

INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA POR MEIO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS SP, ELETRORRESISTIVIDADE E GPR

Geotechnical investigation through SP, Electrical Resistivity and GPR geophysical methods

Herson Oliveira da Rocha*

Lúcia Maria da Costa e Silva**

João Andrade dos Reis Júnior***

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados de um estudo geofísico utilizando os métodos do potencial espontâneo (SP), da eletrorresistividade (ER) e radar de penetração no solo (GPR) em parte do estacionamento do Instituto de Geociências (IG) no *campus* da Universidade Federal do Pará (UFPA) em Belém. O resultado de potencial espontâneo aparece na forma de gráficos da distância em função da voltagem, o de resistividade elétrica está apresentado em forma de pseudoseção e o resultado de GPR apresenta-se em formato de radargrama. Os objetivos desse trabalho são localizar e identificar uma tubulação de esgoto constituída de manilhas de concreto e apresentar as principais causas dos constantes alagamentos, bem como mostrar os resultados de um levantamento geofísico aplicado à geotecnia para auxiliar engenheiros civis no imageamento interno de uma estrutura utilizando métodos não invasivos de baixo custo.

SYNOPSIS – This paper presents the results of a geophysical study using the methods of self potential (SP), electrical resistivity (ER) and ground penetrating radar (GPR) in part of the parking lot of the Geosciences Institute (IG) on the campus of the Federal University of Pará (UFPA) in Belém. The result of self potential appears as distance vs. voltage graphs, electrical resistivity is presented in the form of pseudosection and the result of the GPR profile is shown in radargram format. The objectives of this work are to locate and identify a sewer made of concrete pipes and present the main causes of constant flooding, as well as show the results of a geophysical survey applied to geotechnics to assist civil engineers in the internal imaging of a structure using non-invasive, low cost methods.

Palavras Chave – SP, Eletrorresistividade, GPR, Geotecnia, Geofísica.

1 – INTRODUÇÃO

A implantação de obras de Engenharia Civil, principalmente as subterrâneas, exige estudos de caracterização geotécnica para conhecer os materiais que compõem o subsolo e, consequentemente, a localização mais adequada para a obra no terreno, visando minimizar tanto eventuais transtornos causados aos usuários quanto prejuízos aos cofres públicos.

* Professor Assistente da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus de Parauapebas – Pará – Brasil, Mestre em Geofísica. E-mail: herson@ufra.edu.br

** Professora Associada da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Belém, e Pesquisadora do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM)/SUREG-Belém – Pará – Brasil, Doutora em Geofísica. E-mail: luciamcs@ufpa.br

*** Professor Adjunto da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus de Parauapebas – Pará – Brasil, Doutor em Geodinâmica e Geofísica. E-mail: junioreis03@yahoo.com.br

Com o aumento da demanda de estrutura física básica, por exemplo, tubulações de água, gás, cabos elétricos e de telefonia, garagens subterrâneas, implantação de galerias de águas pluviais, etc., os métodos geofísicos têm atraído o interesse das pesquisas em planejamento urbano e obras de Geotecnia e os testes com os mesmos têm crescido, bem como sua subsequente aplicação nos últimos anos.

O método geofísico mais aplicado em planejamento urbano e obras de Geotecnia é o radar de penetração no solo, ou GPR (*ground penetrating radar*), por se tratar de uma ferramenta que permite, de modo não destrutivo e não invasivo a obtenção rápida de seção da subsuperfície, conhecida como radargrama. Após o processamento, o radargrama guarda tamanha analogia com a seção geológica que pode ser interpretado qualitativamente inclusive por não geofísicos.

Outros métodos eletromagnéticos afora o GPR têm sido experimentados, em especial, o Slingram e, ainda, o método elétrico da Eletrorresistividade. O Slingram fornece seção da subsuperfície também a partir de trabalho rápido, não destrutivo e não invasivo como o GPR, mas possui menor resolução e sua interpretação qualitativa não é imediata para o engenheiro, pois é feita a partir das chamadas componentes do campo magnético resultante em fase e fora de fase obtido para várias frequências e arranjos das bobinas transmissora e receptora. Apenas o Slingram na modalidade LIN (*low induction number*) fornece diretamente seção de resistividade, cuja interpretação qualitativa é mais simples. A Eletrorresistividade, por sua vez, não é destrutiva, mas exige o contato de eletrodos com o meio; ela permite obter seções da subsuperfície de resistividade, por meio de trabalho de campo não tão rápido.

Por que então realizar testes com outros métodos além do GPR? O primeiro motivo é que esses métodos empregam instrumental de custo mais baixo, que exige treinamento para sua operação mais simples do que o GPR. Além disso, enquanto o GPR é especialmente sensível à constante dielétrica do meio (mas também à sua resistividade), os demais métodos são sensíveis apenas à sua resistividade. Em outras palavras, as respostas são diferentes e podem ser complementares ou concorrentes dependendo do conteúdo do meio subsuperficial. Ademais, a resistividade aparente obtida pelos dois métodos (e também as componentes em fase e fora de fase) pode ser transformada com o auxílio de programas de interpretação em seções de resistividade real. Além do mencionado, a penetração do GPR é menor do que a dos demais métodos. Finalmente, testar metodologias diferentes do GPR e inclusive das demais citadas, pode revelar resultados de interesse para trabalhos de Engenharia e outros.

Porsani *et al.* (2006) apresentaram resultados obtidos com o GPR sobre um alinhamento onde foram implantadas manilhas de concreto de diferentes diâmetros no Sítio Controlado de Geofísica Rasa da Universidade de São Paulo. Os resultados permitiram mapear todas as manilhas de concreto enterradas, distinguindo-as quanto ao tamanho, distribuição até à profundidade máxima de 1,5 metros, com uma antena de 250 MHz.

