

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
CURSO DE MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
GEOCIÊNCIAS

CARLOS FILIPE NASCIMENTO DA SILVA BELEZA

RESISTÊNCIA TRANSVERSAL DE DAR ZARROUK E ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO DO SOLO: NOVAS EQUAÇÕES E CORRELAÇÕES PARA O
LATOSSOLO AMAZÔNICO

MANAUS – AM

2024

CARLOS FILIPE NASCIMENTO DA SILVA BELEZA

RESISTÊNCIA TRANSVERSAL DE DAR ZARROUK E ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO DO SOLO: NOVAS EQUAÇÕES E CORRELAÇÕES PARA O
LATOSSOLO AMAZÔNICO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Geociências do
Instituto de Ciências Exatas da
Universidade Federal do Amazonas em
cumprimento às exigências para obtenção
do título de Mestre em Geociências.

ORIENTADOR: PROF. DR. RAPHAEL DI CARLO SILVA DOS SANTOS
COORIENTADORA: PROFA. DRA. JAMILE DEHAINI

MANAUS-AM
2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B428r Beleza, Carlos Filipe Nascimento da Silva
Resistência transversal de Dar Zarrouk e índice de resistência à
penetração no solo : novas equações e correlações para o
latossolo amazônico / Carlos Filipe Nascimento da Silva Beleza .
2024
88 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raphael Di Carlo Silva dos Santos
Coorientadora: Jamile Dehaini
Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal
do Amazonas.

1. Sondagem a percussão-SPT. 2. Nspt. 3. resistência
transversal. 4. eletrorresistividade. 5. geotecnia. I. Santos, Raphael
Di Carlo Silva dos. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

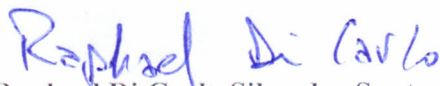
CARLOS FILIPE NASCIMENTO DA SILVA BELEZA

RESISTÊNCIA TRANSVERSAL DE DAR ZARROUK E ÍNDICE DE
RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO: NOVAS EQUAÇÕES E
CORRELAÇÕES PARA O LATOSSOLO AMAZÔNICO

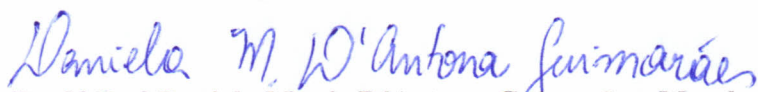
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovado em: 18 de dezembro de 2024.

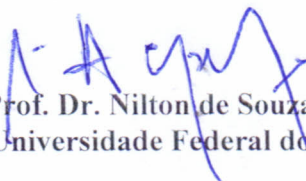
BANCA EXAMINADORA



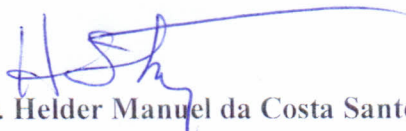
Prof. Dr. Raphael Di Carlo Silva dos Santos, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO



Prof.^a Dr.^a Daniela Muniz D'Antona Guimarães, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGECC



Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGECC



Prof. Dr. Helder Manuel da Costa Santos, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, DEGEO

*Dedico esta dissertação de mestrado
a Deus, minha esposa, meus pais e
amigos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e a maneira como tem me conduzido pelo caminho;

À minha esposa, meus pais, minhas irmãs e amigos por todo apoio e incentivo;

Ao meu orientador pela disponibilidade, apoio, incentivo e conhecimento;

À minha coorientadora pela disponibilidade e apoio nos trabalhos de campo tanto na aquisição como na interpretação dos dados de campo;

Aos meus colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Geociências por todo apoio, incentivo, conhecimento e companheirismo. Deixo aqui uma menção honrosa aos meus colegas que me acompanharam na aquisição dos dados de campo: Cíntia Eleutério Mendes, Roney da Silva, Isabelle Cruz e Maely Carvalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geociências pelo conhecimento transmitido;

À Universidade Federal do Amazonas por oportunizar o curso de Pós-Graduação em Geociências, incentivando o ensino e a pesquisa;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas pela concessão de bolsa de estudos, fundamental para minha permanência no curso;

À Coneresonda Engenharia e Tecnologia Ltda. e a Comunidade União do Vegetal pelo acesso aos boletins de sondagem e acesso em terreno para execução de sondagem elétrica vertical, respectivamente;

A todos, minha sincera gratidão.

