

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**INVESTIGAÇÃO DE CÉLULA EXPERIMENTAL EM ATERRO
SANITÁRIO ATRAVÉS DO USO DE RADAR DE PENETRAÇÃO NO
SOLO (GPR) – CAMPINAS, SP**

Tiago Kenzo Takeuti

Orientador: Prof. Dr. Renato Luiz Prado
Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-17/46)

SÃO PAULO

2017

De acordo,

Aluno: Tiago Kenzo Takeuti

Prof. Dr. Renato Luiz Prado

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais por toda a dedicação em minha educação e também dos meus irmãos. Além de serem minhas maiores referências e sempre me incentivarem a continuar aprendendo e me tornar uma pessoa melhor.

Agradeço também a toda minha família por estarem sempre por perto apoiando minhas decisões e me ajudando a alcançar meus objetivos.

Aos amigos que tenho desde a infância e também aqueles que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação, sem eles eu não teria chegado até aqui. Um agradecimento especial ao Willy Takasawa por ter me auxiliado durante as atividades de campo.

A todos os professores com os quais eu tive a oportunidade de aprender durante todos esses anos na universidade e também a todos os funcionários do IGc-USP.

Por fim, agradeço ao Dr. Fernando Augusto Saraiva e ao Prof. Dr. Renato Luiz Prado por terem me acompanhado e orientado durante todo este projeto. Eu sou muito grato por todo o conhecimento que me foi passado e o tempo dedicado para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

Resumo	vi
Abstract	vii
1. Introdução.....	1
2. Localização.....	2
2.1 Célula Experimental.....	3
3. Objetivos.....	4
4. Fundamentação Bibliográfica.....	4
4.1 Geologia Regional e Local.....	4
4.2 Trabalhos Prévios.....	5
5. Materiais e Métodos	5
6. Atividades de Campo e Resultados Obtidos	11
6.1 Primeira etapa	12
6.2 Segunda etapa	13
7. Interpretação e Discussão dos Resultados	14
8. Conclusões.....	24
9. Referências Bibliográficas	25

Lista de Figuras

Figura 1. Localização do aterro sanitário Delta A (22°54'57.52"S / 47°08'47.54"W), situado no município de Campinas, São Paulo. Modificado de Google earth ® (2016).	2
Figura 2. Localização da célula experimental dentro do aterro Delta A.	3
Figura 3. Croqui geral da célula experimental (Gabrielli et al., 2014).	4
Figura 4. Ilustração conceitual do radar sendo utilizado no modo de perfil de reflexão em solo sobre rocha (Modificado de Davis e Annan, 1989).	6
Figura 5. A relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades (Modificado de Davis e Annan, 1989).	7
Figura 6. Diagrama esquemático de um sistema GPR (Porsani, 1999).....	9
Figura 7. Antena de 100 MHz.	10
Figura 8. Computador e unidade de controle central.....	10
Figura 9. Vista geral da célula experimental.	11
Figura 10. Procedimento de aquisição das linhas de GPR.	11
Figura 11. Linhas realizadas na primeira etapa de campo.	12
Figura 12. Linhas realizadas na segunda etapa de campo.	14
Figura 13. Dados brutos.	15

Figura 14. Deslocamento da seção para o tempo 0 (início do registro).....	15
Figura 15. Aplicação do filtro corta baixa.	16
Figura 16. Ganho variável no tempo e interface cobertura/resíduo.	17
Figura 17. Ajuste da hipérbole de difração.	18
Figura 18. Dados brutos e deslocamento da seção para o tempo 0.....	19
Figura 19. Remoção do ruído de fundo e aplicação do filtro passa banda vertical.	20
Figura 20. Aplicação do ganho linear e posterior suavização. Interface cobertura/resíduo. .	21
Figura 21. Linha T1B com a antena de 100 MHz (acima) e 200 MHz (abaixo).....	22
Figura 22. Limite lateral da célula experimental.	23

Lista de Tabelas

Tabela 1. Constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação observadas em materiais geológicos para a frequência de 100 MHz. Fonte: Modificado de Davis e Annan (1989).	8
Tabela 2. Quantidade de linhas realizadas na primeira etapa de campo.	12
Tabela 3. Quantidade de linhas realizadas na segunda etapa de campo.....	13

Anexo I – Seções de GPR (antena de 200 MHz)

RESUMO

Dentre os diversos problemas ambientais enfrentados pela sociedade atualmente, principalmente em decorrência do aumento populacional, a geração e destinação de resíduos é possivelmente um dos maiores. Portanto, são realizados estudos em inúmeros aterros sanitários para se avaliar os diferentes riscos associados a esses locais, com o potencial de afetar à saúde humana e o meio ambiente. Dentre eles, o vazamento de chorume e consequente contaminação do solo e da água é um dos principais.

Para a realização de tais estudos, os métodos geofísicos são bastante utilizados devido à praticidade de aplicação e ao caráter não invasivo. Para este projeto foi escolhido o método de Radar de Penetração no Solo (GPR).

A área estudada foi uma célula experimental construída por pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) dentro de um aterro sanitário. Os objetivos principais desta investigação foram a delimitação do pacote de resíduos da célula experimental e determinação da integridade da manta de PEAD.

Foram realizadas duas etapas de campo, e os dados obtidos foram tratados com três softwares diferentes (Reflex, GRESWIN e GRED3D). Os resultados não responderam integralmente aos objetivos iniciais da pesquisa, visto que a penetração do sinal foi em geral bem menor do que a desejada, mas possibilitaram a observação e análise de alguns fatores que influenciam a penetração e qualidade da seção final como a umidade do solo, frequência da antena e programas de processamento.

ABSTRACT

Among the various environmental problems currently faced by society, mainly due to the population increase, the generation and destination of waste is possibly one of the largest. Therefore, studies are carried out in numerous landfills to evaluate the different risks associated with these sites, with the potential to affect human health and the environment. Among them, the leakage of slurry and consequent contamination of soil and water is one of the main.

In order to carry out such studies, geophysical methods are generally widely used because of practicality and non-invasive character. For this project it was chosen the Ground Penetration Radar (GPR) method.

The studied area was an experimental cell constructed by researchers from the State University of Campinas (UNICAMP) within a sanitary landfill. The main objectives of this investigation were to delimit the experimental cell waste packet and determine the integrity of the HDPE blanket.

Two fieldwork campaigns were performed and the data obtained was treated with three different softwares (Reflex, Greswin and GRED3D). The results did not respond fully to the initial objectives of the research, since the penetration of the signal was in general much smaller than the desired one, but allowed the observation and analysis of some factors that influence the penetration and quality of the final section as the soil moisture, antenna frequency and processing programs.

1. INTRODUÇÃO

Diversos problemas atuais estão associados ao aumento da população e consequente crescimento dos centros urbanos. Dentre eles está o acúmulo de grandes quantidades de resíduos que, quando depositados de forma incorreta, podem causar problemas ambientais afetando diretamente a saúde humana.

Quando se trata de depósitos de resíduos, uma das principais preocupações é a contaminação tanto do solo quanto das águas superficiais e subterrâneas. Apesar de muitos aterros utilizarem mantas impermeáveis de PEAD (polietileno de alta densidade) com o intuito de evitar o contato entre os resíduos e o ambiente ao redor, a contaminação pode ocorrer pelo vazamento do chorume formado pela decomposição da matéria orgânica através de fissuras formadas na manta ou por excesso desse líquido devido à percolação de águas da chuva e consequente extravasamento.

Os métodos geofísicos são amplamente usados na investigação destes problemas, tendo como principais vantagens: rapidez, relativo baixo custo e não serem invasivos, permitindo a investigação sem necessidade de perfurações ou amostragem de material (Elis, 2005). Além disso, algumas técnicas fornecem dados contínuos sobre o local de estudo, permitindo uma análise temporal e espacial mais detalhada. Esses métodos podem indicar a espessura do material depositado, profundidade do nível d'água (NA), delimitação de plumas de contaminação, determinação das direções de fluxo, além de falhas e fraturas que possam servir de caminhos preferenciais para a migração dos contaminantes (Elis, 2005).

O Radar de Penetração no Solo (GPR - *Ground Penetrating Radar*), dentre todos, é talvez o de maior facilidade e rapidez de uso, possibilitando a obtenção de uma grande quantidade de informações com alta resolução, em campanhas relativamente curtas. Ele possui grande aplicação em estudos ambientais, assim como no mapeamento de alvos rasos e de pequenas dimensões (Saraiva, 2011), como tanques e tubulações. O GPR também possui a capacidade de detectar compostos orgânicos (Aquino, 1999). Ademais, o relativo baixo custo associado a uma rápida e contínua aquisição de dados, auxilia a programação de aplicações posteriores de métodos diretos de investigação, como campanhas de amostragem e instalação de poços de monitoramento, ou mesmo no emprego de outros métodos geofísicos.

Este estudo busca avaliar a eficiência do uso do GPR em aterros sanitários a partir da investigação de uma célula experimental localizada dentro de um aterro sanitário denominado Delta A, situado no município de Campinas, São Paulo. Os principais parâmetros de avaliação estão relacionados a quanto o sinal GPR penetra na camada de

resíduos depositada na célula e sua resolução, ou seja: capacidade de mapear diferentes camadas, mapear o nível freático, bem como a integridade da manta de PEAD e possíveis vazamentos de chorume. A célula investigada possui aproximadamente 5080 m² e foi implantada em 2013 pelo Departamento de Geotecnia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

2. LOCALIZAÇÃO

O município de Campinas está localizado no interior do estado de São Paulo, a aproximadamente 100 km da capital São Paulo. Tem como principais vias de acesso, as rodovias Bandeirantes (SP-348) e Anhanguera (SP-330). O aterro sanitário Delta A encontra-se no limite do centro urbano, próximo à rodovia dos Bandeirantes e suas coordenadas aproximadas são 22°54'57.52''S / 47°08'47.54''W.

