
Seção 6, Fig. 4.6 (Bar-0038-A1)	210.1	237.17
Seção 7, Fig. 4.7 (Bar-0039-A1)	237.17	236.55
Seção 8, Fig. 4.8 (Bar-0040-A1)	236.55	305.55
Seção 9, Fig. 4.9 (Bar-0041-A1)	305.55	365.57
Seção 10, Fig. 4.10 (Bar-0042-A1)	365.57	407.57

Conforme se pode observar, as seções de GPR da Figura 4.1 a 4.10, realizadas na crista da barragem, apresentam um padrão bem similar de continuidade das camadas (C). Nota-se que foi possível delimitar 2 camadas (C1 e C2) em algumas seções e 1 (C1) em outras, mapeadas com a antena de 250 MHz.

As seções de GPR obtidas com a antena de 250 MHz, mostraram que ao longo de toda extensão da crista da barragem existe uma predominância de material arenoso e sedimentos grossos/pedregulho, com profundidade variando entre 1.2 e 2.5 m, devido a presença de várias hipérboles de difração, com baixa atenuação de sinal, o que normalmente corresponde a solos com baixa umidade (ou baixa condutividade elétrica) e alta resistência mecânica. As seções das Figuras 4.1 e 4.2 mostram que a camada C1, até a extensão 84 m da crista da barragem (a partir do vertedouro, (fim da seção Bar_S4_0034_A1, na Figura. 4.2) e profundidade de 1.65 m, possui baixa atenuação do sinal de GPR e alta velocidade de propagação dos pulsos de radar, indicando baixa umidade. Verifica-se a ocorrência de fortes refletores horizontalizados que podem estar associados a presença de material arenoso ou areia siltosa/silte arenoso de alta resistência/compacto, o que está de acordo com os valores de NSPT variando entre 11 e 30 golpes, obtidos nas sondagens SP-13 e SP-14. Para uma melhor visualização desta região, uma camada hachurada na cor verde transparente foi aplicada.

A partir de 84 m até 305.55 m de extensão da crista e profundidade média de 2.5 m, conforme pode-se observar nas seções das Figuras de 4.3 a 4.8, verifica-se um comportamento bastante similar de continuidade da camada C1, delimitada por linha contínua preta e hachurada na cor verde transparente. Em outras palavras, a partir da Fig. 4.3 a camada C1 se apresenta com fortes refletores, podendo-se observar a presença de diversas hipérboles de difração. Esse

comportamento é um indicativo de uma região de baixa condutividade elétrica (e alta resistência, com NSPT variando entre 8 e 24 golpes) e presença de material arenoso com predominância de material grosseiro/pedregulho, conforme descrito nos resultados das sondagens SP-04, SP-03, SP-05 e SP-02 ao longo da crista e até a profundidade de 1.75 a 2.5 m.

De 305.55 até 407.57 m de extensão e até a profundidade média de 2 m, conforme mostra as Figuras 4.9 e 4.10, verificam-se fortes refletores horizontalizados com presença de hipérboles, sendo indicativo de material arenoso com presença de sedimentos grossos/pedregulho, principalmente na seção da Figura 4.9, o que denota uma região de baixa condutividade elétrica e alta resistência, sendo confirmada pelo elevado NSPT de 19 e 20 golpes, de acordo o resultado da sondagem SP-01. Ao final da Figura 4.9 e início da Figura 4.10, esta camada e material de textura mais grossa se aprofunda, não sendo este aprofundamento captado por nenhuma das sondagens SPT realizadas no local. Basicamente essa mesma região (camada C1) com fortes refletores e presença de hipérboles de difração, reforça a presença de sedimentos grossos/pedregulhos ocorrem ao longo de todo trecho da crista, (Figura 4.1 a 4.10).

Abaixo das camadas C1 e C2 verifica-se que houve atenuação do sinal de GPR, principalmente na seção da Figura 4.5 em que o N.A. está na profundidade de 3.49 m, conforme o resultado da sondagem SP-04. Esse comportamento de alta atenuação do sinal de GPR está associado à presença de material fino e úmido/saturado.