RESUMO

O solo é usualmente empregado na construção civil e investigado pela geotecnia para a adequação e instalação das fundações de obras civis. O método mais comum de investigação do solo realizado pela geotecnia é a Sondagem a Percussão (*Standard Penetration Test* - SPT), pois, por meio deste ensaio, podemos obter a consistência e compacidade do solo através do Índice de Resistência à Penetração (Nspt). Contudo, este método é limitado à profundidade de investigação devido a impossibilidade de penetração do trado em saprólitos ou no próprio embasamento, conferindo a determinado material certa resistência somente em relação ao quanto este suporta à penetração do amostrador padrão do ensaio. Além do SPT, o método da eletrorresistividade também mapeia a subsuperfície através da estimativa de valores de resistividade elétrica calculados após a injeção de corrente elétrica no solo. A aplicação conjunta destes dois métodos aumenta a acurácia na interpretação da litologia e compactação do solo ao correlacionar os valores de resistência transversal T de Dar Zarrouk, oriundos da resistividade, com os valores Nspt em uma relação linear. Este trabalho propõe novas correlações entre T x Nspt para alguns pontos de Manaus-AM através da estimativa de resistividade vertical e lateral e informações de Nspt a partir de boletins de sondagens. O trabalho utilizou dados de 5 Sondagens Elétricas Verticais e 2 Caminhamentos Elétricos para calcular T e 5 boletins SPT localizados nas zonas centro-sul, oeste e norte da cidade. Os resultados mostraram fortes correlações entre alguns bairros da cidade e fracas correlações entre outros bairros indicando a mudança de litologia e compactação do solo em diferentes pontos. Com estas correlações pudemos estabelecer relações lineares inéditas entre T x Nspt para cada região investigada da cidade, formando um quadro-guia de equações para futuras obras geotécnicas nestas regiões.

Palavras-chave: Sondagem a Percussão SPT; Nspt; Resistência Transversal, Eletrorresistividade; Geotecnia.

ABSTRACTS

The soil is commonly used in civil construction and investigated by geotechnics for the suitability and installation of civil works foundations. The most common soil investigation method performed by geotechnics is the Standard Penetration Test (SPT), as this test allows us to obtain the soil's consistency and compaction through the SPT N-value (N_{spt}). However, this method is limited in terms of investigation depth due to the impossibility of auger penetration in saprolites or the bedrock itself, assigning a certain resistance to a given material only concerning how much it withstands the penetration of the standard sampler in the test. In addition to SPT, the electrical resistivity method also maps the subsurface by estimating electrical resistivity values calculated after injecting an electrical current into the subsoil. The combined application of these two methods increases the accuracy in interpreting soil lithology and compaction by correlating the Dar Zarrouk's Transverse Resistance (T), derived from resistivity, with the N_{spt} values in a linear relationship. This study proposes new correlations between T and N_{spt} for specific coordinates in Manaus-AM by estimating vertical and lateral resistivity and using N_{spt} information from drilling reports. The study utilized data from five Vertical Electrical Soundings and two Electrical Resistivity Tomography surveys to calculate T , along with five SPT reports from the central-south, west, and north zones of the city. The results showed strong correlations in some neighborhoods and weak correlations in others, indicating variations in lithology and soil compaction across different locations. These correlations allowed us to establish novel linear relationships between T and N_{spt} for each investigated region of the city, forming a reference framework of equations for future geotechnical works in these areas.

Keywords: Standard Penetration Test (SPT); N_{spt} ; Transverse Resistance, Electroresistivity; Geotechn