Dias *et al.* (2007) realizaram levantamento GPR em travessias de rios distribuídas ao longo de toda a costa nordestina brasileira. Os resultados mostraram que o método GPR é eficaz no mapeamento de dutos enterrados em áreas de travessias de rios, fornecendo uma base metodológica para trabalhos futuros na área de Geotecnia.

Porsani *et al.* (2012) identificaram a presença de interferências subterrâneas, objetivando mapear a existência de blocos ou elementos de fundação em concreto armado do Edifício Copan, utilizando o GPR. Os resultados auxiliaram os engenheiros do consórcio Via Amarela – Linha 4 em São Paulo a escavar o túnel do Metrô no trecho do edifício Copan com segurança.

Silva & Dias (2012) usaram os métodos elétricos Potencial Espontâneo ou SP (*self potential*) e Eletrorresistividade e os métodos eletromagnéticos Slingram-LIN e GPR em parte da orla fluvial, dentro do *campus* da Universidade Federal do Pará (UFPA), na cidade de Belém, com o objetivo de detetar áreas degradadas pela erosão em estágio crítico, antes de seu desmoronamento. Nesse

estudo, despontou que a Geofísica, mais precisamente o GPR, pode ser útil, inclusive, para avaliar a eficácia da obra de contenção do desmoronamento.

Nesta pesquisa serão apresentados resultados obtidos com os métodos SP, Eletorresistividade e GPR no estacionamento da Universidade Federal do Pará em Belém, cujos objetivos são verificar a eficácia desses métodos na detecção de tubulação de esgoto constituída de manilhas de concreto e informações úteis para compreender a causa dos alagamentos locais. Para os métodos da Eletorresistividade e GPR são também apresentados os resultados que seriam esperados a partir da modelagem teórica do problema.

2 – ÁREA DE ESTUDO

2.1 – Localização

A área sob estudo está localizada no interior do *campus* da UFPA, Belém/Pará, em frente à Biblioteca do Instituto de Geociências (IG), nas coordenadas UTM 22 1° 28'29"S, 48°27'30"W, distante cerca de 3 km do centro de Belém (Figura 1).



Fig. 1 – Localização da área de estudo.

2.2 – Clima

A cidade de Belém possui um clima equatorial, quente e úmido. A precipitação média anual fica em torno de 230 mm/ano, com maior frequência de chuvas no primeiro semestre e menor na estação de julho a dezembro. A temperatura média é de 26°C, com máxima de 34°C e mínima de 18°C. A umidade relativa do ar é de 85% (INMET, 2010). Em consequência do clima quente e úmido, não afloram rochas na região, o manto de intemperismo é bastante desenvolvido, e, como o mesmo é rico em umidade e argila, a penetração dos métodos elétricos e eletromagnéticos é dificultada, pois a corrente introduzida perde sua energia pois circula preferencialmente nos estratos mais condutivos.

2.3 – Geologia

As observações geológicas da região metropolitana de Belém indicam três unidades litoestratigráficas: Formação Barreiras, Pós-Barreiras e Sedimentos Holocênicos (Gregório & Mendes, 2009). A Formação Barreiras pertence ao Terciário e é representada por sedimentos continentais argilosos e conglomeráticos com níveis de arenitos ferruginosos, pouco consolidados, com estruturas primárias (estratificações) e conteúdo fóssífero vegetal. O Pós-Barreiras é representado por sedimentos arenosos que variam de alaranjado até totalmente brancos. Essa unidade foi subdividida em duas: fácies areníticos ferruginosos e fácies areníticos diversos. O Quaternário ou Holoceno é representado por areias, siltes, argilas e cascalho, observados principalmente nas margens dos rios que drenam a região metropolitana de Belém (Rosseti & Góes, 2001).

A área do *campus* da UFPA em Belém foi projetada nos terrenos desapropriados que abasteciam de argila uma antiga olaria que funcionava em seu interior. Os buracos deixados pela retirada de argila contribuíam para o alagamento da área, tendo sido necessária a realização de um grande trabalho de aterro hidráulico. Areia de granulometria grossa foi retirada por uma draga de sucção do leito do rio Guamá e lançada nos buracos, acompanhada de sua compactação (Pinto, 2014).

A presença de heterogeneidades da subsuperfície nessas áreas, natural ou introduzida pela ação humana de lavra de argila e posterior aterro, pode ter gerado zonas mais susceptíveis à percolação, devido à introdução de material de maior permeabilidade. Silva & Dias (2012) realizaram um furo de sondagem a trado na orla do *campus* próxima à área de investigação deste trabalho. O aterro possui diferentes espessuras e é menos espesso na orla. O furo realizado, por isso mesmo, permite conhecer os materiais do subsolo a partir de uma penetração pequena. O furo mostra a presença de argila em toda a seção e que o aterro é especialmente bem observado entre 0,18-0,50 m, mas a litologia original só é de fato reconhecida a partir de 0,99 m (Figura 2).

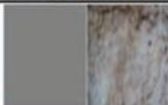
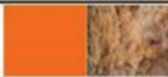
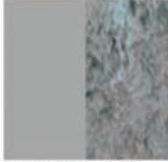
Profundidade (m)	Representação	Descrição
		Camada de húmus Rica em raízes que ajudam na sustentação.
— 0,18 —		Camada Areno-Argilosa Cor amarelada.
— 0,50 —		Camada de Argila e Seixos Cor vermelho-alaranjada contendo conecções ferruginosas.
— 0,67 —		Camada de Silte e Argila Com coloração vermelho- amarelada.
— 0,99 —		Camada Argilosa Com coloração cinza claro, e espessura de pelo menos 46 cm de espessura.
— ≥ 1,45 —		

Fig. 2 – Seção geológica para o furo na orla da UFPA até o nível hidrostático na ocasião do furo. (Silva & Dias, 2012).

3 – LEVANTAMENTO DE DADOS

Primeiramente foi realizada uma visita de reconhecimento da área, para identificação do problema de alagamento e localização da zona com tubulação de 40 cm de diâmetro usada para captação da água pluvial e definição de todas as metodologias geofísicas passíveis de serem adotadas na investigação, tendo em vista os equipamentos disponibilizados pelo Departamento de Geofísica da UFPA.