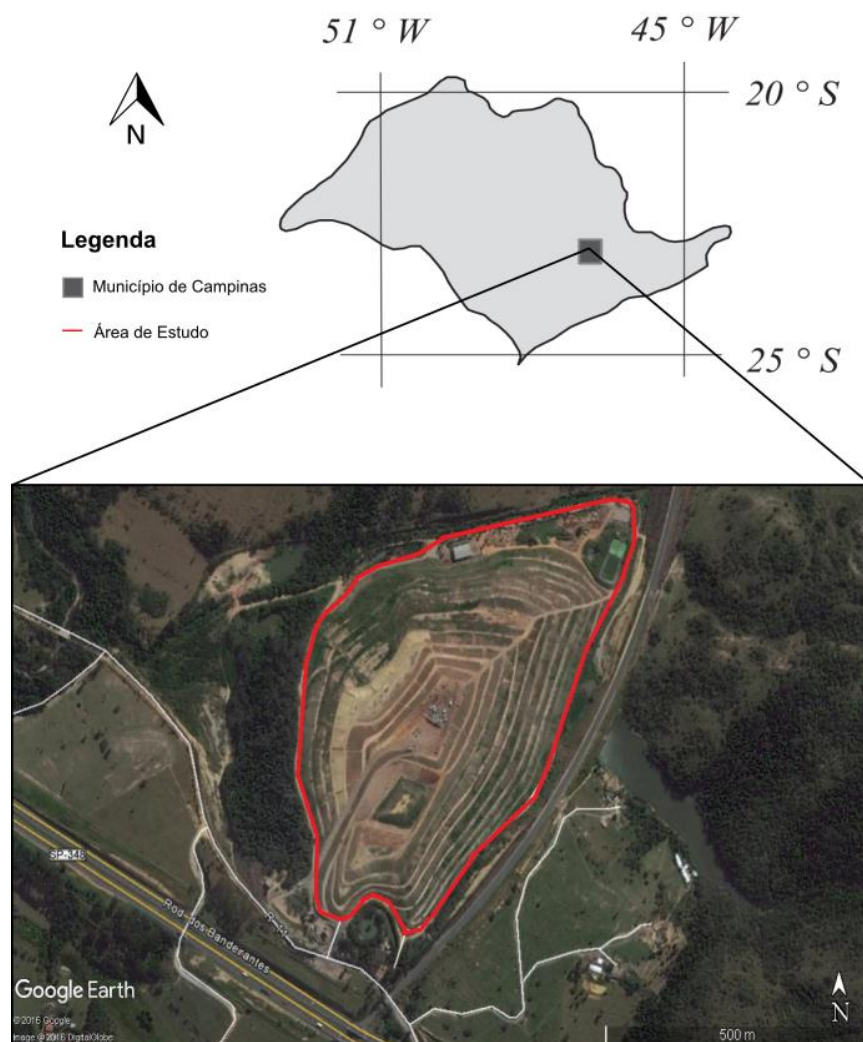


Figura 1. Localização do aterro sanitário Delta A (22°54'57.52''S / 47°08'47.54''W), situado no município de Campinas, São Paulo. Modificado de Google Earth ® (2016).

2.1 Célula Experimental

A célula experimental está situada na cota 633 m do aterro sanitário Delta A e suas dimensões aproximadas são 80m x 70m x 5m, apresentando uma capacidade volumétrica total de 15000 m³. Ela foi desenvolvida com as mesmas características construtivas e de disposição encontradas no aterro sanitário, com o objetivo de obtenção de parâmetros hidro-geomecânicos e análise físico-química do lixiviado gerado (Gabrielli et al., 2014).

A base da célula possui uma camada de solo argiloso compactado com 0,5 m de espessura, proveniente de uma jazida localizada no próprio aterro. Foi construída também uma canaleta central de 0,3 m de profundidade e 2 m de largura para a drenagem do lixiviado, além de um colchão drenante formado por “rachão”, cobrindo toda a base da célula e com 0,3 m de espessura. Sobre a camada de solo compactado foi instalada uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,5 mm de espessura, seguida de um geotêxtil não tecido e uma camada de solo de 0,1 m. Foram ainda construídos taludes laterais de 1 m de altura para a contenção do lixiviado. A cobertura foi realizada com uma camada do mesmo solo da base com 0,5 m de espessura (Gabrielli et al., 2014).

A Figura 2 apresenta a localização da célula experimental dentro do aterro Delta A e a Figura 3 representa um croqui geral da célula.



Figura 2. Localização da célula experimental dentro do aterro Delta A.

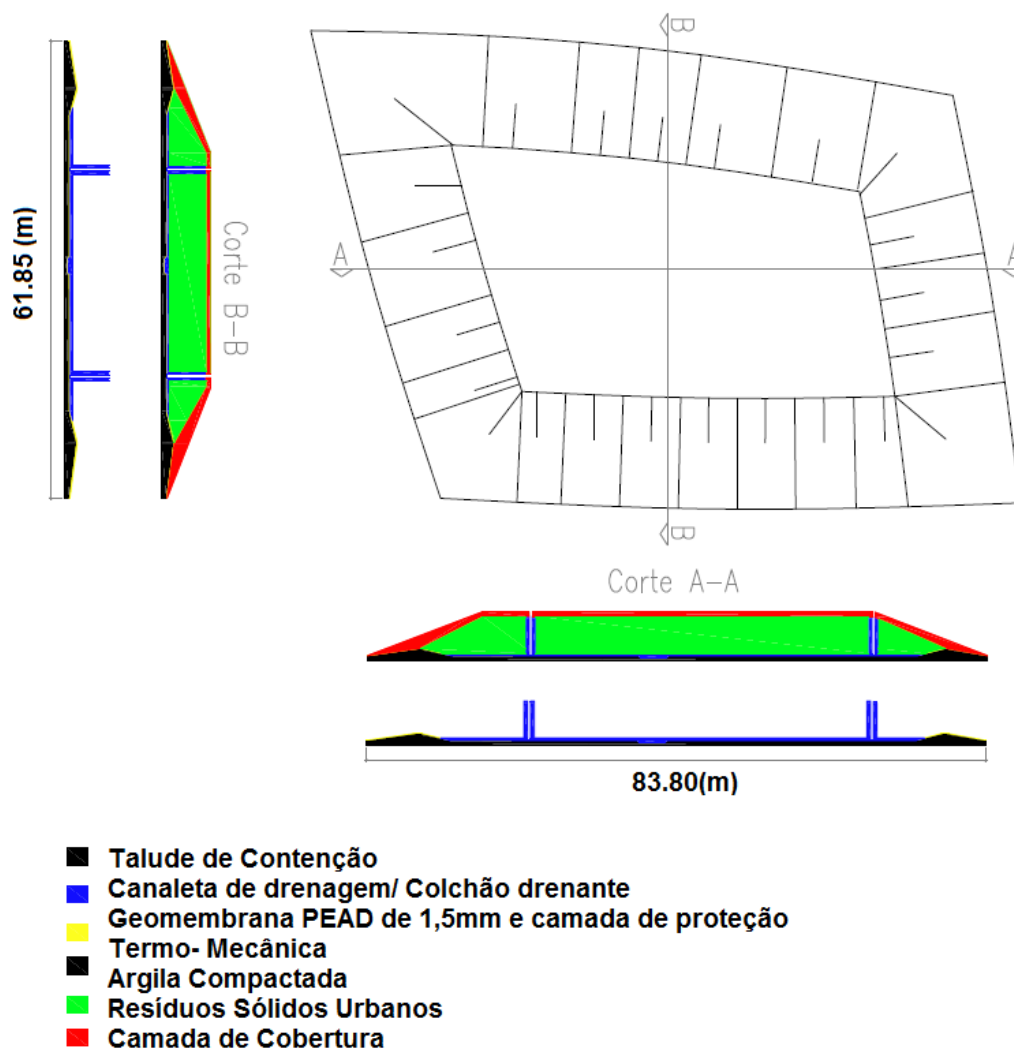


Figura 3. Croqui geral da célula experimental (Gabrielli et al., 2014).

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a eficácia do uso do GPR na investigação de um depósito de resíduos, especialmente na determinação da espessura do pacote de lixo e integridade da manta de PEAD instalada sob os resíduos.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Geologia Regional e Local

O município está situado em terrenos do Subgrupo Itararé, disposto preferencialmente nas regiões norte e nordeste. Apresenta limite inferior discordante com o embasamento cristalino a sudeste, e limite superior com a Formação Tatuí a noroeste. Em

diversos locais ocorrem coberturas Cenozóicas e intrusões de rochas básicas (Souza Filho, 1986).

A espessura média do Subgrupo Itararé na área é de 717 metros. Sendo que as principais litologias presentes são: siltitos, arenitos, diamictitos e ritmitos. Os siltitos constituem a maior espessura aflorante, variando de poucos a dezenas de metros. São geralmente amarelo-avermelhados, argilosos, podendo ser maciços ou estratificados (Saad, 1977).

O Aterro Delta A situa-se em área onde ocorrem predominantemente materiais siltosos, de coloração marrom avermelhada, utilizados também como cobertura das células encerradas devido à suas características geomecânicas.

4.2 Trabalhos Prévios

O GPR pode ser aplicado em diversas áreas, como por exemplo: engenharia civil, meio ambiente, arqueologia, petróleo, entre outras. Neste trabalho, a fundamentação bibliográfica se baseia nos trabalhos relacionados à aplicação do GPR na avaliação de problemas ambientais.