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de equipamentos utilizados na execução de ensaio de sondagem SPT....	15
Figura 2 - Amostrador do tipo Terzaghi.....	16
Figura 3 - Exemplo de boletim de ensaio de sondagem SPT com os elementos profundidade, Nspt, nível d'água, litologia e classificação de compactação.....	17
Figura 4 - Esquema passagem de corrente elétrica e resistência em função de um comprimento L.	19
Figura 5 - Disposição dos eletrodos de corrente A e B e de potencial M e N na SEV.	21
Figura 6 - Arranjo Schlumberger para SEV. A distância L entre os eletrodos AB aumenta enquanto a distância a entre os eletrodos MN é constante.	22
Figura 7 - Gráfico Distancia AB/2 versus Resistividade aparente.	22
Figura 8 - Curva de SEV para vários valores MN diferentes. A embreagem garante a continuidade da curva evitando valores errôneos devido a valores altos de aberturas AB.	24
Figura 9 - Esquema de aquisição num CE com arranjo dipolo-dipolo. AB são os eletrodos e corrente e MN são os eletrodos de potencial com espaçamento x que se movimentam n vezes até o final do perfil.....	26
Figura 10 - Exemplo de apresentação de dados invertidos de CE.....	27
Figura 11 - Ilustração do conceito de Resistência Transversal T e da Condutância unitária Longitudinal C.	28
Figura 12 - Resistímetro Tectrol e eletrodos AB e MN em arranjo Schlumberger.....	32
Figura 13 - Resistímetro SYSCAL KID em arranjo dipolo-dipolo.....	33
Figura 14 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas.	35
Figura 15 - Mapa geológico da cidade de Manaus-AM.	36
Figura 16 - Seção geológica esquemática, em corte de estrada na zona norte de Manaus-AM, indicando dois níveis de laterização afetados por falhas.	37
Figura 17 - Perfis lateríticos do município de Manaus-AM.....	38
Figura 18 - Exposição de horizonte transicional e linha de pedra em perfil da avenida Grande Circular, zona norte de Manaus-AM.	39
Figura 19 - Comparação entre horizontes solo, esferolítico e argiloso.	39
Figura 20 - Estruturas colunares com diferentes horizontes.....	40
Figura 21 - Perfil de Latossolo amarelo.	42
Figura 22 - Distribuição dos furos de sondagem SPT, SEVs e CEs na cidade de Manaus.....	44
Figura 23 - Dados SPT e da SEV-01. (a) Boletim de sondagem SPT realizado no Bairro São Francisco. (b) Resultados da inversão da SEV-01.	47
Figura 24 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em terreno próximo a quadra poliesportiva Campo da CEAM no Bairro São Francisco. As linhas vermelhas representam a contenção do talude.	48
Figura 25 - Dados SPT e da SEV-02. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado no Bairro Nossa Senhora das Graças. (b) Resultados da inversão da SEV-02.....	49
Figura 26 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em terreno próximo ao Clube Hípico de Manaus no bairro Nossa Senhora das Graças.....	50
Figura 27 - Dados SPT e da SEV-03. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado no bairro Flores, Avenida das Torres. (b) Resultados da inversão da SEV-03.....	51
Figura 28 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em canteiro central na Avenida das Torres, bairro Flores.	52
Figura 29 - Dados SPT e da SEV-04. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo, relacionado à SEV- 04 (b) Inversão de dados da SEV-04.....	53
Figura 30 - (a) Perfil invertido do caminhamento elétrico realizado na Praça Parque da	

Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo. (b) Interpretação conjunta do caminhamento elétrico com o modelo geoeletrico da SEV-04 e com o boletim de sondagem NSPT.	54
Figura 31 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo.	55
Figura 32 - (a) Boletim de sondagem NSPT realizado em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário da Cidade de Manaus relacionado a SEV-05 (b) Inversão geoeletrica da SEV-05.....	56
Figura 33 - Perfil invertido do caminhamento elétrico realizado em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário de Manaus. (b) Interpretação conjunta do caminhamento elétrico com o modelo geoeletrico da SEV-05 e com o boletim de sondagem NSPT	57
Figura 34 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário de Manaus, bairro Lago Azul.....	58
Figura 35 – Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de São Francisco.	70
Figura 36 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Nossa Senhora das Graças.	71
Figura 37 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Flores.....	72
Figura 38 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Novo Aleixo.	73
Figura 39 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Lago Azul.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação aproximada do número de golpes SPT com a consistência de um solo argiloso.	18
Tabela 2 - Informações dos Pontos onde foram executados os furos de sondagem SPT.....	44
Tabela 3 - Informações dos Pontos onde foi realizado os ensaios de Sondagem Elétrica Vertical próximos aos furos de sondagem SPT.....	45
Tabela 4 - Informações dos Pontos onde foi realizado os ensaios de Caminhamento Elétrico próximos aos furos de sondagem SPT.....	45
Tabela 5 - Lista de relações lineares entre Resistencia Transversal T com o Número de Golpes Nspt para os bairros de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres, Novo Aleixo e Lago Azul. Linhas em verde indicam $R^2 > 0,7$	68
Tabela 6 - Quadro de orientação para a interpretação de futuros furos de sondagens realizados nas regiões da cidade de Manaus onde as investigações foram realizadas.	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de São Francisco.....	59
Gráfico 2 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Nossa Senhora das Graças.....	59
Gráfico 3 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região da Avenida das Torres (Flores).....	60
Gráfico 4 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Novo Aleixo.....	60
Gráfico 5 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Lago Azul.....	61
Gráfico 6 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Nossa Senhora das Graças.....	61
Gráfico 7 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Lago Azul.....	62
Gráfico 8 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Torres.....	62
Gráfico 9 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Novo Aleixo.....	63
Gráfico 10 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Torres.....	63
Gráfico 11 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Novo Aleixo.....	64
Gráfico 12 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Lago Azul.....	64
Gráfico 13 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Torres e Novo Aleixo.....	65
Gráfico 14 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Torres e Lago Azul.....	65
Gráfico 15 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Novo Aleixo e Lago Azul.....	66
Gráfico 16 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças e Novo Aleixo.....	66
Gráfico 17 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres e Novo Aleixo.....	67
Gráfico 18 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres, Novo Aleixo e Lago Azul.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Teste de Sondagem A Percussão (SPT).....	14
2.2	Eletrorresistividade.....	18
2.2.1	Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	21
2.2.2	Caminhamento Elétrico (CE).....	24
2.3	Resistência Transversal	27
2.4	Correlação entre Resistência Transversal T e Índice de Resistência à Penetração Nspt na literatura.....	28
2.5	Equipamentos e Softwares	32
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	33
3.1	Bacia do Amazonas	33
3.2	Perfis Lateríticos	37
3.3	Latossolo Amazônico	41
4	RESULTADOS	43
4.1	Interpretação Dos dados De Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico	45
4.2	Correlações T x Nspt	58
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – Planilha de Sondagem Elétrica Vertical	87

1 INTRODUÇÃO

Atribui-se o nome fundação ao elemento construtivo responsável por transmitir os esforços da estrutura de uma obra ao solo. A transmissão de esforços não deve exceder a capacidade de carga do solo, caso contrário a construção poderá apresentar patologias como recalque e ruptura. Dessa forma se torna fundamental que a geotecnia avalie a capacidade de carga do solo para que as fundações sejam adequadamente implantadas. Para a avaliação do subsolo são necessárias informações geológicas básicas como identificação da litologia, da profundidade do embasamento e a identificação da posição do nível estático do lençol freático (PINTO, 2006; DAS, 2007). Na geotecnia o ensaio de sondagem à percussão (*Standard Penetration Test -SPT*), normatizado no Brasil pela ABNT (2020), é o método tradicionalmente utilizado pelos engenheiros para a investigação da subsuperfície. A quantidade de furos a serem sondados é de no mínimo um furo a cada 200 m² de área a ser construída em um terreno de até 1200 m². Contudo, os dados gerados em ensaios SPT são pontuais e é necessária a execução de vários furos para a espacialização dos dados em superfície, acarretando uma onerosidade para a execução de uma obra (CASTRO et al., 2016). Adicionalmente, a existência de matacões na subsuperfície interfere a interpretação do ensaio, gerando a falsa impressão de que a camada de rocha sã foi atingida. Outros aspectos, como saturação do solo, integridade dos equipamentos e má execução viciosa trazem desvantagens para o SPT, pois interferem diretamente na estimativa do índice de resistência à penetração do solo (N_{spt}), que posteriormente é utilizado no cálculo de fundações (ROCHA et al., 2015).

Com a finalidade de espacializar a informação pontual das sondagens SPT e mapear a subsuperfície com maior detalhe, podemos empregar os métodos geofísicos. Eles determinam as propriedades físicas de cada material do subsolo a partir de medições de campos físicos realizadas em superfície (TELFORD et al., 1990). Dentre os métodos geofísicos mais empregados em conjunto com a geotecnia estão os métodos geoeletricos (BRAGA, 2016). No rol de métodos geoeletricos, a eletrorresistividade e o GPR (*Ground Penetrating Radar*) demonstram ser os métodos mais eficientes na resolução de problemas de engenharia civil, como orientação de escavação de tuneis (SAUCK, 1994; PARKINSON e ÉKES, 2008; XIANG et al., 2013; LALAGUE et al., 2016; PENG et al., 2021; QIN et al., 2021; KARIMINEJAD et al., 2023), correlação de perfis estratigráficos para a execução de fundações e localização de lençóis freáticos para captação de água (GLOAGUEN, 2001;