Figura 4.1: Seção 33, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

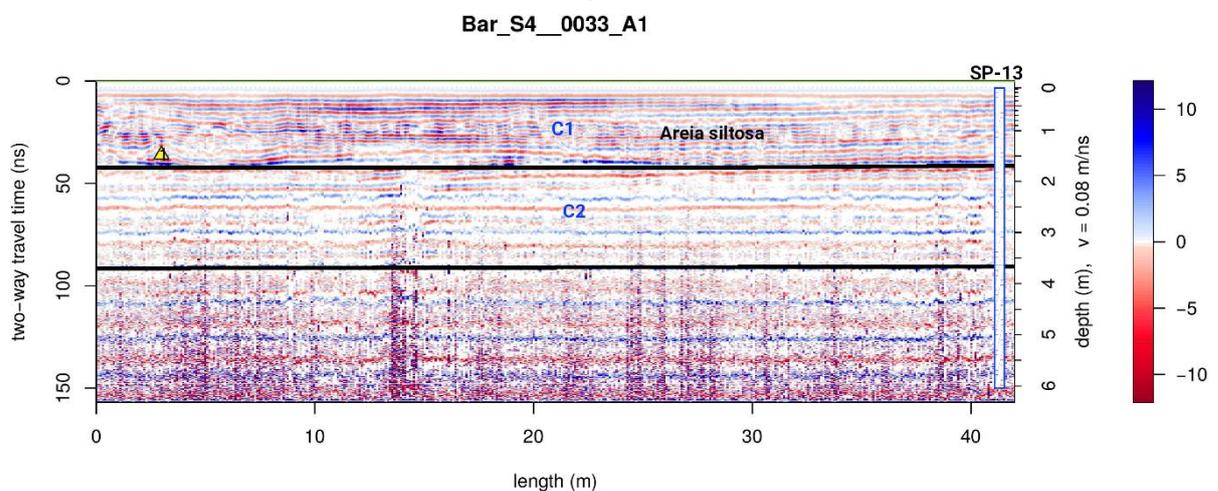


Figura 4.2: Seção 34, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

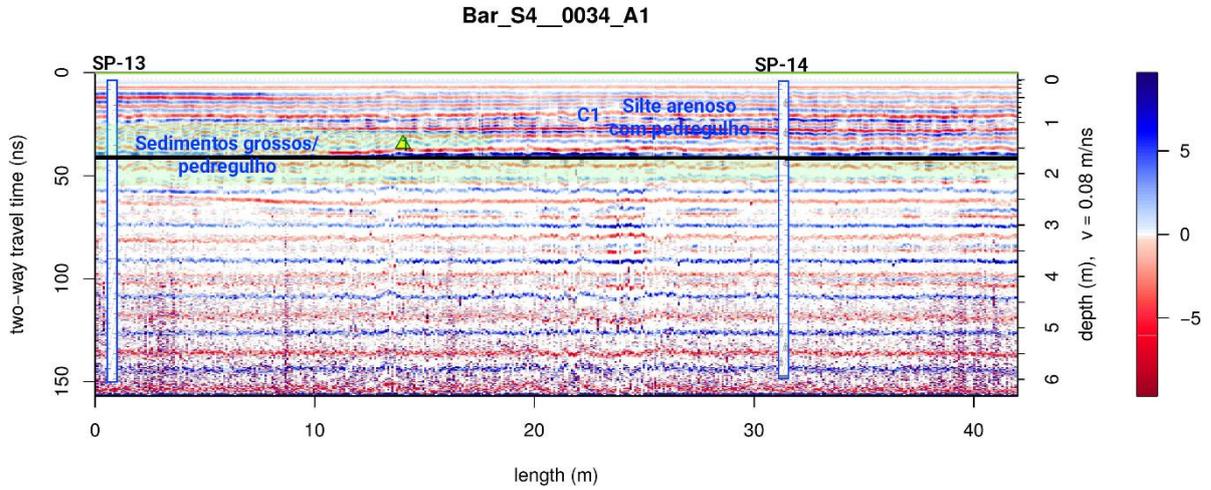


Figura 4.3: Seção 35, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

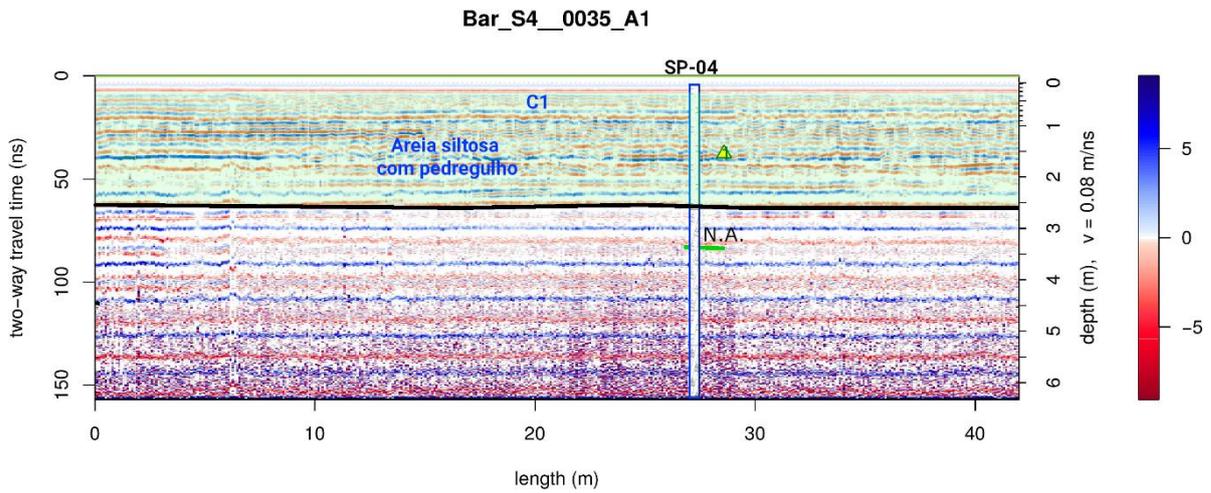


Figura 4.4: Seção 36, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