A campanha geofísica ocorreu num período de dois dias, divididos em duas etapas. A primeira etapa consistiu no levantamento SP. Em seguida foi utilizada a Eletorresistividade e, ao final, o GPR. Para facilitar a comparação dos resultados, todo o trabalho foi sempre realizado ao longo de um perfil de NS de 10 m de extensão, central e perpendicular à direção da tubulação (WE).

Para compreender os resultados obtidos com a Eletorresistividade e o GPR foi construído o modelo representando a situação de campo e calculadas as respostas teóricas (ou seja, as medidas que seriam obtidas no campo para o modelo).

3.1 – SP

O SP baseia-se no seguinte princípio: na ausência de um campo elétrico criado artificialmente, é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos na superfície do terreno. Esse potencial natural ou espontâneo tem várias causas: presença de corpos metálicos, contatos entre rochas de diferentes condutividades, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes térmicos, movimento dos fluídos em subsuperfície, correntes telúricas, etc. (Orellana, 1974).

No levantamento foram usados eletrodos não polarizáveis e um voltímetro de elevada impedância de entrada (da ordem de $10^{14} \Omega.m$) (Figura 3). Antes das medidas, os eletrodos foram deixados conectados e imersos em solução de sulfato de cobre (Cu_2SO_4) por um período superior a 12 horas, com a finalidade de equilibrar o potencial de eletrodo. A diferença de potencial entre os dois eletrodos antes do início do trabalho foi de 4 mV.

O levantamento SP foi realizado em estações espaçadas de 0,50 m ao longo do perfil, totalizando 20 estações. Um eletrodo de referência foi colocado a 6 m de distância da primeira estação do perfil de testes, enquanto o segundo percorreu as estações realizando as medidas (Método dos Potenciais). Ainda que o alvo principal fosse a detecção da drenagem, foram realizadas medidas em dois grupos de horários distantes entre si de quase 2 horas a fim de verificar a possibilidade de detectar potencial de fluxo *per ascensum* provocado pela evaporação da água da

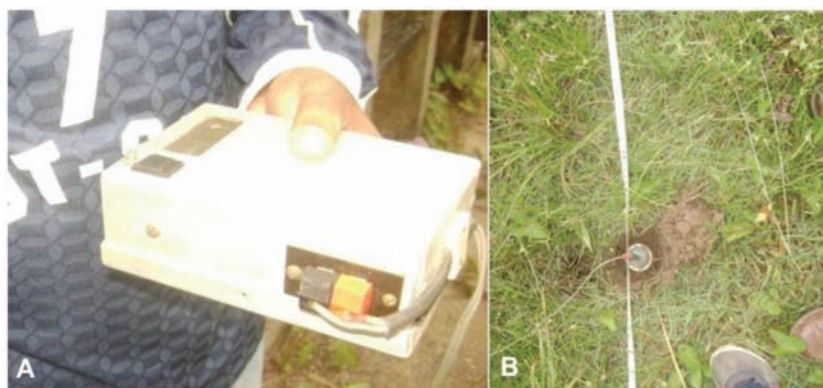


Fig. 3 – Equipamento de SP. (A) Voltímetro. (B) Eletrodo não-polarizável.

chuva no terreno nesse curto período. As estações foram medidas começando às 10 h e depois, novamente, começando às 10h10min. O segundo grupo de medidas começou às 11h36min e 11h47min, mas desta vez foram realizadas duas medidas por estação em cada passagem por estação.

3.2 – Eletorresistividade

No método da Eletorresistividade, uma corrente elétrica é aplicada ao solo através de dois eletrodos metálicos. A corrente atravessa diferentes estratos e corpos enterrados, gerando-se uma diferença de potencial que é medida entre dois outros eletrodos inseridos no terreno. A corrente e a voltagem permitem calcular a resistividade do subsolo. Os valores de resistividade elétrica obtidos sofrem a influência de uma série de fatores como: natureza dos constituintes sólidos do solo, porosidade, grau de saturação, resistividade do fluido nos poros, temperatura, composição da camada catiônica dos argilo-minerais. (Orellana, 1974).

O levantamento de Eletorresistividade foi realizado com o resistivímetro GEOTEST IRPI-1000 Rx de 20 canais, através da técnica de imageamento, que permite obter pseudoseções da subsuperfície. O equipamento permite a verificação automática da resistência de contato entre os eletrodos com o solo e anular eletronicamente o potencial espontâneo de eletrodo que, para as medidas de potencial com o método da Eletorresistividade, são indesejáveis (Figura 4). Foram utilizados os arranjos de eletrodos na configuração Wenner, para 6 níveis de investigação, com eletrodos dispostos a cada 1 m ao longo do perfil.



Fig. 4 – Resistivímetro IRPI – 1000 da GEOTEST.

3.3 – GPR

O GPR faz uso de uma antena transmissora que emite ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 – 2.500 MHz) para a subsuperfície do terreno. Havendo contraste nas propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície, parte do sinal é refletido e recebido por uma antena receptora, permitindo obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície (o radargrama) (Daniels, 1996; Annan, 2002). A profundidade de penetração depende diretamente de uma série de fatores, dentre eles: o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno, fatores estes ligados à perda de energia durante a propagação da onda eletromagnética. A profundidade de penetração é uma estimativa teórica da profundidade máxima de investigação possível considerando a frequência da onda eletromagnética e o material, considerando sua dispersão (Matos Júnior, 2009).

Os dados GPR foram adquiridos com o equipamento TerraSIRch SIR (Subsurface Interface Radar) System-3000, fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc* (GSSI, 2003), com uma antena de 400 MHz (Figura 5). A investigação foi feita com marcações em intervalos de 1 m ao longo do perfil e janela temporal de 80 ns, sendo o espaçamento entre cada traço de 0,02 m, para rastrear tubulações menores, caso existam, 512 amostras por traço, 64 *scans* por segundo, taxa de transmissão de 100 kHz, velocidade de deslocamento de 0,5 m/s.