AL – FARES, 2002; BOWLING et al., 2005; LU E SATO, 2007; LIU et al., 2014; GUETING et al., 2016; FARIAS et al., 2023), determinação da direção ou propagação de uma pluma de contaminação (MAXWELL E SCHMOK, 1995; BRADFORD, 2003; PORSANI et al., 2004; MARCAK E GOLEBIEWSKI, 2006; JOHNSON et al., 2007; MARCAK E GOLEBIEWSKI, 2008; SHAO et al., 2019), avaliação da estabilidade de um terreno e do grau de compactação de uma barragem, aterramento e encostas (XU et al., 2010; PING et al., 2016; LYNNE et al., 2016; ANCHUELA et al., 2018; PORSANI et al., 2019; BIGMAN E DAY, 2022; VASQUES et al., 2022) e avaliação e execução de fundações e estruturas de concreto armado (KANNAN, 1999; TALLINI et al., 2004; HUGENSCHMIDT e MASTRANGELO, 2006; SARIBUDAK, 2012; TOSTI E SLOB, 2015; TOSTI E FERRANTE, 2019; ORTEGA – RAMIREZ et al., 2020). Contudo, para a quantificação da compactação do material em subsuperfície a eletrorresistividade se torna o método mais rápido e econômico, pois a compactação está relacionada diretamente com a porosidade e, conseqüentemente, com a resistividade elétrica ρ de cada camada (ARCHIE, 1942; TREFETHEN, 1968)

A interpretação conjunta entre dados da eletrorresistividade e SPT é justificada pela alta correlação positiva entre a resistência transversal de Dar Zarrouk (T), calculada a partir de ρ , e o índice de resistência à penetração do solo (N_{spt}) (BERGONZONI, 2018; GONÇALVES E BOTELHO, 2018; OLAYINKA et al., 2019; COSTA et al., 2021; BALAMAHESWARI e PREMALATHA, 2023; FARIAS et al., 2023). Esta correlação permite expandir a interpretação pontual sobre litologia e compactação do subsolo para uma área além dos limites onde foram executadas as sondagens. Algumas soluções de problemas geotécnicos utilizando os métodos conjuntamente estão na verificação de contaminantes de aterro sanitário (SCHETTINI, 2016), análise de compactação de solo em trechos de metrô (SEIMETZ et al., 2010) e investigação de perfis da subsuperfície para a determinação de material a ser usado com núcleo de barragem (OH e SUN, 2008).

Sudha et al. (2009) afirma que não há uma relação universal entre ρ ou T e N_{spt} e estas relações devem ser estimadas para cada tipo de ambiente. No Brasil, por exemplo, Gonçalves et al. (2021), calcula a relação $\rho \times N_{spt}$ para solos de massapê em Salvador (BA) com índices de correlação $R^2 > 0,9$, já Braga et al. (1999) conseguiu uma correlação $R^2 < 0,4$ para a Formação Corumbataí em São Paulo. Por outro lado, na Ásia, Gao et al. (2003) e Devi et al. (2017) conseguiram fortes correlações para solos argilosos. Em relação ao Latossolo amazônico, as correlações ainda são escassas. Costa et al. (2021), por exemplo, conseguiu uma correlação de

$R^2 > 0,7$ para a zona oeste de Manaus.