Saraiva (2011) compara diferentes métodos geofísicos com o objetivo de acompanhar a formação de uma possível pluma de contaminação, a partir da geração de necrochorume, o que pode ser considerado bastante similar ao caso, já que em ambos se têm a degradação de matéria orgânica. Dentre os métodos utilizados está o GPR que, apesar de naquele estudo não ter penetrado o suficiente para delimitar verticalmente a pluma de contaminação, foi bastante eficiente na determinação dos limites da célula criada naquele projeto, bem como na delimitação dos limites laterais da anomalia gerada. O autor explica a teoria de funcionamento do método e, posteriormente, apresenta os resultados obtidos, ressaltando os pontos positivos e também as eventuais limitações enfrentadas durante o trabalho.

Laureano (2007) aplica métodos geofísicos de forma integrada com o objetivo de delimitar a extensão e a profundidade de uma pluma de contaminação formada em um aterro sanitário localizado em Cuiabá – MT. Os métodos empregados foram: Caminhamento Eletromagnético (EM), Caminhamento Elétrico (CE) e Radar de Penetração no Solo (GPR).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O GPR fornece seções contínuas em tempo real (distância percorrida x tempo de propagação da onda ou profundidade) dos perfis executados em campo, proporcionando o imageamento em alta resolução das estruturas ou feições em subsuperfície (Saraiva, 2011).

Uma onda eletromagnética é transmitida no solo através de uma antena transmissora que está em contato direto com a superfície e, conforme a energia se propaga para maiores profundidades parte da energia reflete de volta à superfície quando ocorrem interfaces entre camadas com diferentes propriedades elétricas. As ondas refletidas são detectadas por uma antena receptora (Figura 4). Este processo é repetido continuamente com o objetivo de obter seções que apresentam camadas com diferentes propriedades elétricas (Griffin e Pippett, 2002).

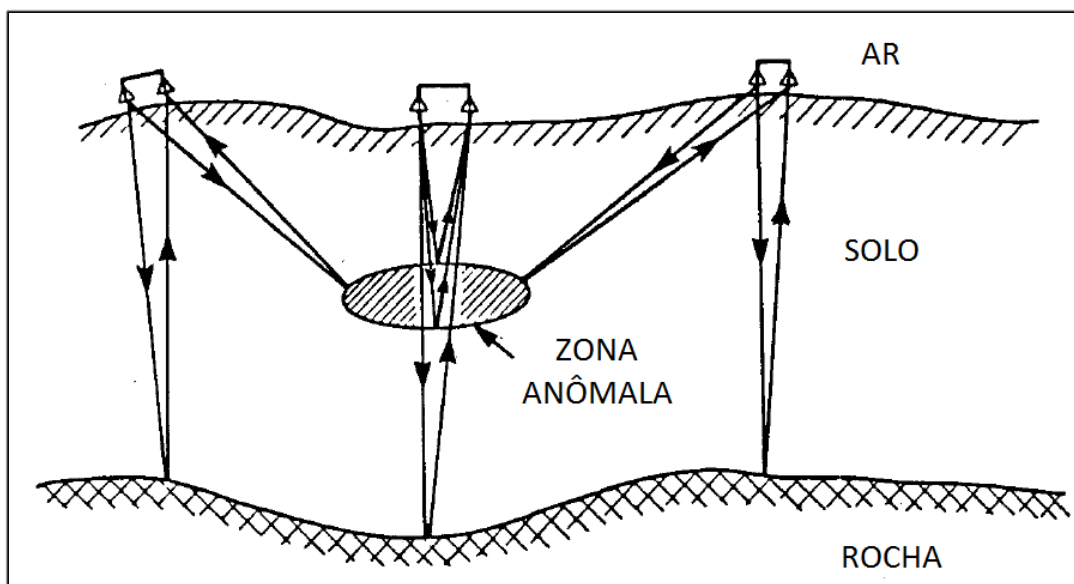


Figura 4. Ilustração conceitual do radar sendo utilizado no modo de perfil de reflexão em solo sobre rocha (Modificado de Davis e Annan, 1989).

Este método é adequado apenas para investigações rasas (até poucas dezenas de metros em condições ideais), pois o solo absorve a energia de forma rápida conforme ela se propaga. Eventualmente, não resta energia de reflexão suficiente para ser registrada pela antena receptora. A frequência de operação das antenas normalmente varia entre 10 MHz e 2000 MHz, sendo que ondas de maior frequência resultam em imagens de maior resolução, porém estas se restringem às profundidades mais rasas visto que são atenuadas ou absorvidas mais rapidamente (Griffin e Pippett, 2002).

Na maioria das condições geológicas as variações magnéticas são muito pequenas, pois a permeabilidade magnética dos materiais quase não varia em relação à permeabilidade do vácuo, portanto são consideradas apenas as propriedades elétricas no GPR. As propriedades elétricas dos materiais determinam a velocidade do sinal e a atenuação, sendo que as mais importantes são a constante dielétrica (permissividade relativa) e a condutividade (Davis e Annan, 1989). Ambas são bastante influenciadas pela água, portanto ela é um fator significativo no desempenho do GPR. Teores elevados de umidade do solo limitam a profundidade de penetração, entretanto se a alteração for brusca, como no caso do nível d'água, poderá proporcionar uma reflexão mais forte já que a

presença da água aumentará a constante dielétrica significativamente (Griffin e Pippett, 2002).

As reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais que apresentam variação de permissividade dielétrica (ϵ), expressa pela constante dielétrica (K). A constante dielétrica é uma grandeza adimensional dada pela equação:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

onde ϵ é a permissividade dielétrica do meio e ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m).

A velocidade de propagação da onda eletromagnética em um determinado material é dependente da constante dielétrica da seguinte forma:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}}, \quad (2)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo (3×10^8 m/s) (Vieira e Gandolfo, 2013; Davis e Annan, 1989).

Na frequência de operação do GPR (10 - 2000 MHz) a velocidade permanece essencialmente constante para condutividades de até 100 mS/m. Ela apresenta aumento significativo apenas para frequências acima de 1000 MHz devido ao relaxamento da molécula de água (Figura 5).

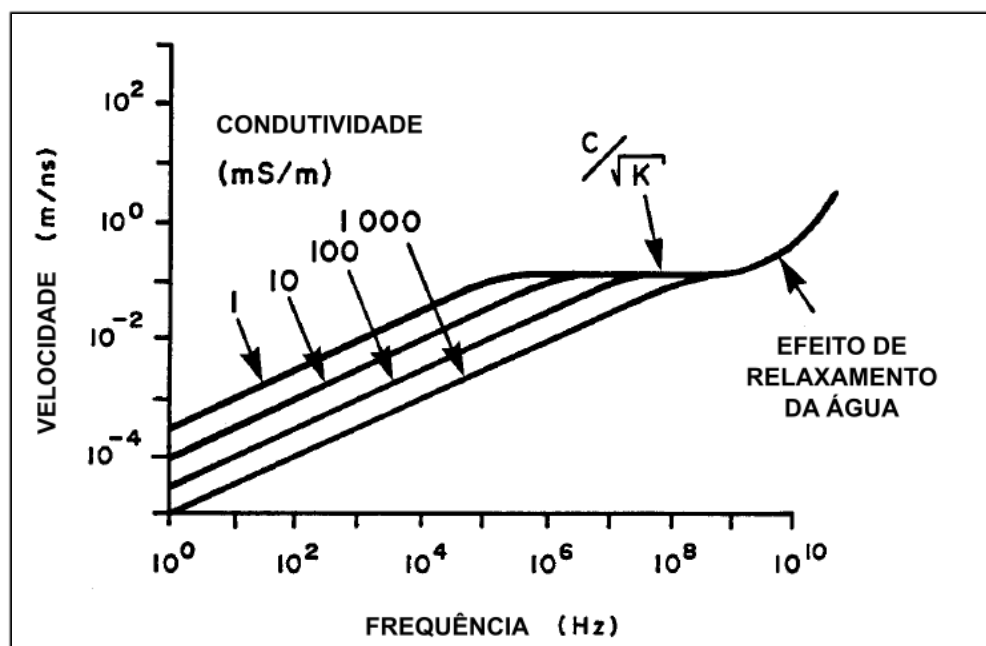


Figura 5. A relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades (Modificado de Davis e Annan, 1989).

A condutividade do solo limita a profundidade máxima que as ondas magnéticas são capazes de penetrar, visto que ela influencia a taxa na qual a energia é absorvida. Um solo mais condutivo (úmido e/ou argiloso) absorve a energia muito mais rapidamente que um solo de baixa condutividade, como uma areia seca, por exemplo. A profundidade de penetração de um solo argiloso seco varia em geral entre 1 e 2 metros e quando úmido reduz para menos de 1 metro. Solos arenosos secos permitem penetração superior a 10 metros de profundidade. Rochas de baixa condutividade incluem calcário, granito e outras rochas cristalinas, enquanto rochas de alta condutividade incluem basalto, folhelho e lamito quando muito alterados ou qualquer material geológico intemperizado com porosidade razoavelmente elevada (Griffin & Pippett, 2002). Na prática, esta propriedade pode ser quantificada através da constante de atenuação (α), definida por Davis e Annan (1989):

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma}{\sqrt{K}}, \quad (3)$$

onde σ é a condutividade e K é constante dielétrica.

Tabela 1. Constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação observadas em materiais geológicos para a frequência de 100 MHz. Fonte: Modificado de Davis e Annan (1989).