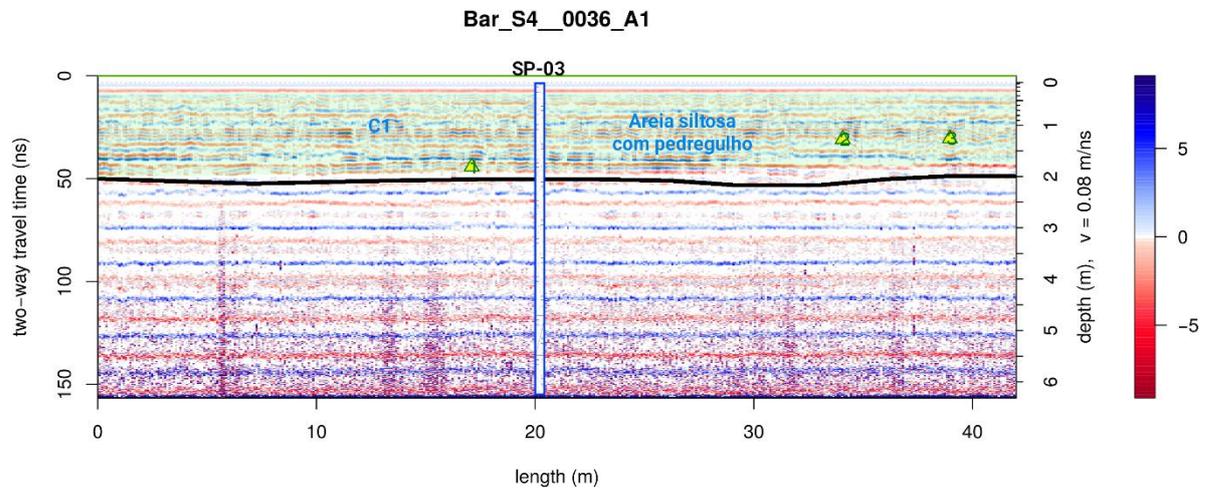


Figura 4.5: Seção 37, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

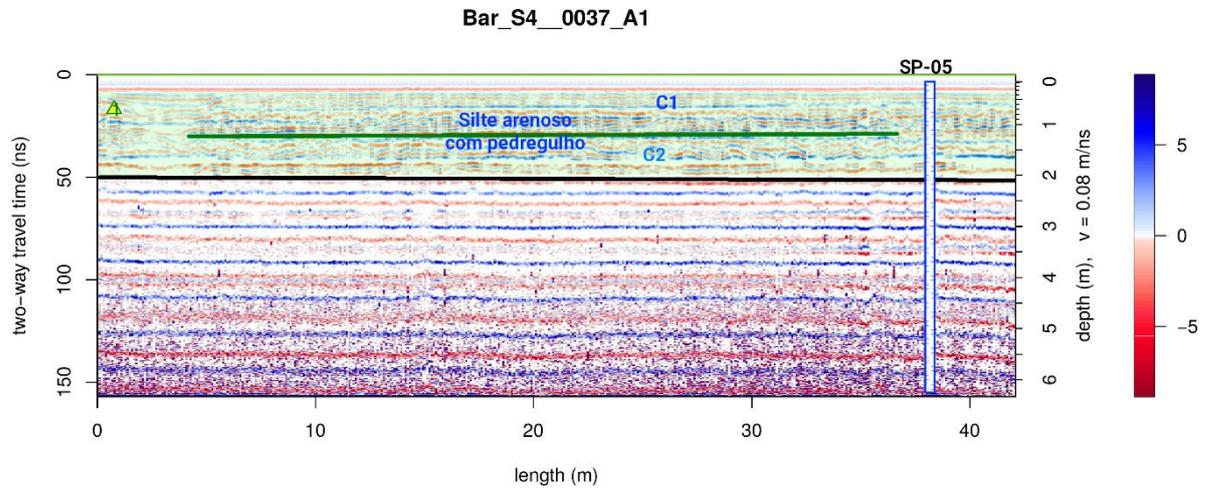


Figura 4.6: Seção 38, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

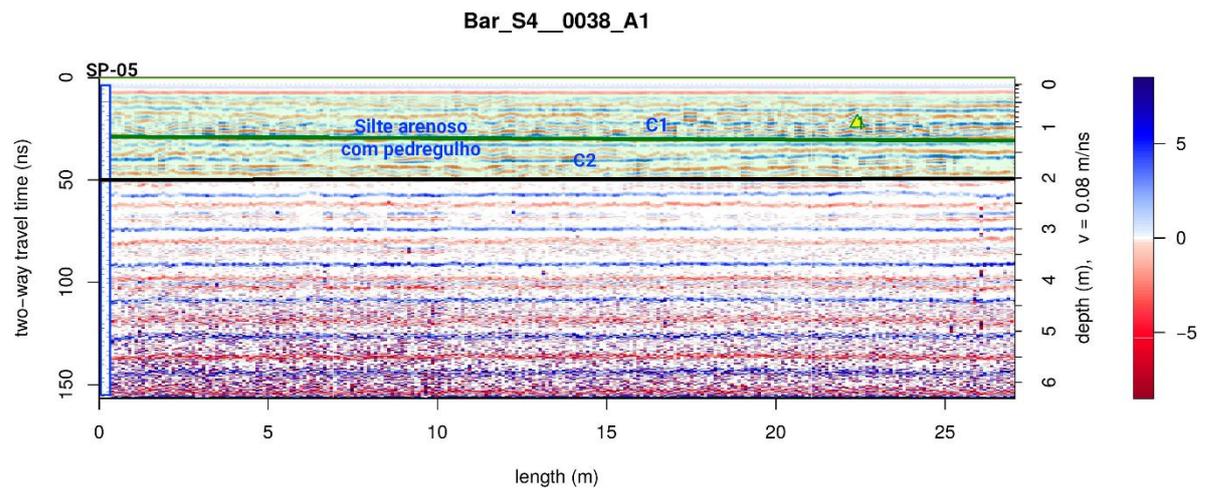


Figura 4.7: Seção 39, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

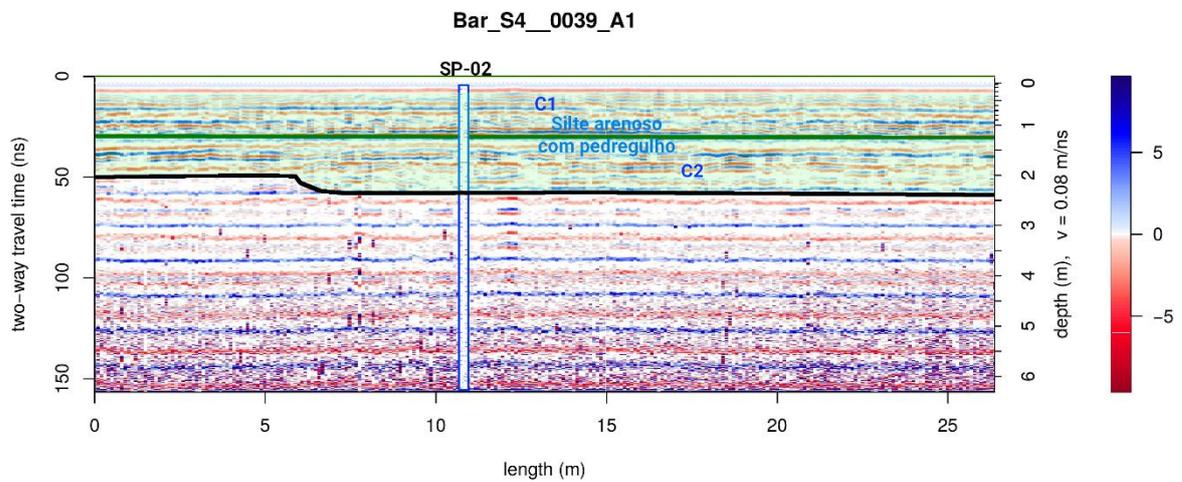