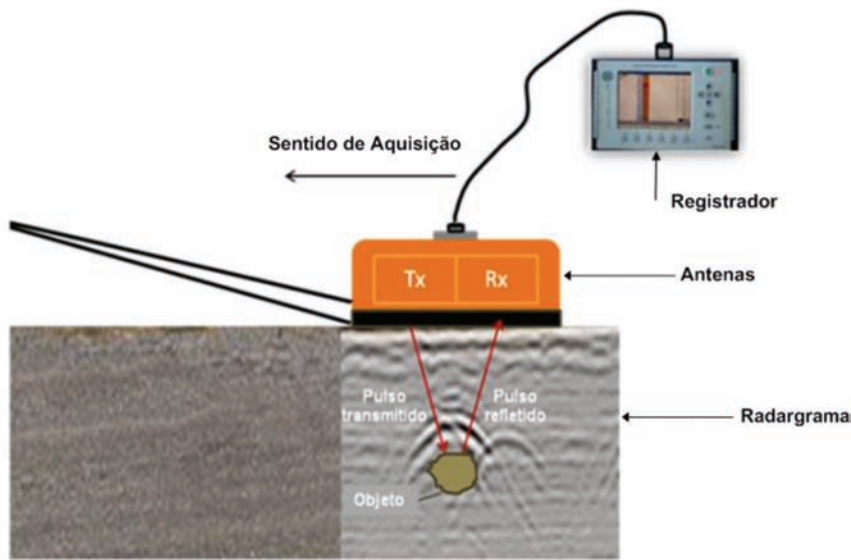


Fig. 5 – Modelo do registro e aquisição dos dados de GPR. (Rocha *et al.*, 2015)

4 – RESULTADOS

4.1 – SP

O perfil com os dados brutos de SP é mostrado na Figura 6. No eixo das abscissas foram lançadas as posições dos pontos de medida (estações) e no eixo das ordenadas, a voltagem medida.

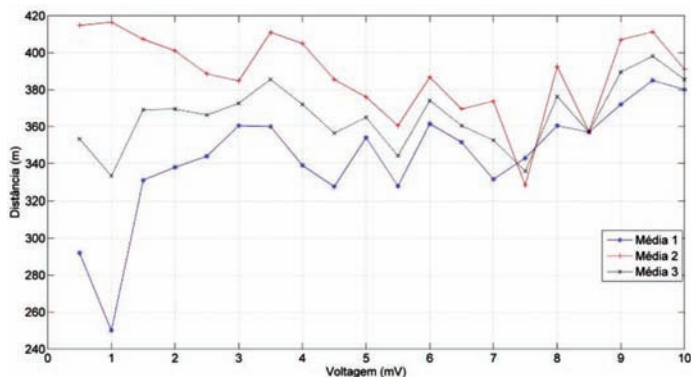


Fig. 6 – Perfil de SP com os dados brutos.

Das medidas obtidas iniciando às 11h36min e 11h47min, apenas as segundas medidas realizadas foram utilizadas, exceto nas estações 1 e 2 afetadas por erraticidade no sinal. Assim, procurou-se evitar o distanciamento ocorrido com as duas primeiras medidas realizadas às 10:00h, provavelmente provocada por correntes telúricas, que são as principais responsáveis por erraticidades a curtos intervalos de tempo.

A Figura 7 mostra a média das medidas iniciadas às 10h e 10h10min (Média 1) bem como a média das medidas iniciadas às 11h36min e 11h47min (Média 2), bem como a média de ambas (Média 3).

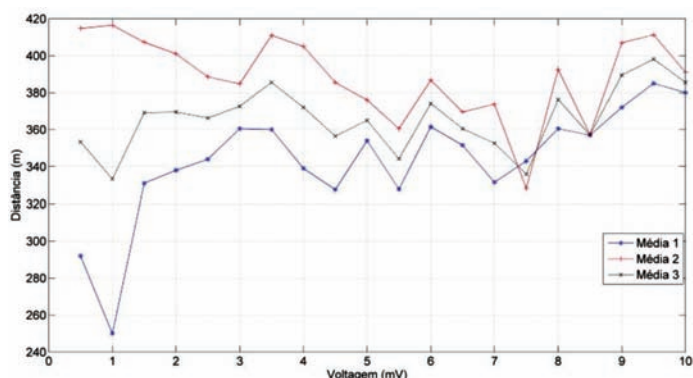


Fig. 7 – Perfil de SP com as médias dos dados.

É conhecido que a eletrofiltração registra o fluxo de aquífero mostrando voltagens espelhadas (ou seja, se a água desce de A para B, a voltagem cresce de A para B) (Orellana, 1974). As figuras mostram que os últimos dados medidos possuem valores mais baixos. Em outras palavras, denotariam movimento ascendente de fluidos. As medidas entre os dois períodos afastam-se mais para as primeiras estações do perfil, onde a topografia é algo mais baixa e a umidade é maior. Essa indicação do SP não é encontrada na literatura e é ainda mais surpreendente em se tratando de um efeito de eletrofiltração *per ascensum* captado em curto espaço de tempo. Isso pode ter ocorrido porque as medidas foram realizadas em período de insolação máxima e por conta da evaporação intensa comum na Amazônia e condições locais. Por outro lado, os resultados não revelam a presença da rede de captação, central ao perfil.

4.2 – Eletrorresistividade

Os valores de resistividade aparente foram interpretados com o *software* RES2DINV versão 3.59 (GEOTOMO, 2003), cuja técnica de inversão usa o vínculo matemático da suavidade entre parâmetros adjacentes. O resultado da interpretação é apresentado na Figura 8. Os dados obtidos a partir das medidas de campo aparecem na pseudoseção do topo. O modelo físico obtido aparece na base da figura. Finalmente, os valores de resistividade que seriam obtidos com esse modelo físico aparecem na porção intermediária da figura para facilitar sua comparação com a pseudoseção de valores medidos acima, pois quanto mais próximas essas duas pseudoseções se encontram, mais provável pode ser o modelo físico resultante da inversão representado na parte inferior da figura.