Material	K	σ (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água salgada	80	3×10^4	0,01	103
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1,0	0,06	0,03 – 0,3
Calcário	4 – 8	0,5 – 2,0	0,12	0,4 – 1
Folhelhos	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Siltes	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argilas	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	4 – 6	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

O procedimento usual de operação é arrastar as antenas lentamente através da superfície do solo, transmitindo e recebendo continuamente o sinal ou onda EM, de modo a construir um perfil. Geralmente, a operação de um sistema de GPR requer dois operadores, um para arrastar as antenas ao longo da superfície e outro para controlar as operações, através de um laptop e um módulo eletrônico conectado às antenas (Griffin e Pippett, 2002). A frequência da antena é escolhida de modo a fornecer a melhor relação entre a penetração e a resolução para um determinado objetivo (Saraiva, 2011). Portanto, a frequência ideal é definida em campo após testes iniciais, de acordo com a melhor penetração do sinal e da

resposta obtida para cada uma. Dependendo dos resultados obtidos podem ser feitos levantamentos com mais de uma antena, visando um modelo mais completo.

A Figura 6 ilustra um diagrama esquemático de um sistema GPR.

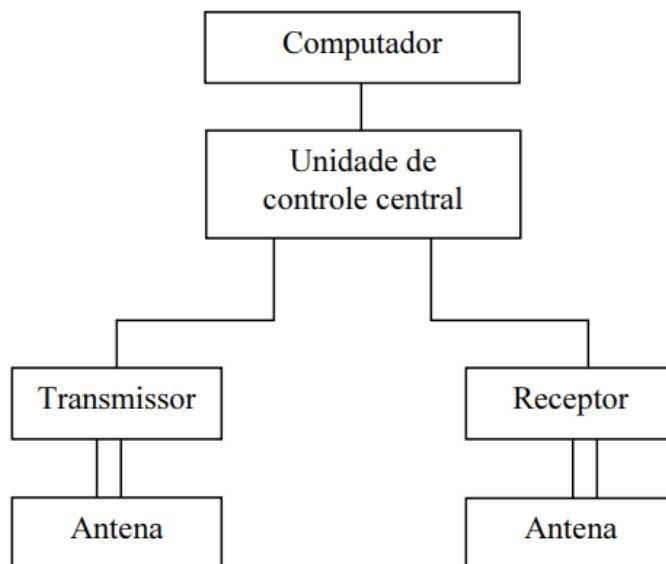


Figura 6. Diagrama esquemático de um sistema GPR (Porsani, 1999).

Para a execução do trabalho foi utilizado o equipamento de modelo RIS fabricado pela IDS (Itália), pertencente ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da USP (CEPAS), e antenas de 100 e 200 MHz.

Os dados obtidos foram tratados pelos programas que acompanham o equipamento (GresWin e GRED3D), além do programa Reflex. Eles permitem a aplicação de diversos filtros para melhoria dos dados e, no caso do GRED3D, permite a análise em três dimensões da área investigada.

A Figura 7 apresenta a antena de 100 MHz, e a Figura 8 mostra o computador utilizado para a aquisição de dados e a unidade de controle central localizada na parte de trás da mochila.



Figura 7. Antena de 100 MHz.



Figura 8. Computador e unidade de controle central.

6. ATIVIDADES DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS

As atividades de campo foram realizadas em duas etapas, sendo a primeira delas no dia 07 de junho e a segunda no dia 29 de agosto de 2017. A Figura 9 apresenta a vista geral da célula experimental, e a Figura 10 apresenta o procedimento de aquisição das linhas de GPR.



Figura 9. Vista geral da célula experimental.



Figura 10. Procedimento de aquisição das linhas de GPR.

6.1 Primeira etapa

Na primeira etapa foram executadas no total 42 linhas, sendo 21 delas realizadas com a antena de 100 MHz e outras 21 realizadas nas mesmas linhas, porém com a antena de 200 MHz. A Tabela 2 apresenta a quantidade de linhas realizadas com cada antena na primeira etapa.

Tabela 2. Quantidade de linhas realizadas na primeira etapa de campo.

Linhas	Frequência - 100 MHz	Frequência - 200 MHz
Transversais	3	3
Longitudinais longas	2	2
Diagonais	1	1
Longitudinais curtas	15	15

A Figura 11 apresenta as linhas realizadas na primeira etapa, sendo que a área delimitada em amarelo representa o conjunto de 15 linhas longitudinais curtas realizadas com um espaçamento de 4 metros entre cada uma delas. Este conjunto foi executado com o objetivo de se tentar construir um “bloco” 3D da área estudada, através do programa GRED3D.



Figura 11. Linhas realizadas na primeira etapa de campo.

A linha D1A, diagonal à célula, foi executada nesta posição de forma a coincidir com os levantamentos executados em outro projeto através da técnica do Caminhamento Elétrico, porém a análise comparativa entre os dois resultados não esteve no escopo deste trabalho.

Os resultados preliminares obtidos através dos tratamentos aplicados nas linhas indicaram baixa penetração do sinal no interior da célula. Isto pode ser atribuído a dois fatores principais, sendo eles a cobertura argilosa e a umidade. Como citado anteriormente, um solo argiloso úmido possui alta condutividade e, portanto, baixa penetração das ondas eletromagnéticas. Deste modo, a cobertura argilosa presente no topo da célula associada à ocorrência de forte chuva na região nos dias que antecederam a atividade de campo, geraram condições desfavoráveis à penetração do sinal.

6.2 Segunda etapa

Dadas as limitações observadas após a primeira etapa de campo, foi realizada uma segunda etapa em um período mais seco. Além disso, houve mudanças nos objetivos originais, visto que a profundidade de penetração do sinal não seria suficiente para a delimitação vertical do pacote de resíduo e também para a avaliação da integridade da manta de PEAD. Portanto, os focos principais para esta etapa foram a delimitação horizontal da célula e a interface cobertura/resíduo.

Na segunda etapa de campo foram realizadas 18 linhas, sendo 9 delas com a antena de 100 MHz e outras 9 na mesma posição com a antena de 200 MHz. A Tabela 3 apresenta a quantidade de linhas realizadas com cada antena.

Tabela 3. Quantidade de linhas realizadas na segunda etapa de campo.

Linhas	Frequência - 100 MHz	Frequência - 200 MHz
Transversais	3	3
Longitudinais longas	5	5
Diagonais	1	1

Nesta etapa não foi realizado um conjunto de linhas longitudinais curtas, pois as linhas deste tipo executadas na primeira etapa não apresentaram resultados aproveitáveis para este trabalho. Deste modo, foi realizado um número maior de linhas longitudinais longas com o objetivo de identificar os limites laterais da célula.

A Figura 12 apresenta as linhas realizadas na segunda etapa de campo. Para diferenciar as linhas realizadas em cada etapa foi utilizada a letra “A” ao final da nomenclatura das linhas da primeira etapa, enquanto aquelas terminando em “B” representam as linhas da segunda etapa.



Figura 12. Linhas realizadas na segunda etapa de campo.

7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados de GPR necessitam de uma série de tratamentos (especialmente filtros e ganhos). Estes filtros visam melhorar os resultados de acordo com as condições locais e com os alvos pretendidos. Entretanto, é um processo demorado e que requer diversas experimentações testando diferentes parâmetros de filtros, até se obter um resultado aceitável. Uma vez obtido os parâmetros ideais para os dados de uma determinada linha adquirida, é possível aplicar rapidamente a mesma sequência para todas as outras linhas levantadas e então se visualizar a seção tratada e interpretar as feições presentes.

As Figuras 13 a 17 apresentam a sequência de procedimentos aplicados através do programa Reflex com o objetivo de realçar as características e feições presentes na área de estudo. A linha utilizada para a demonstração dos procedimentos aplicados foi a L2A com a antena de 100 MHz. Vale ressaltar que as seções referentes às linhas longitudinais estão orientadas de SW para NE.

A Figura 13 apresenta a seção sem nenhum tratamento, ou seja, apenas os dados brutos.

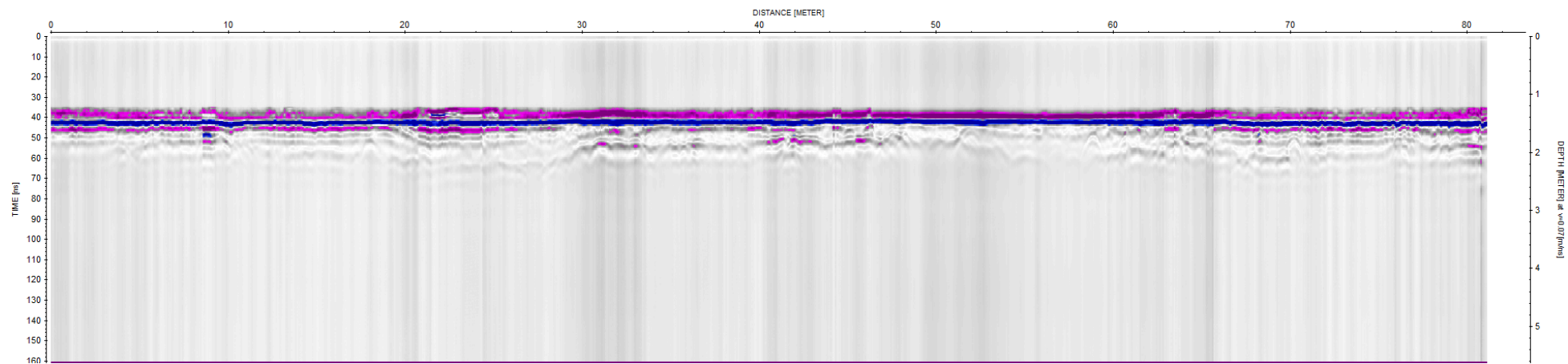


Figura 13. Dados brutos.

A Figura 14 mostra o deslocamento da seção para o tempo 0, onde se iniciou o registro a partir da chegada da onda direta na antena receptora.