Figura 4.8: Seção 40, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

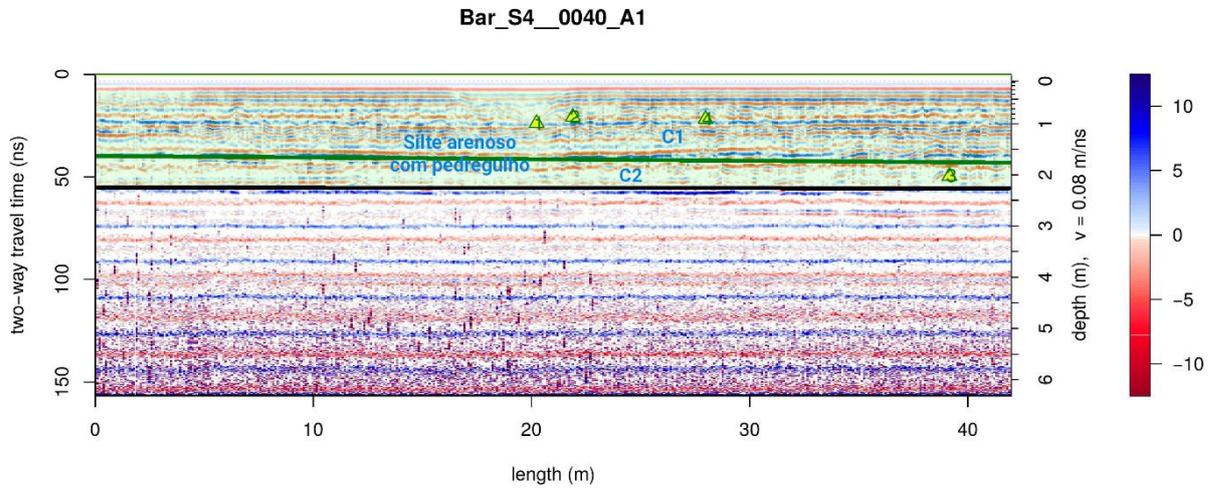


Figura 4.9: Seção 41, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.

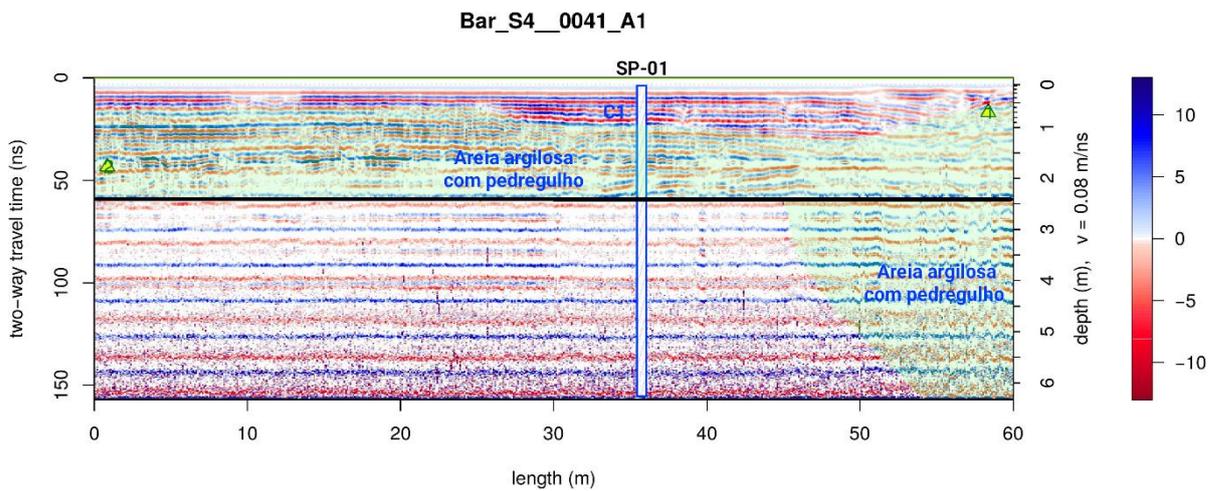
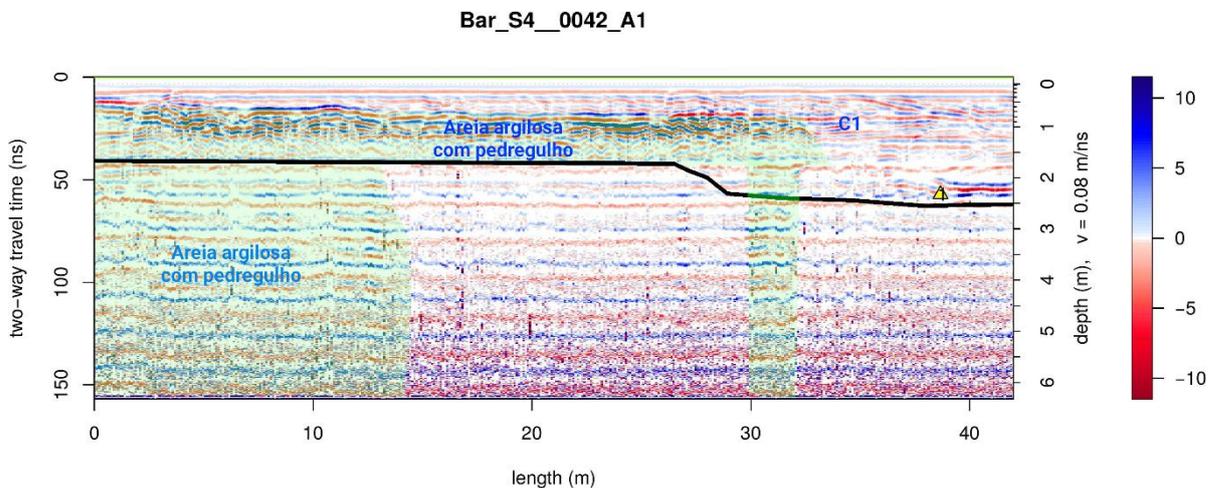


Figura 4.10: Seção 42, obtido na crista da Barragem S4, com a antena de 250 MHz. Resultados com filtro *dewow* e ganho.