O modelo físico geoeletrico (Figura 8) obtido após três iterações têm valores de resistividade elétrica entre 31 e 3.477 $\Omega.m$. O ajuste entre a pseudoseção obtida com dados de campo e aquela calculada a partir do modelo físico obtido mostra um erro de 10,8 %, um erro considerável, logo o modelo geoeletrico deve ser considerado um modelo aproximado para o subsolo. Isso ocorre por

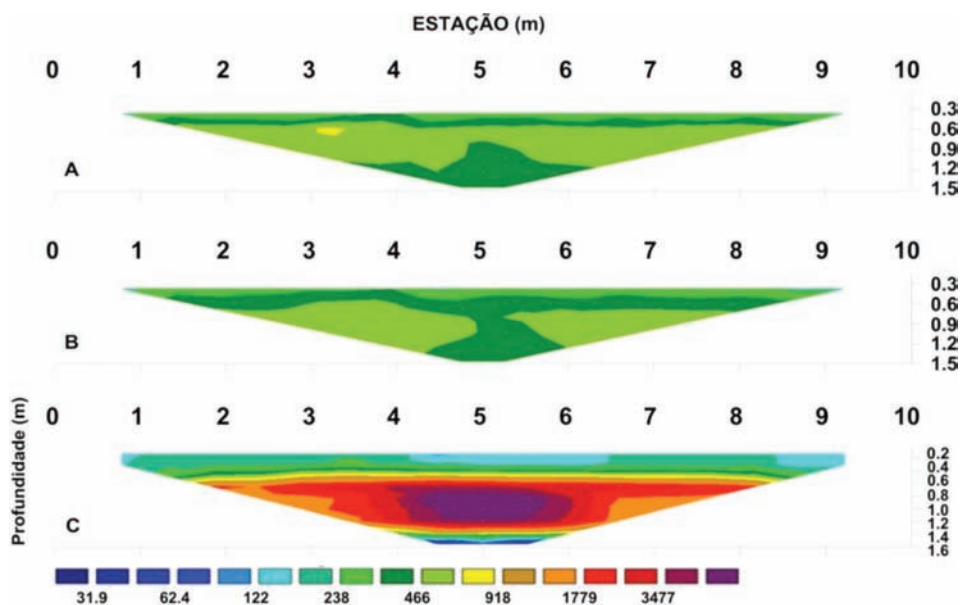


Fig. 8 – Resultados de Eletrorresistividade. (a) Pseudoseção de resistividade aparente obtida a partir dos dados medidos em campo. (b) Pseudoseção de resistividade aparente calculada a partir de: (c) Modelo físico de resistividade, obtido após a inversão dos dados.

que o vínculo da suavidade não descreve a interface brusca da manilha com o subsolo e não se encontra disponível programa com vínculo adequado ao problema.

No modelo obtido para a subsuperfície, é possível verificar a presença de quatro zonas. A primeira ocorre superficialmente, entre as estações 4 e 6 do início do perfil, possui resistividade elétrica em torno de 122 $\Omega.m$ e sugere a presença de solo areno-argiloso úmido, conforme verificado no local, até uma profundidade de aproximadamente 0,3 m. A segunda desenvolve-se entre cerca de 0,3 a 0,7 m de profundidade, entre as estações 1 a 8 aproximadamente, apresenta resistividade variando de 238 a 918 $\Omega.m$ e está provavelmente associada à camada de aterro. A terceira zona aparece entre 0,7 e 0,8 m de profundidade, centrada na estação 5, possui resistividade superior a 1.779 $\Omega.m$ e pode ser interpretada como sendo resultado do efeito da tubulação de captação das águas pluviais do estacionamento do *campus* sobre camada com resistividade muito inferior (provavelmente a camada que corresponde a segunda zona antes descrita). Finalmente, a quarta zona ocorre abaixo da tubulação e mostra resistividade abaixo de 200 $\Omega.m$, provavelmente devido ao acúmulo de líquido resultante da percolação da água com o solo ou por vazamento da tubulação.

Foram construídos dois modelos para simular a situação de campo e calculada a resistividade que seria medida com esses modelos (Figuras 9 e 10). O primeiro modelo compreende uma camada superficial com resistividade de 200 $\Omega.m$ e espessura de 40 cm; uma segunda camada com resistividade de 500 $\Omega.m$ e 80 cm de espessura, na qual foi inserido um corpo de 40 cm de diâmetro com resistividade de 4.000 $\Omega.m$ para simular a tubulação caso estivesse preenchida em quase sua totalidade por ar, e, finalmente, o embasamento com resistividade igual a 200 $\Omega.m$ (Figura 9). O modelo não considerou a presença da zona superficial limitada às estações 4 e 6 do perfil de campo.

O segundo modelo é igual ao primeiro, a menos do corpo usado para simular a tubulação, que agora possui resistividade muito inferior, 100 $\Omega.m$, para simular água em seu interior (Figura 10).

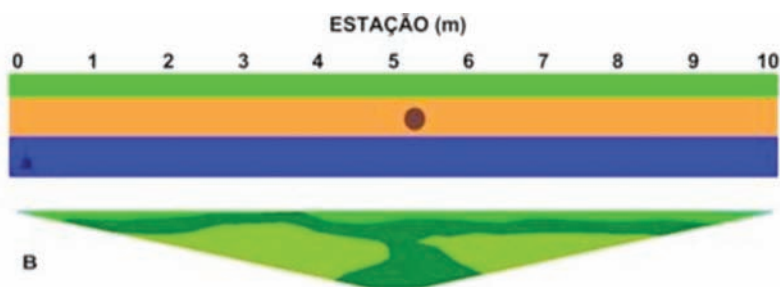


Fig. 9 – Experimento teórico. A) Modelo de três camadas com a tubulação vazia.
B) Pseudoseção que seria obtida com medidas calculadas sobre o modelo.