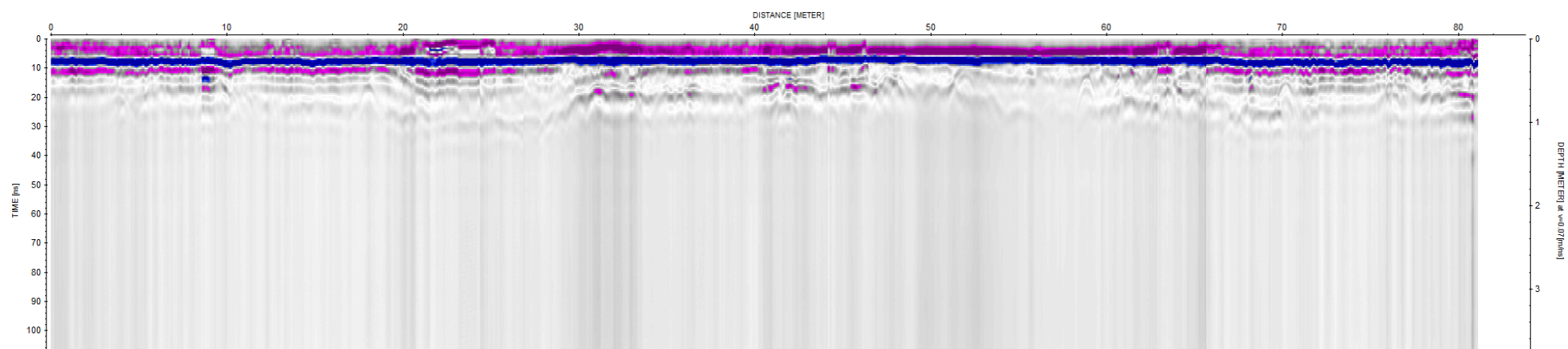


Figura 14. Deslocamento da seção para o tempo 0 (início do registro).

A Figura 15 apresenta a aplicação do filtro corta baixa, responsável pela eliminação de ondas de baixa frequência conhecidas como ruído “eletrônico”.

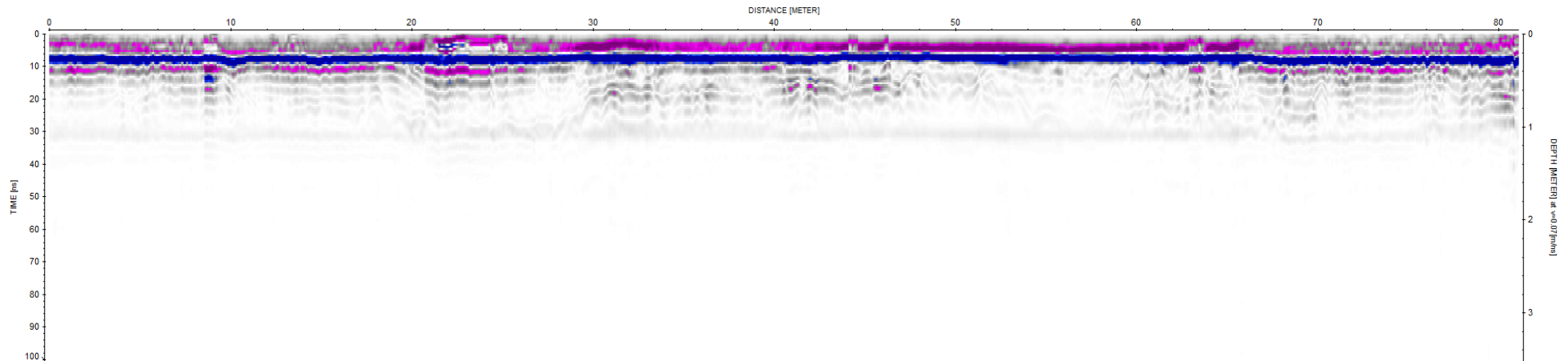


Figura 15. Aplicação do filtro corta baixa.

A Figura 16 apresenta a aplicação de um ganho variável no tempo, ou seja, um aumento linear no tempo com o objetivo de se observar feições em profundidades maiores.

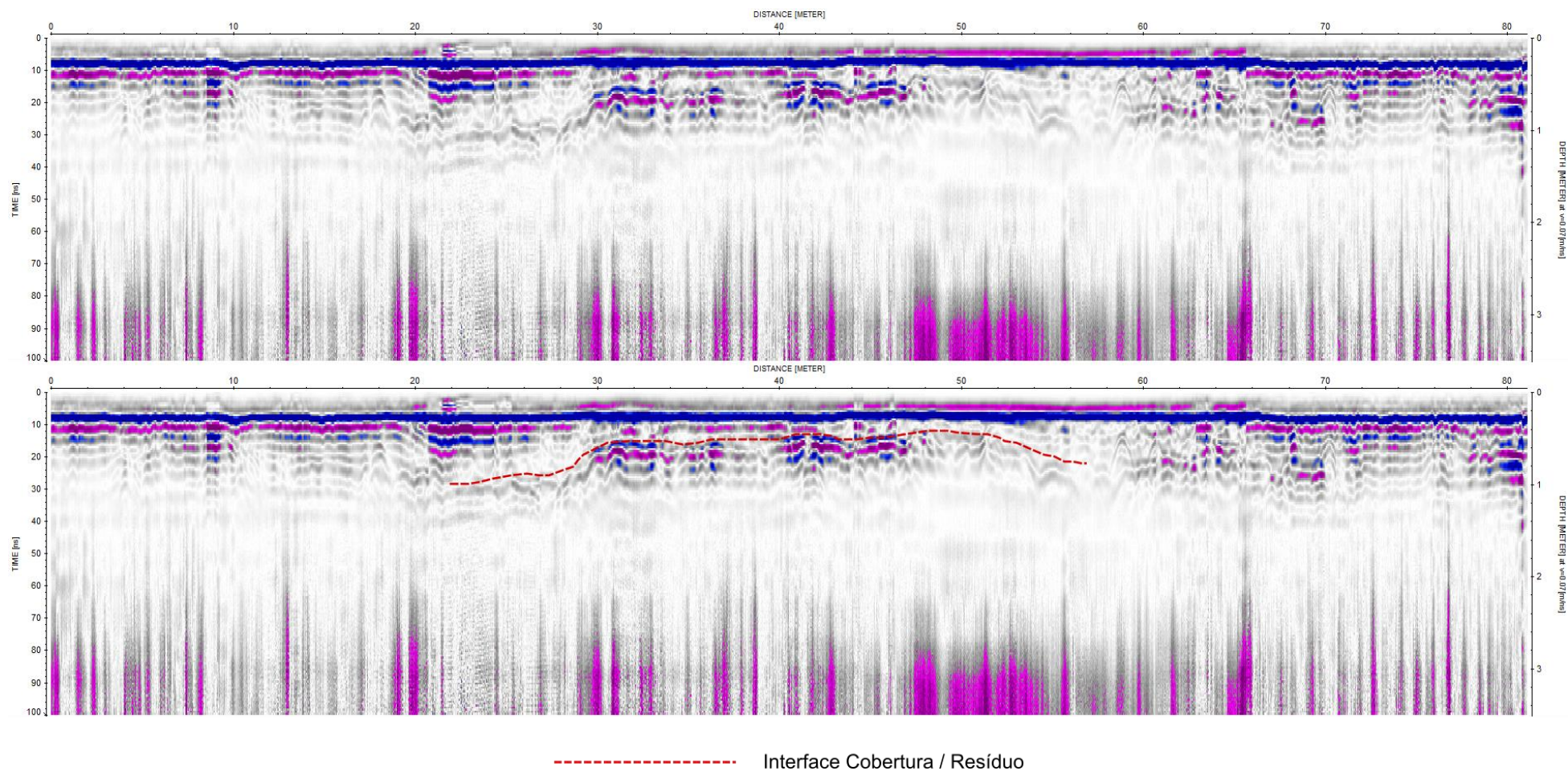


Figura 16. Ganho variável no tempo e interface cobertura/resíduo.

Após esta sequência de procedimentos foi possível inferir o contato entre a cobertura argilosa e os resíduos do aterro, representado pela linha tracejada em vermelho (Figura 16). O contato encontra-se em uma profundidade de aproximadamente 0,5 m na parte central, podendo chegar próximo a 1 m nas bordas, visto que a cobertura argilosa aparenta ser mais espessa nas extremidades da célula.

A Figura 17 mostra o ajuste da hipérbole de difração, realizado para se obter a velocidade de propagação do meio. Neste caso, foi constatada uma velocidade de aproximadamente 0,07 m/ns.

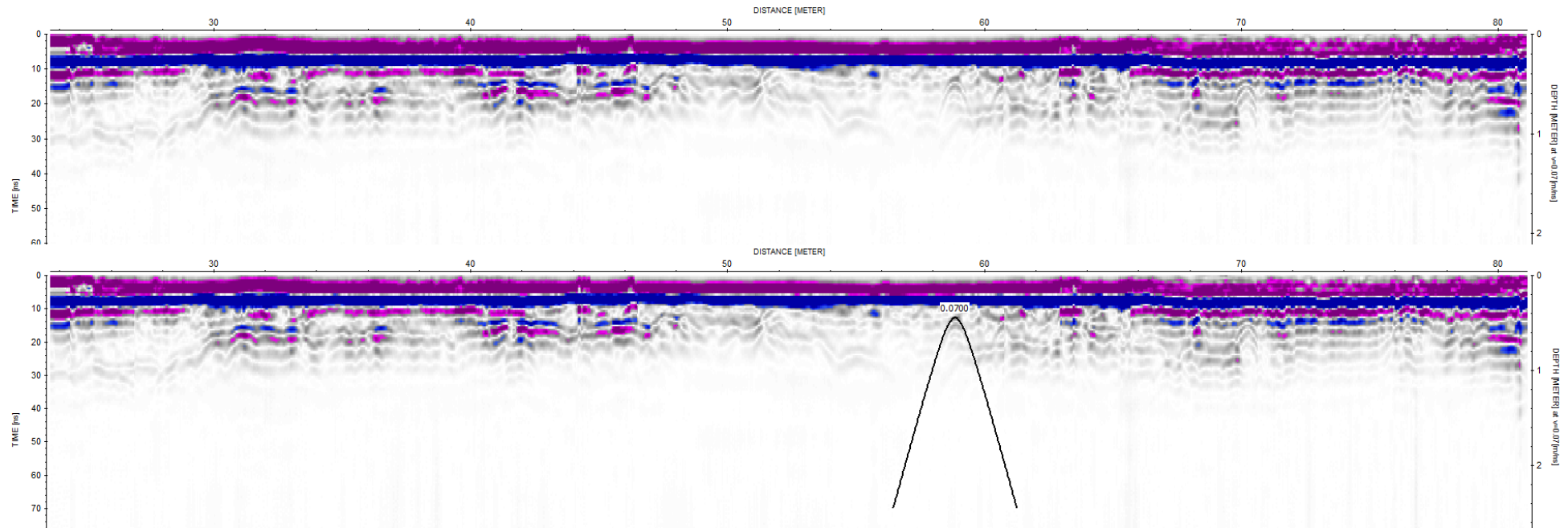


Figura 17. Ajuste da hipérbole de difração.