4.2 ELETORRESISTIVIDADE

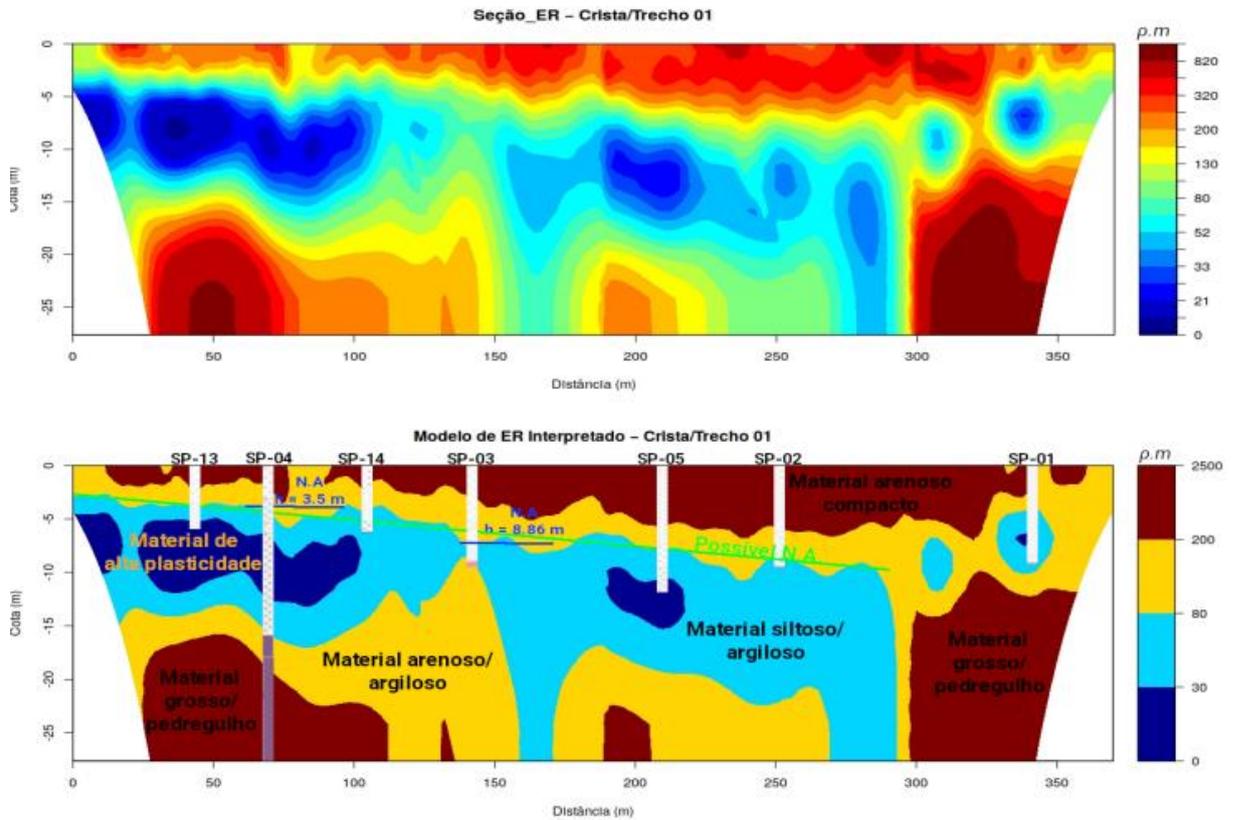
É apresentada neste tópico a seção de resistividade elétrica verdadeira ou seção invertida (Figura 4.11) obtida na crista da barragem. Na sequência, também é apresentado um possível modelos interpretados de comportamento das camadas geológicas para o trecho investigado, de acordo com os resultados das sondagens SPT.

A Figura 4.11 mostra ao longo de toda extensão da crista da barragem, com pequenas interrupções, a presença de uma camada superficial que, de uma forma geral, tem condutividade elétrica baixa, característica de solos grossos e/ou com baixos valores de umidade, com valores acima de 200 *ohms.m*. Esses valores elevados podem decorrer da presença de sedimentos arenosos e siltsos, sendo no caso provavelmente compactados, com NSPT variando ao longo de todo trecho investigado de 14 a 37 golpes, conforme os resultados das sondagens SPT.

A partir da camada de material arenoso da crista, até uma profundidade entre 5 e dez metros, com aprofundamento para o lado direito da Fig. 4.11, há uma camada com resistividades de transição, entre 80 e 200 *ohms.m*. Esta camada corresponde a solos com texturas mais finas que a parte superficial, contudo, acima do lençol freático. A partir daí aparecem camadas com valores de resistividade entre 0 a 30 e 30 a 80 *ohms.m*, indicativas de sedimentos finos, siltsos e argilosos, saturados. Para estas camadas de baixas resistências elétricas, os valores de NSPT variam muito, indo desde materiais com consistência mole a uma camada de alteração de rocha. Isto indica que provavelmente temos no local uma camada de solo residual de rochas sedimentares com alto teor de argila. Devido à inclinação das camadas e às variações naturais na composição da rocha, a profundidade do topo rochoso varia bastante na área, não sendo descartadas a presença de matacões ou camadas/crostras de alta resistência mecânica.

Os resultados das duas sondagens SP-03 e SP-04 mostram que o N.A. foi detectado nas profundidades de 3.5 m no SP-04 e 8.86 m no SP-03, o que está totalmente compatível com o N.A. detectado (linha verde contínua) no resultado da sondagem geoeletrica do modelo interpretado, conforme mostra Figura 4.11. Além disso, foi detectado um provável material de alta plasticidade dentro da camada condutiva eletricamente, principalmente pelos baixos valores de resistividade elétrica, abaixo de 30 *ohms.m*, o que denota a região mais crítica devida a baixa resistência elétrica e alta umidade/saturação, conforme pode ser vista no modelo interpretado da Figura. 4.11. Abaixo da camada intermediária, os valores de eletrorresistividade sofrem um aumento, acima de 80 *ohms.m*, demarcando a presença de camadas de solo de textura grossa e alta resistência ou de camadas de sedimentos consolidados.

Figura 4.11: Seção de resistividade elétrica obtida na crista da barragem e um possível modelo interpretado com indicação dos pontos de sondagem à percussão SP.



4.2 ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS DE GPR E ELETRORRESISTIVIDADE

Neste tópico é feita uma análise conjunta dos resultados obtidos com as técnicas GPR e Eletorresistividade. Os resultados foram comparados até o fim da seção de GPR da Figura 4.9, o que corresponde até a distância de aproximadamente 366 m, sendo o limite da linha investigada com a eletorresistividade.

Verifica-se nas seções obtidas com ambas as técnicas geofísicas neste trecho (Figuras 4.12 à 4.20), que a camada superficial com profundidade máxima de 2.5 m, é a região onde os refletores de GPR são mais intensos, comportamento advindo da presença de material arenoso compactado, de baixa umidade e alta resistividade elétrica (ou baixa condutividade elétrica) com valores acima de 200 *ohms.m*, ao longo de toda extensão da crista da barragem, como pode-se verificar nas seções das Figuras 4.12 à 20. Abaixo de 2-2.5 m de cota até a cota de 4 m, a umidade do meio aumenta, diminuindo a intensidade de reflexão do sinal de GPR, o que pode ser justificado também pelo decréscimo dos valores de resistividade elétrica, ficando entre 80 e 200 *ohms.m*, principalmente nas seções das Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.20.