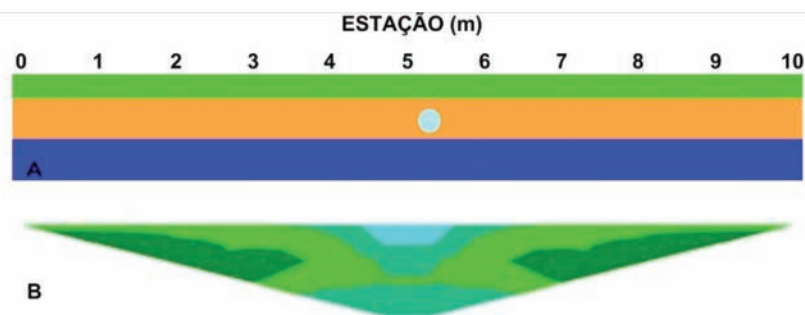


Fig. 10 – Experimento teórico. A) Modelo de três camadas com a tubulação cheia de água.
B) Pseudoseção que seria obtida com medidas calculadas sobre o modelo.

O experimento que mais se aproxima da situação de campo é o primeiro, de modo que pode ser inferido que o cano praticamente não possuía água em seu interior.

A Figura 11 mostra o resultado da interpretação com o *software* RES2DINV das medidas obtidas com o experimento que mais se aproxima da situação de campo. O ajuste entre a pseudoseção construída com dados sintéticos e aquela calculada a partir do modelo físico obtido

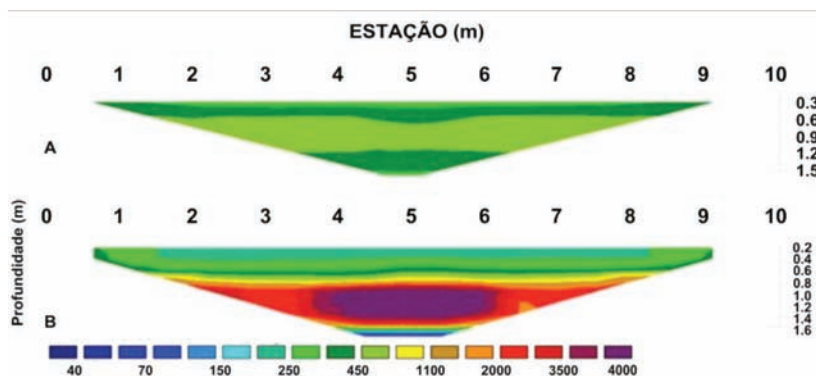


Fig. 11 – Resultados teóricos de Eletrorresistividade para tubulação com ar. (a) Pseudoseção de resistividade aparente calculada a partir de: (b) Modelo físico de resistividade, obtido após a inversão dos dados.

com a inversão mostra um erro de 2,3%, um erro considerável, assim como ocorreu com a interpretação dos dados reais. O modelo físico obtido pela inversão afasta-se consideravelmente do modelo sintético (Figura 11b). Consequentemente, o vínculo da suavidade é o maior empecilho para a recuperação do modelo mostrando a tubulação, cuja informação está contida nos dados sintéticos.

A Figura 12 apresenta o resultado da simulação obtida com o mesmo *software* onde foi simulada a tubulação preenchida por água. O ajuste entre a pseudoseção construída com dados sintéticos e aquela calculada a partir do modelo físico obtido com a inversão mostra um erro de 2,1%, um erro considerável, assim como ocorreu com a interpretação dos dados reais.

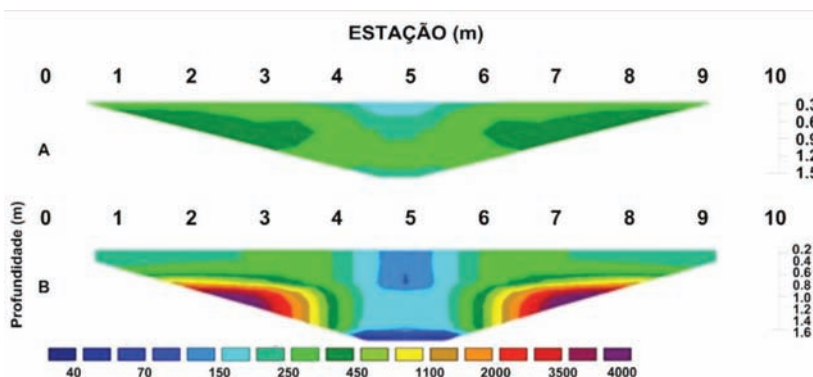


Fig. 12 – Resultados teóricos de Eletorresistividade para tubulação com água.

- (a) Pseudoseção de resistividade aparente calculada a partir de:
- (b) Modelo físico de resistividade, obtido após a inversão dos dados.

4.3 – GPR

O processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa *ReflexW*, versão 7.0 (Sandmeier, 1998), cujas etapas são descritas a seguir. (a) Pré-processamento, que consiste na edição, reamostragem espacial e interpolação dos traços. Durante essa etapa foram removidos os traços duplicados, que surgem quando a antena permanece em um mesmo local durante a aquisição, eliminados os efeitos ocasionados pela mudança da velocidade com que o operador desloca a antena e o comprimento do perfil ajustado. (b) Ajuste do tempo zero, que consiste na determinação da chegada da primeira onda refletida. (c) Aplicação de ganho para compensação do decaimento de energia. (d) Filtragens 1D (*dewow* e *bandpass frequency*), para remoção de sinais indesejáveis e 2D, para remoção do *background*. (e) Finalmente, foi realizada a conversão da escala de tempo para profundidade por meio da técnica de ajuste hiperbólico.