As Figuras 18 a 20 apresentam o processamento dos dados através do programa Greswin, que acompanha o equipamento. A linha utilizada foi a mesma (L2A) para que os dois softwares pudessem ser comparados. As duas linhas verticais verdes presentes nas seções indicam as posições dos queimadores que serviram de referência espacial durante a atividade campo.

A Figura 18 apresenta os dados brutos e o deslocamento da seção para o tempo 0 (início do registro).

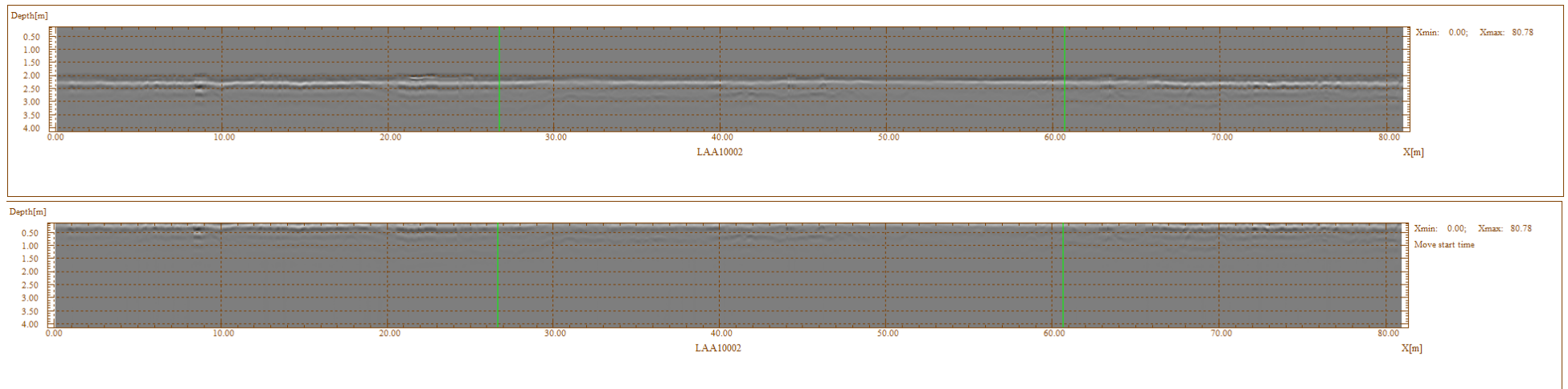


Figura 18. Dados brutos e deslocamento da seção para o tempo 0.

A Figura 19 apresenta a remoção do ruído de fundo (background) e aplicação do filtro passa banda, que limita o intervalo de frequência das ondas. Nesse caso, foi utilizado o limite inferior de 50MHz e limite superior de 200 MHz.

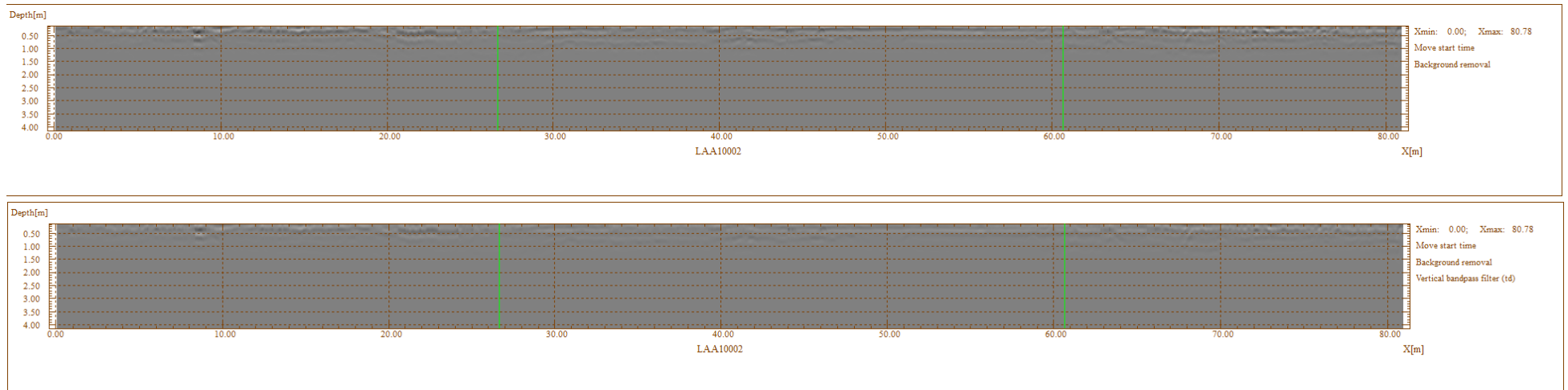


Figura 19. Remoção do ruído de fundo e aplicação do filtro passa banda vertical.

A Figura 20 apresenta a aplicação do ganho linear e sua posterior suavização. Apesar de não estar muito evidente, ainda foi possível identificar a mesma interface inferida no Reflex.

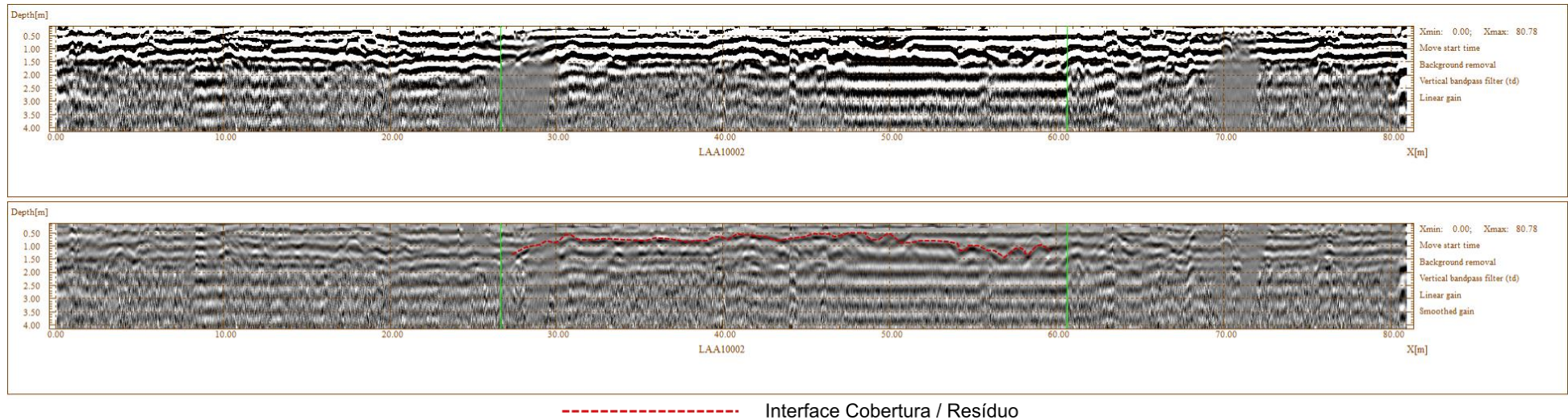


Figura 20. Aplicação do ganho linear e posterior suavização. Interface cobertura/resíduo.

Foi também realizada uma comparação entre os resultados obtidos com a antena de 100 MHz e 200 MHz. Para isso, foi escolhida a linha T1B, orientada de NW para SE. A Figura 21 apresenta as seções com a antena de 100 MHz (acima) e 200 MHz (abaixo).