A partir da cota de 4 m, a umidade aumenta ainda mais, causando uma forte atenuação do sinal de GPR e uma baixa nos valores geoeletricos (abaixo de 80 ohms.m), principalmente nas seções das Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.20, provavelmente pela presença de material de caráter siltooso/arenoso e do N.A. detectado no resultado da sondagem SP-04 e no modelo geoeletrico interpretado da Figura 4.11.

Nas seções das Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e até a distância 235 m da seção da 4.20, a partir das cotas 2-2.5 m, o pulso eletromagnético perde intensidade de reflexão, porém a correspondente diminuição na resistividade do solo não é observada, provavelmente pela presença de material arenoso que tende a elevar os valores resistividade elétrica.

Figura 4.12: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

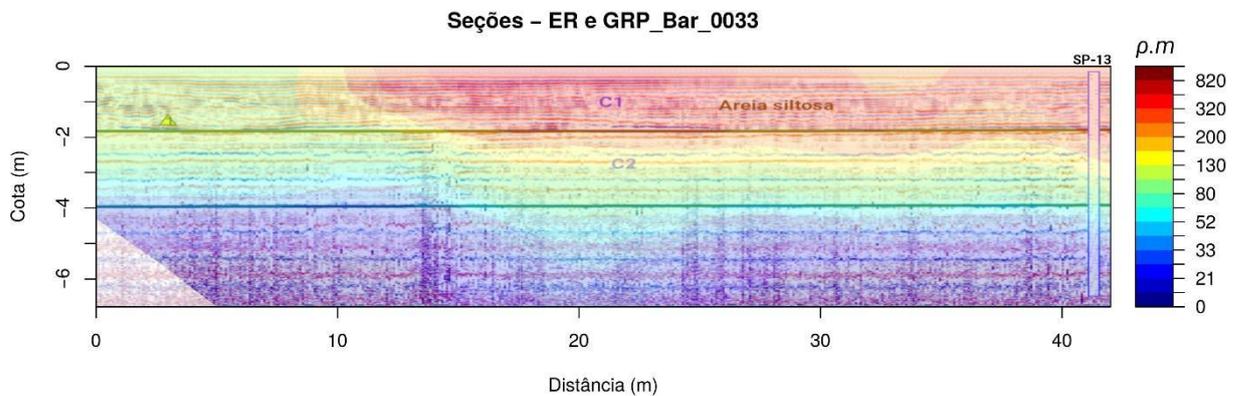


Figura 4.13: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

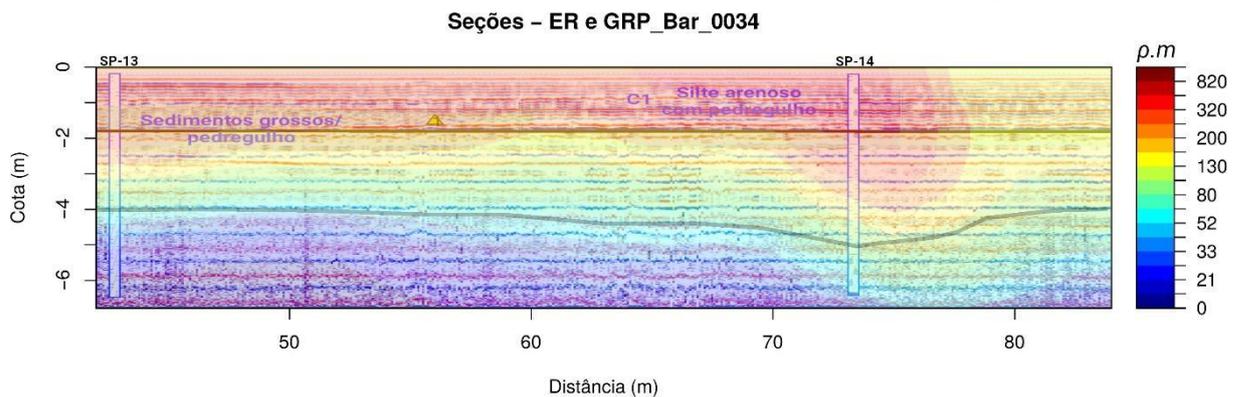


Figura 4.14: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

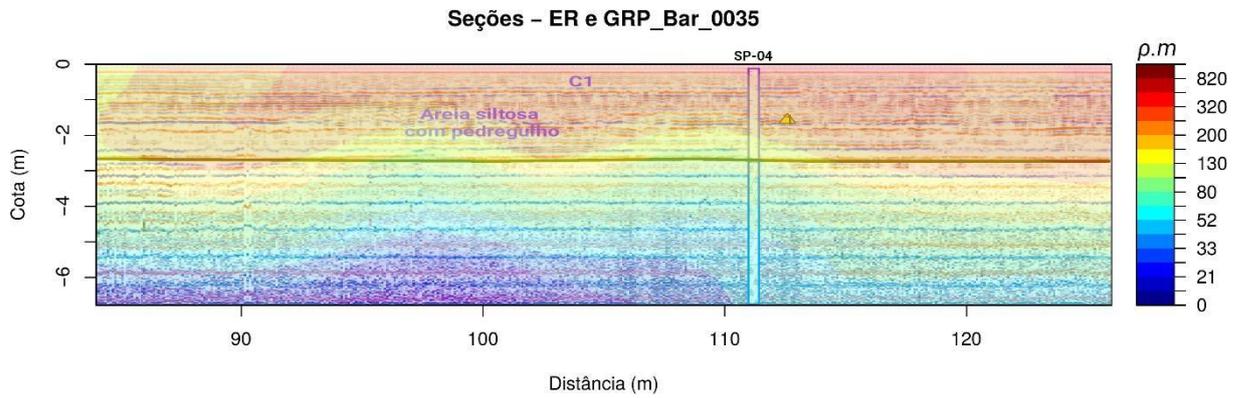


Figura 4.15: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

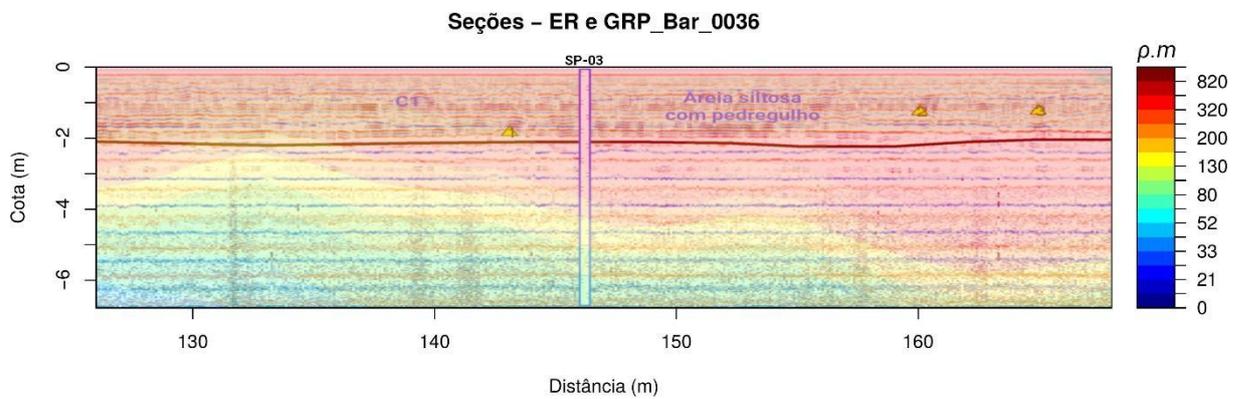


Figura 4.16: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

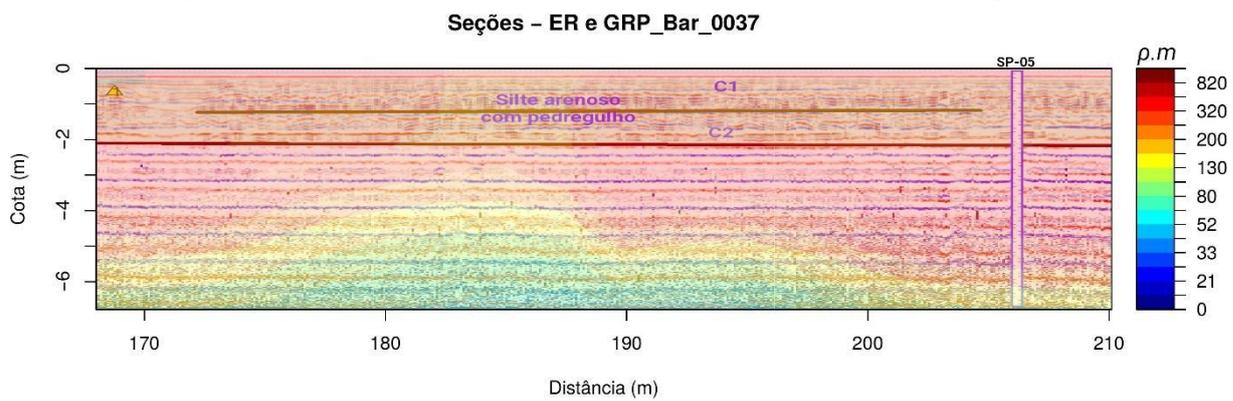


Figura 4.17: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

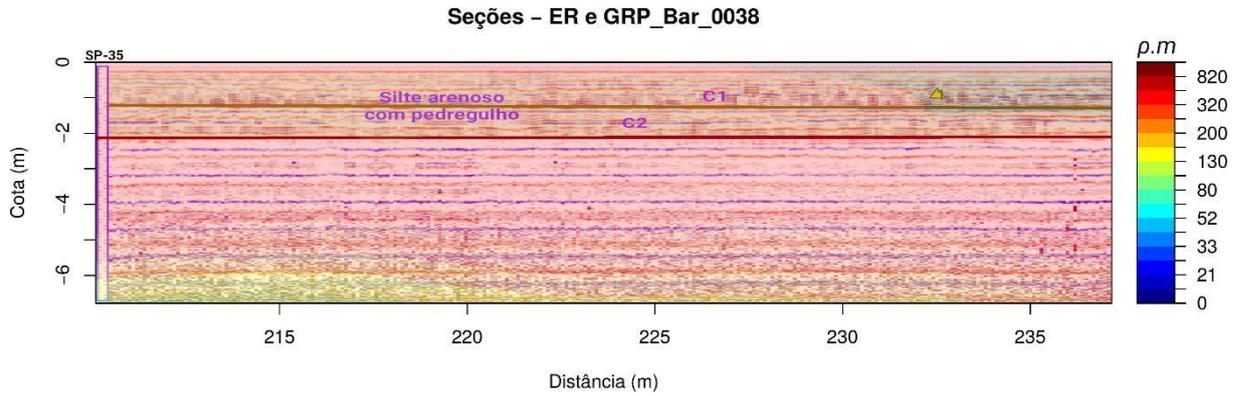


Figura 4.18: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

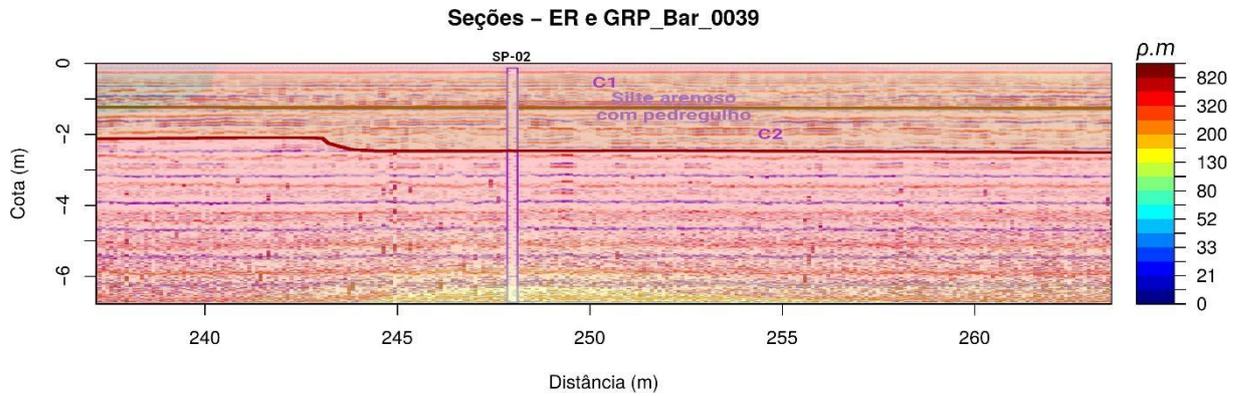


Figura 4.19: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.