O resultado é apresentado no radargrama da Figura 13, em que a distância ao longo do perfil aparece no eixo horizontal e o tempo de ida e volta do sinal no eixo vertical bem como a profundidade obtida pelo ajuste hiperbólico; aparece uma interface contínua por todo o comprimento do perfil, a uma profundidade variando entre 1 e 1,2 m, provavelmente criada pelo aterro compactado. No entanto, destaca-se a anomalia em formato hiperbólico, com elevada amplitude (velocidade de 0,075 m/ns), sob a posição 5 m do início do perfil, a uma profundidade entre 0,6 e 0,8 m. provocada pela tubulação no subsolo. Destaca-se ainda que o radargrama mostra que a camada superficial atenua o sinal, o que sugere maior conteúdo de argila ou água nessa camada.

Foram construídos dois modelos para simular a situação de campo e calculado o radargrama que seria obtido com esses modelos (Figuras 14 e 15). O primeiro modelo (Figura 14) mostra a

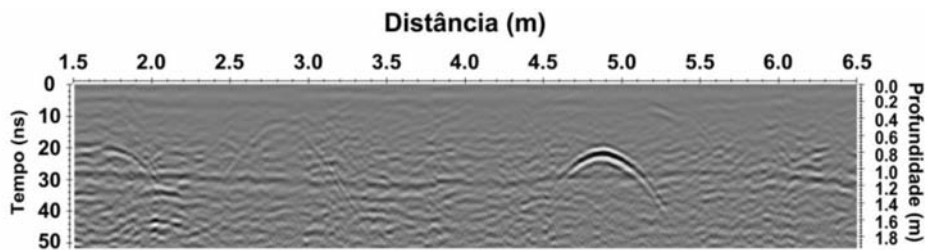


Fig. 13 – Radargrama de GPR mostrando os padrões de reflexão relacionados a interfaces geológicas e geotécnicas presentes na área de estudo.

seção de GPR, a qual secciona a tubulação de modelo preenchido com ar, enquanto que o segundo modelo (Figura 15) simula a tubulação contendo água e ar em seu interior. Na confecção desses radargramas, os valores da constante dielétrica foram estimados a partir da análise das camadas do perfil geológico mostrado na Figura 2. Foram, ainda, utilizados valores de resistividade do perfil geoeletrico, adquirido no mesmo local em que foi adquirido o perfil de GPR.

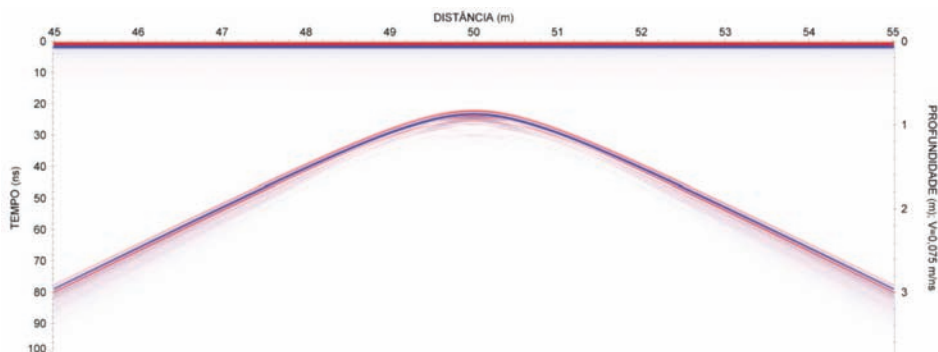


Fig. 14 – Radargrama sintético com a tubulação vazia.

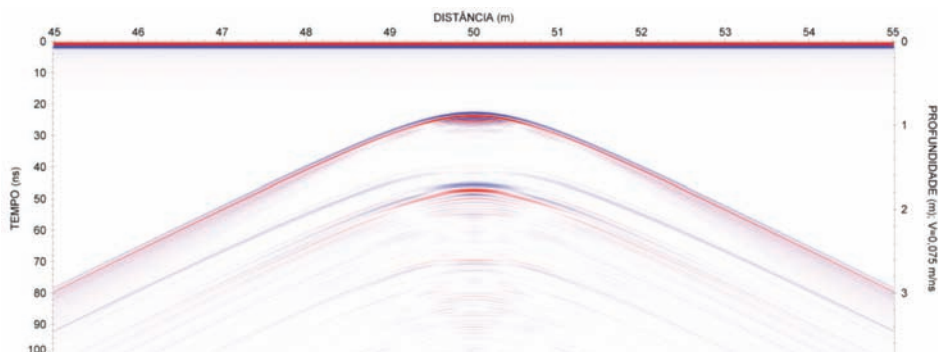


Fig. 15 – Radargrama sintético com a tubulação contendo água e ar.

Os valores de constante dielétrica, bem como os de resistividade usados na construção dos modelos sintéticos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros físicos empregados para radargramas sintéticos. (y) espessura da camada (m); (ϵ) constante dielétrica e (σ) condutividade elétrica (S/m).

Unidade Geológica	Y (m)	ϵ	σ (S/m)
Solo areno-argiloso úmido	0 - 4	10	0,005
Entulho	0,7 - 1	8	0,002
Tubulação	0,8 - 1,2	1 (ar); 80 (água)	∞

Os radargramas sintéticos foram criados através do método numérico das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD - *Finite Difference Time Domain*), tendo sido utilizado o software *ReflexW* 7.0. Através do método FDTD, as equações diferenciais são substituídas por diferenças finitas criadas por meio da expansão em série de Taylor e truncamento ao nível de erro desejado (Pozrikidis, 1998). Nas simulações de GPR, o método FDTD tem sido o mais utilizado devido a sua maior precisão e por ser mais robusto que o método de elementos finitos, equações integrais, métodos híbridos e de traçado de raios (Zeng & McMechan, 1997; Cunha, 2003).