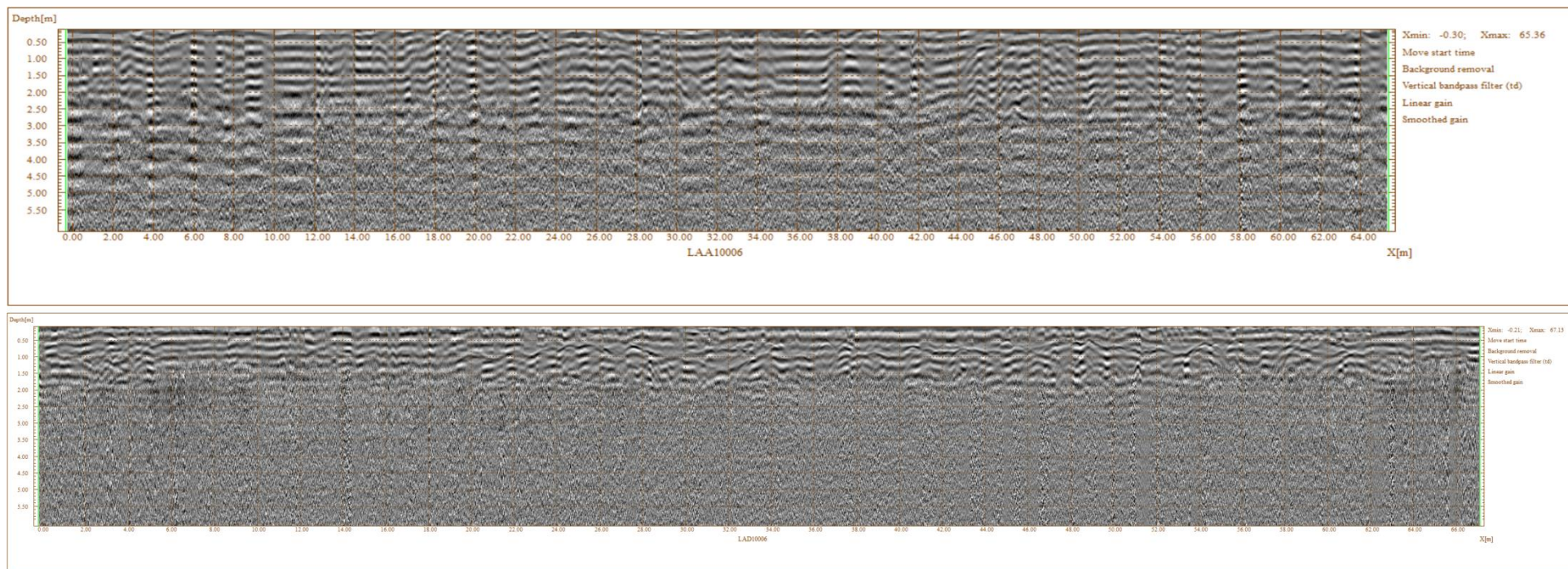


Figura 21. Linha T1B com a antena de 100 MHz (acima) e 200 MHz (abaixo).

Nota-se que a profundidade de penetração da antena de 100 MHz é em média 2,5 metros. Enquanto a profundidade de penetração da antena de 200 MHz não ultrapassa os 2,0 metros. Entretanto, a seção realizada com a antena de maior frequência apresenta uma resolução consideravelmente maior.

Na porção final da seção de 200 MHz é possível observar algo que poderia ser o limite lateral da célula experimental, contudo mesmo com a antena de maior frequência, a resolução não possibilita uma interpretação precisa. A Figura 22 apresenta este possível limite em maior detalhe, indicado por uma linha vermelha tracejada.

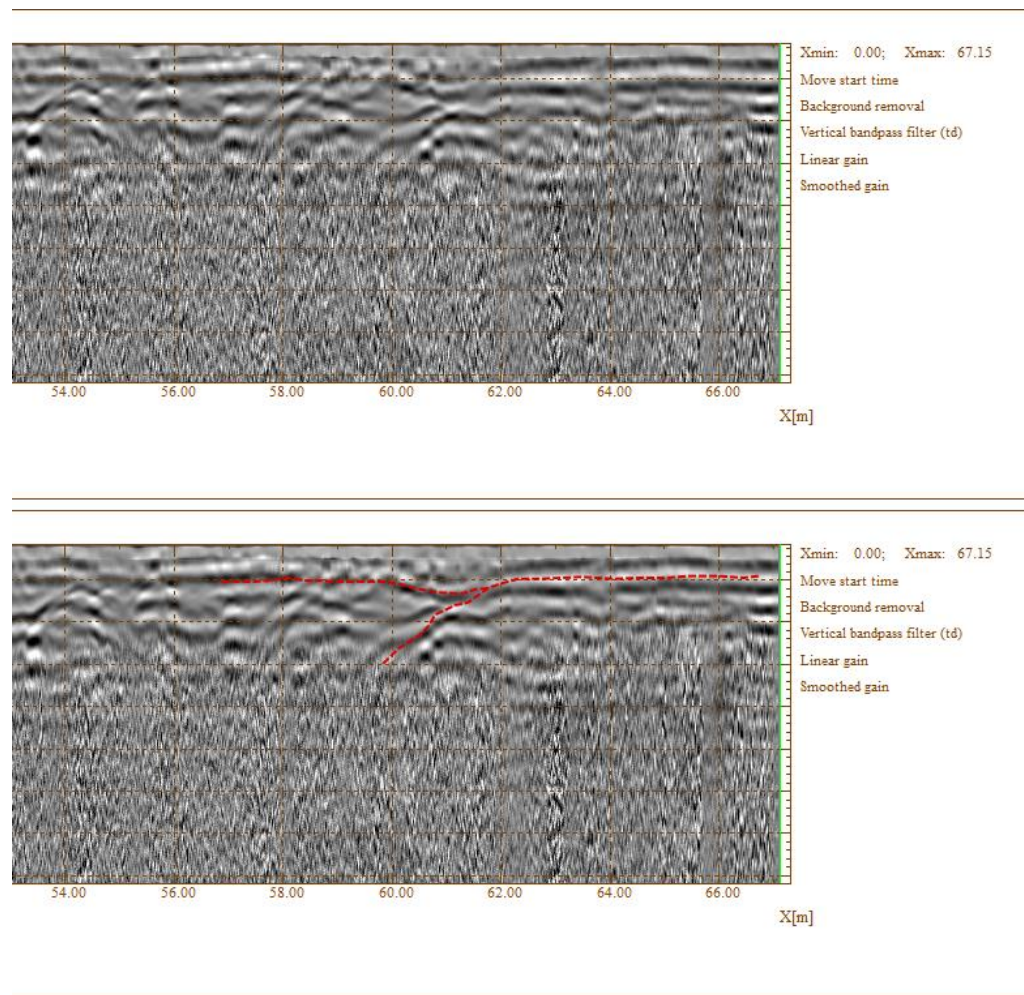


Figura 22. Limite lateral da célula experimental.

O Anexo I apresenta todas as seções realizadas na segunda etapa de campo com a antena de 200 MHz e tratadas no software Greswin.

8. CONCLUSÕES

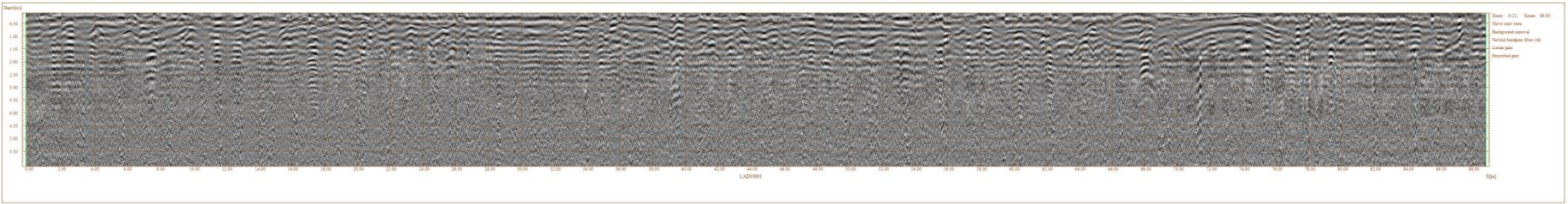
Após a realização de duas etapas de campo e tratamento dos dados com três softwares diferentes (Reflex, Greswin e GRED3D), não foi possível atingir plenamente os objetivos inicialmente estipulados para este trabalho. Isto se deveu em parte às condições do local estudado (cobertura argilosa, material condutivo), mas também pela própria limitação do método. A profundidade de penetração do sinal desejada (aproximadamente 5,0 metros) só poderia ser atingida em condições ideais, ou seja, baixo teor de umidade e materiais pouco condutivos, por exemplo. É importante salientar que os relatos de emprego de GPR em aterros sanitários é escasso e experimentos desse tipo, em aterros experimentais de características conhecidas, permitem uma análise mais fiel das potencialidades e limitações do seu emprego.

Assim, foi possível comparar e analisar alguns fatores que influenciam na qualidade dos resultados, como por exemplo, a frequência da antena utilizada, umidade do solo e software utilizado para o processamento dos dados. A antena de 100 MHz apresentou uma penetração maior do sinal, porém houve uma redução significativa da resolução, de modo que as seções obtidas com a antena de 200 MHz se mostraram mais relevantes para este trabalho. Em relação à umidade do solo, as linhas realizadas na segunda etapa (período mais seco) apresentaram uma penetração do sinal cerca de 0,5 metro maior que as linhas realizadas na primeira etapa. E por fim, dentre os softwares utilizados, o Reflex e o Greswin apresentaram melhores resultados quando comparados ao GRED3D.