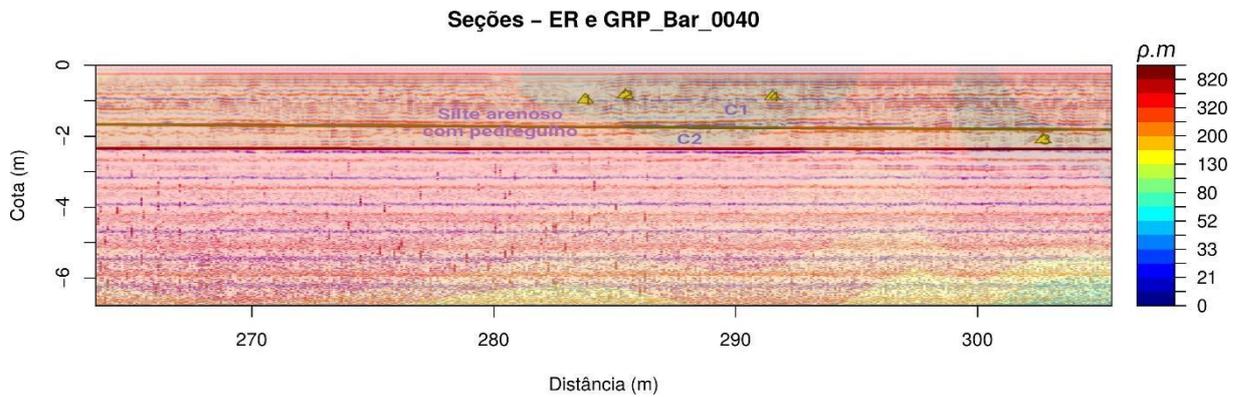
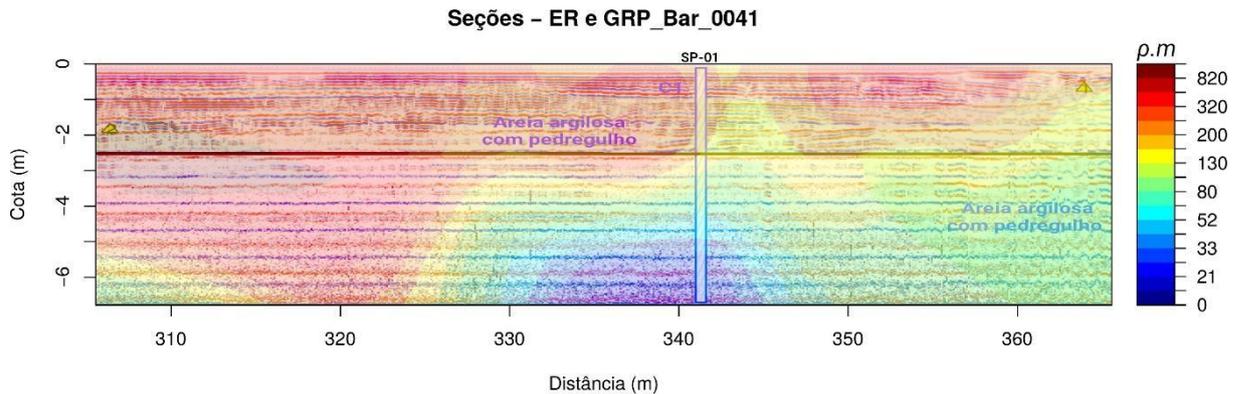


Figura 4.20: Seções de GPR e Resistividade Elétrica obtidas na crista da barragem S4.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo geral, os resultados obtidos com o uso das técnicas de GPR e Eletrorresistividade, possibilitaram mapear camadas com propriedades elétricas diferentes, ao longo de toda extensão da crista da barragem. As camadas mais resistentes, são as próximas à superfície, com profundidade máxima variando entre 2 e 2.5 m, são as regiões onde foram observadas as fortes refletoras de alta intensidade de reflexão e as sucessivas hipérbolas advindas das difrações da onda eletromagnética, bem como altos valores de resistividade elétricas, acima dos 120 *ohms.m*, principalmente no resultado geológico (Figura 4.11). As regiões mais críticas do maciço da barragem, ou seja, camadas de baixa resistividade, representativas de materiais siltosos/argilosos saturados, possuem uma ampla faixa de variação de valores de NSPT. Eles são referidos nas sondagens como desde argila de consistência mole até material argiloso de alteração de rocha. Desta forma, é possível de tratar do mesmo material com graus diferentes de intemperização, valendo a pena investigar se há uma tendência de diminuição dos valores de NSPT com o tempo, já que algumas rochas argilosas possuem alta velocidade de degradação. Em algumas seções são verificados contatos ou planos de acamamento sub-horizontais. Seria interessante a realização de ensaios de permeabilidade de campo para a verificação da influência destes acamamentos nos valores de permeabilidade do solo.

REFERÊNCIAS

- AMPARO, N. S. **Utilização do radar como método não intrusivo para a realização de medidas de conteúdo de água na zona vadosa**, 2006. 87p.
- AMPARO, N. S.; MACHADO, S. L.; BOTELHO, M. B.; DURADO, T. C. **Uso do GPR como uma ferramenta não intrusiva para o levantamento de perfis de umidade de campo**. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador, 2007. 236p.
- ANNAN, A. P. **Uses and techniques of ground penetrating radar in near-surface geophysics**: Workshop Notes. Society of Exploration Geophysicists, 1992. 110p.
- BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada: métodos geolétricos em hidrologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 55p
- CAVALCANTI, S. S.; LIMA, O. A. L. de. **Structural, lithological and petrophysical characterization of the recôncavo aquifer system in the Capivara River Basin, Bahia State, Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica, 2013. 391p.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy**. Geophysical Prospecting, 1989. 551p.
- LUCAS, D. R.; FANKHAUSER, K.; SPRINGMAN, S. M. **Application of geotechnical and geophysical field measurements in an active alpine environment**. Engineering Geology, 2017. 51p.
- MIRANDA, A. N. **Inspeção e Segurança de Barragens**, 2016.
- NGUYEN, S. T. **Micromechanical approach for electrical resistivity and conductivity of sandstone**. Journal of Applied Geophysics, 2014. 140p.
- PESTANA, R. C.; BOTELHO, M. A. B. **Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea**. Revista Brasileira de Geofísica, 1997. 10p.
- SHARMA, P. V. **Geophysical Methods in Geology**. Amsterdam: 1986. 462p.
- TELFORD, W. M.; GELDAR, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. 2a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 18p.