Tais simulações foram realizadas utilizando a opção onda plana para simular a propagação da onda eletromagnética em subsuperfície, com uma frequência de 400 MHz, incremento espacial de 0,02 m e incremento temporal de 0,033 ns. O valor do incremento temporal é calculado pelo próprio *software*, respeitando o critério de estabilidade numérica e proporcionando condições de convergência ao sistema (Taflove & Brodwin, 1975; Sandmeier, 1998). E para evitar efeitos de borda, o modelo geofísico foi estendido por 3 vezes o seu comprimento original.

5 – CONCLUSÕES

As investigações geofísicas realizadas possibilitaram o delineamento de anomalias geofísicas associadas a interfaces geotécnicas (manilha de concreto) e geológicas (aterro). Os resultados de SP foram interpretados de maneira qualitativa, pois sofreram variações consideráveis ao longo de um intervalo de observação de 1h47min. Os picos que apareceram no conjunto de medidas podem ter sido provocados por ruídos onde se percebe, entre as estações 3 e 5, uma diminuição dos potenciais observáveis na subsuperfície do terreno possivelmente relacionado à presença da tubulação.

Os resultados de eletrorresistividade mostraram padrões distintos de resistividade elétrica, em que se destaca o alvo (a tubulação) fornecendo respostas resistivas, devido à presença de ar em seu interior, e a zona de baixa resistividade abaixo da tubulação, devido ao acúmulo de líquido resultante da percolação da água com o solo ou por vazamento da tubulação. A modelagem dos dados de eletrorresistividade e de GPR foram fundamentais para verificar se a tubulação estava cheia ou vazia, além de validar os dados adquiridos em campo. O GPR localizou a estrutura em concreto, identificando sua posição e estimando sua profundidade, sendo, portanto, recomendado para estudos de mapeamento de interferências na subsuperfície rasa em apoio às obras subterrâneas em ambiente urbano.

Perante os resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia geofísica, aliada às informações diretas, utilizada para caracterização geotécnica-geológica mostra-se muito eficaz, proporcionando detalhamento com grande resolução em estruturas de concreto, sendo assim, uma ferramenta tecnológica de alta precisão para obras de engenharia, o que é consenso entre os

geofísicos. Com isso, as informações geofísicas são essenciais na tomada de decisão para manutenção da rede de esgoto e recomenda-se, em caso de escavação na área, cautela próxima às regiões onde foram localizadas anomalias hiperbólicas possivelmente associadas a interferências presentes no subsolo.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela estrutura, suporte e logística proporcionada à realização desta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS

- Annan, A.P. (2002). *Ground Penetrating Radar*, workshop notes: Sensor and Software Inc., Mississauga, Ontário, Canadá.
- Cunha, M.C.C. (2003). Métodos Numéricos, 2ª ed. Ed UNICAMP, Campinas, SP.
- Daniels, J.J. (1996). *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 300p.
- Dias, A.P.; Botelho, M.B.; Borges, W.R.; Marques, R.M. (2007). *Avaliação Sobre a Eficiência do Radar de Penetração no Solo (GPR) na Detecção de Dutos em Travessias de Rios*. X International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brasil.
- GEOTOMO SOFTWARE (2003). *Geoelectrical Imaging 2D & 3D*: disponível em www.geoelectrical.com.
- Gregório, A.M.S.; Mendes, A.C. (2009) *Batimetria e Sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil*. Revista Amazônia: Ciência & Desenvolvimento, v. 5, n. 9.
- GSSI. (2003). User's Manual. Version 7.0. Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH.
- INMET (2010). Rede de Monitoramento de Eventos Extremos na Amazônia. Dados diários de precipitação pluviométrica em Belém, estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia, Belém.
- Matos Jr., O.S.(2009). *Modelagem e levantamento GPR em estruturas de concreto com antena de 400 MHz*. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA, Instituto de Geociências, Belém. 54p.
- Orellana, E. (1974). *Prospección Geoeléctrica por Campos Variables*. Madrid, Paraninfo, 561p.
- Pinto, W. (2014). Beira do Rio. Jornal da Universidade Federal do Pará. Disponível em: www.ufpa.br/beiradorio/novo/index.php/2007/108-edicao-especial-50-anos-da-ufpa/309-a-fundacao-do-campus-pioneiro-da-ufpa: acessado 30/10/14.
- Porsani, J.L.; Borges, W.R.; Rodrigues, S.I.; Hiodo, F.Y. (2006). *O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D*. Revista Brasileira de Geofísica (Impresso), Rio de Janeiro, v. 24, pp. 49-61.
- Porsani, J.L.; Ruy, Y.B.; Ramos, F.P.; Yamanouth, G.R.B. (2012). *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, pp. 25-31.
- Pozrikidis, C. (1998). *Numerical Computation in Science and Engineering*, 1ª ed. Oxford University Press, New York (USA). 627 p.

- Rocha, H.O.; Silva, M.W.C.; Marques, F.L.T.; Leite Filho, D.C. (2015). *Gradiometria magnética e radar de penetração no solo aplicados em estearias de Penalva (MA)*. Geologia USP. Série Científica, v. 15, pp. 3-14.
- Rossetti, D.F.; Góes, A.M. (2001). *Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brasil applying ground penetrating radar*. Revista Brasileira de Geociências, Curitiba, v.31 n. 2, pp. 101-128.
- Sandmeier, K.J. (1998). *Manual do software ReflexW*, version 4.2. Karlsruhe.
- Silva, L.M.C.; Dias, G.N. (2012). *Inspeção da eficácia de obras de contenção de erosão por meio do GPR*. Geotecnia (Lisboa), nº 126, pp. 53-60.
- Taflove, A.; Brodwin, M.E. (1975). *Numerical Solution of Steady-State Eletromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. v. MTT-23, pp. 623-630.
- Zeng, X.; McMechan, G.A. (1997). *GPR characterization of buried tanks and pipes*. Geophysics, 62 (3), 797-806.