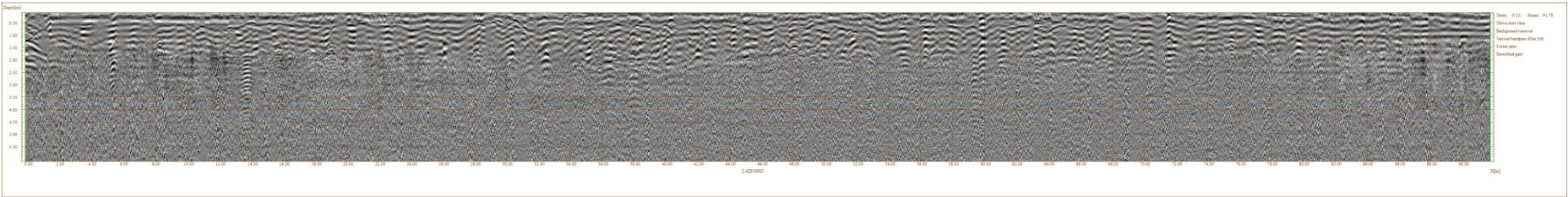
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, W.F. (1999). *Métodos geofísicos aplicados à investigação de contaminação subterrânea: Estudo de casos*. Anais Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental REGEO. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica. Disponível em <https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/regeo99/1999-aquino.pdf>
- Davis, J.L.; Annan, A.P. (1989). *Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting 37, 531-551.
- Elis, V.R. (2005). *A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação*. Apostila de aula Material Básico – principais métodos geofísicos e aplicações. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. Disponível em www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao_vagner.pdf
- Gabrielli, G.; Paixão Filho, J.L.; Benatti, J.C.B.; Cabral, L.L.; Domingues, L.M.; Leme, M.A.G.; Miguel, M.G. (2014). *Análise físico-química do lixiviado gerado em uma célula experimental de resíduo sólido urbano da cidade de Campinas-SP*. Simpósio Ecos da Sardenha. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Griffin, S.; Pippett, T. (2002). *Ground penetrating radar. Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRCLEME Open File Report 144, 80-89. Disponível em <http://crcleme.org.au/Pubs/OPEN%20FILE%20REPORTS/OFR%20144/09GroundRadar.pdf>
- Laureano, A.T. (2007). *Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá, MT*. Dissertação (Mestrado). Cuiabá: Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal de Mato Grosso.
- Porsani, J.L. (1999). *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- Saad, A.R. (1977). *Estratigrafia do subgrupo Itararé no centro e sul do estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- Saraiva, F.A. (2011). *Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- Souza Filho, E.E. (1986). *Mapeamento faciológico do Subgrupo Itararé na quadrícula de Campinas (SP)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- Vieira, R; Gandolfo, O. C. B (2013). *Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (GPR)*. Reunião de Pavimentação, 42, 12 p. Gramado: Associação Brasileira de Pavimentação.

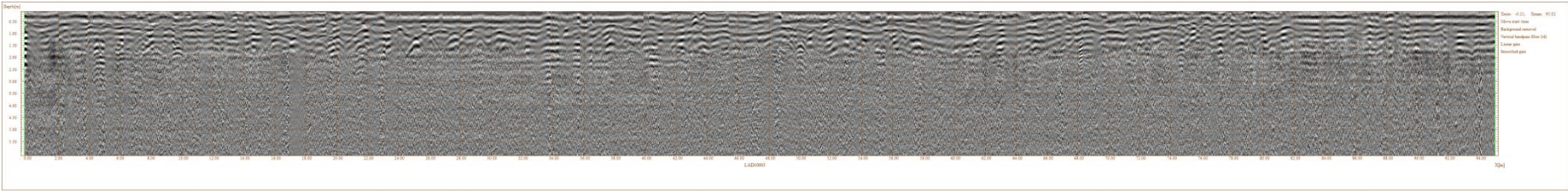
Anexo I – Seções de GPR (antena de 200 MHz)



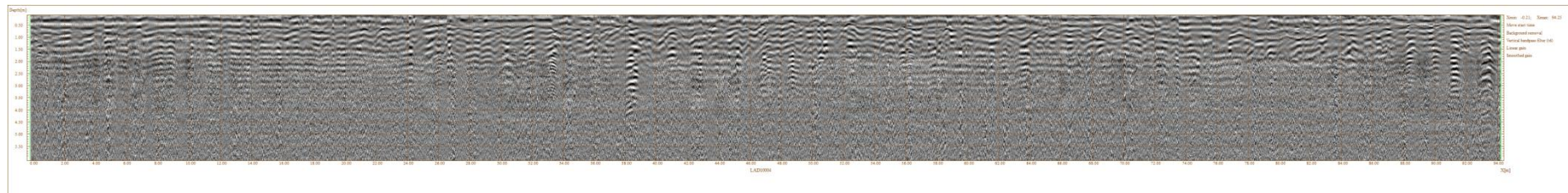
Linha L1B



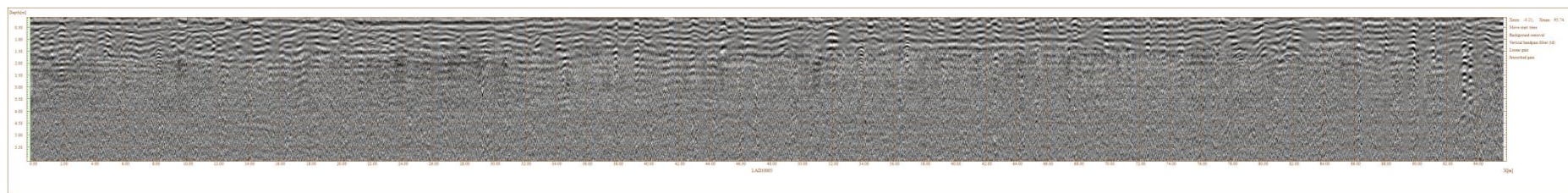
Linha L2B



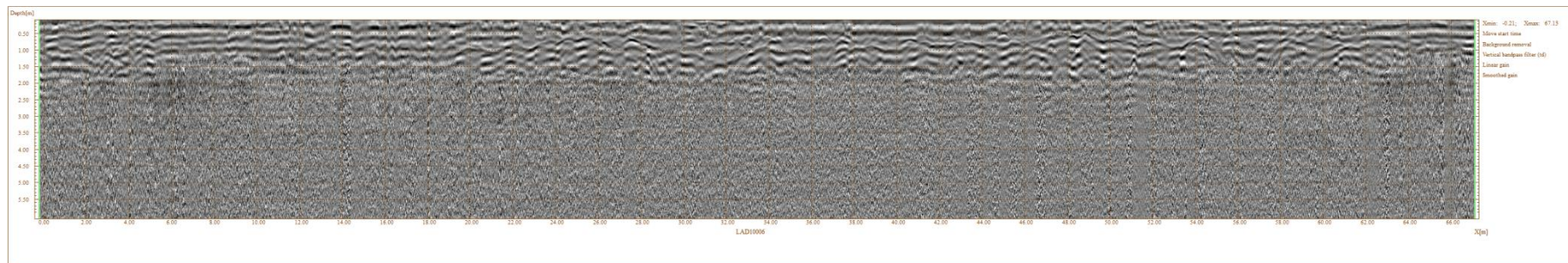
Linha L3B



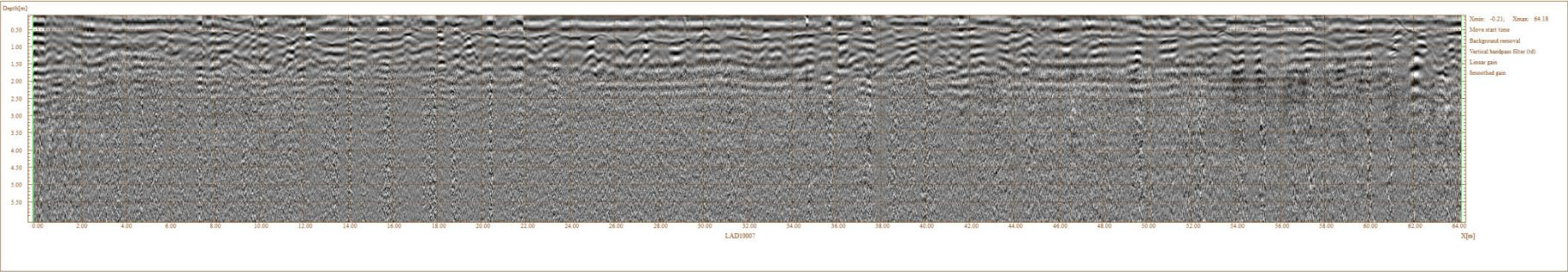
Linha L4B



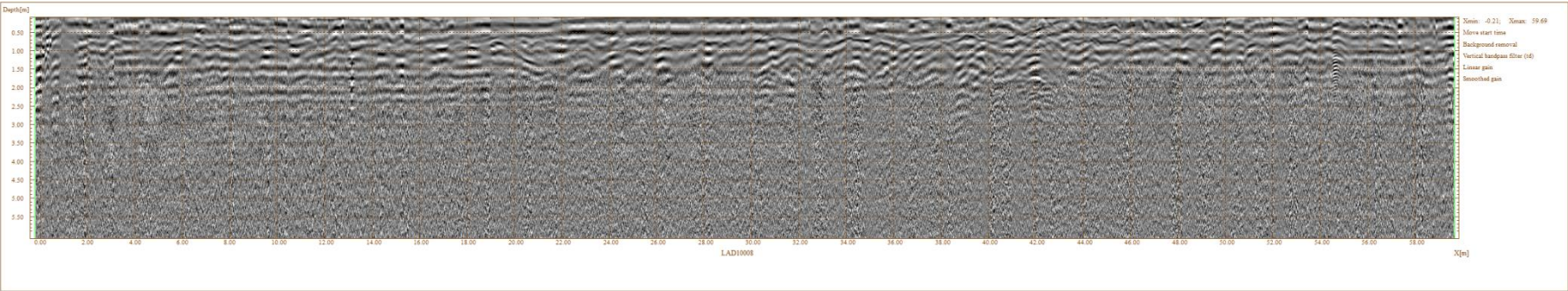
Linha L5B



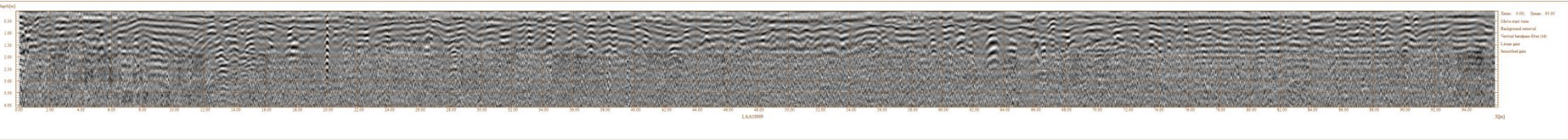
Linha T1B



Linha T2B



Linha T3B



Linha D1B