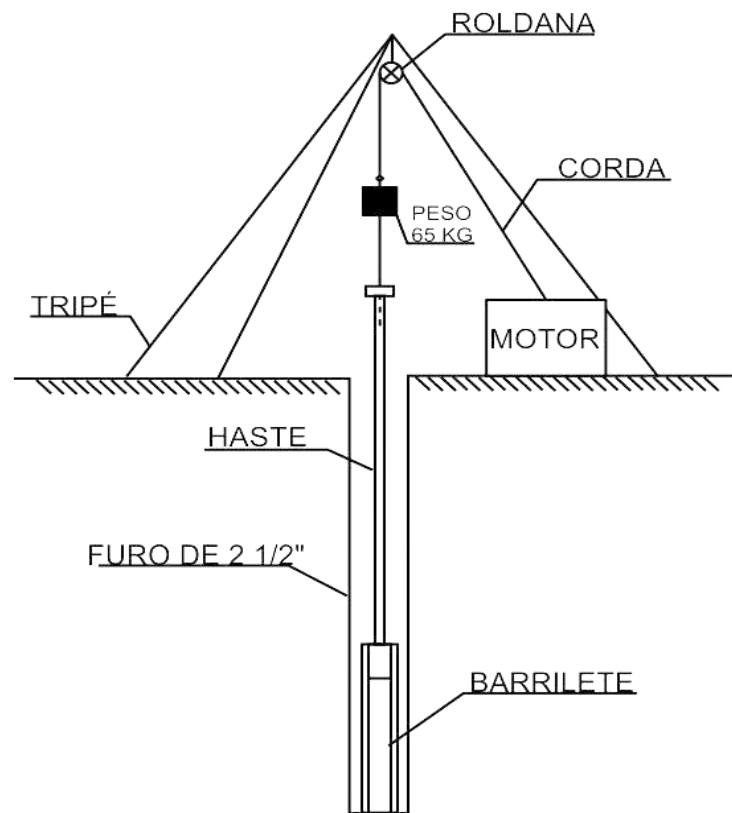
A relação $T \times N_{spt}$ proporciona ao engenheiro melhor conhecimento da capacidade de suporte das camadas da litologia com a qual pretende-se trabalhar, projetando estruturas que economizem o máximo possível em materiais de construção e atenda as solicitações de projeto. Este trabalho propõe novas correlações entre $T \times N_{spt}$ para toda a cidade de Manaus-AM através da estimativa de resistividade vertical e lateral e informações de N_{spt} a partir de boletins de sondagens. O trabalho utilizou dados de 5 Sondagens Elétricas Verticais, 2 Caminhamentos Elétricos e 5 boletins SPT localizados nas zonas centro-sul, oeste e norte da cidade. Os resultados mostraram fortes correlações entre alguns bairros da cidade e fracas correlações entre outros bairros indicando a mudança de litologia e compactação do solo em diferentes pontos. Com estas correlações pudemos estabelecer relações lineares inéditas entre $T \times N_{spt}$ para cada zona da cidade, formando um quadro-guia de equações para obras geotécnicas nos bairros de Manaus.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teste de Sondagem A Percussão (SPT)

Na geotecnia o método mais comum utilizado para a investigação dos solos é o método de sondagem a percussão (*Standard Penetration Test – SPT*). A ABNT (2020) descreve que a sondagem SPT quantifica o valor referente ao número de golpes necessários para cravação de 30 cm do amostrador padrão após os 15 primeiros cm do amostrador penetrar no solo, utilizando-se uma corda de sisal para o levantamento do batedor do amostrador (FIGURA 1).

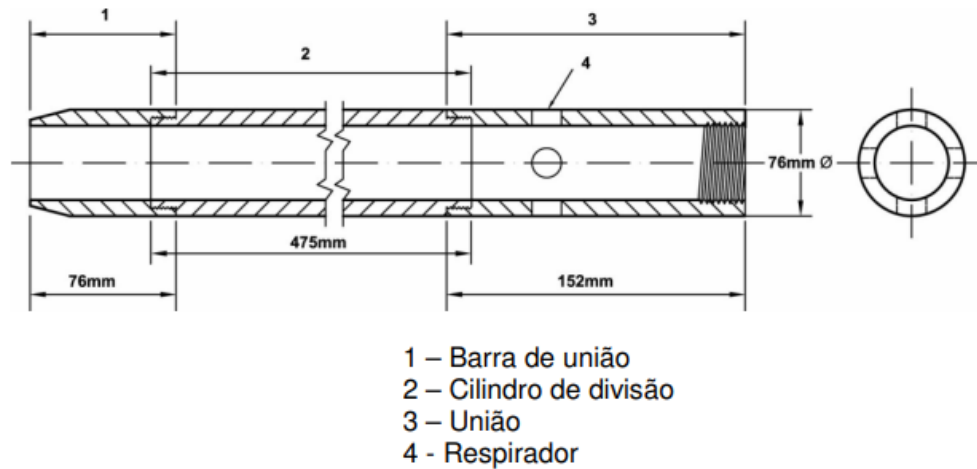
Figura 1 - Esquema de equipamentos utilizados na execução de ensaio de sondagem SPT



Fonte: Acervo de ASPEG (2018).

A execução do método de teste de penetração padrão resume-se na cravação no fundo de uma escavação do amostrador padrão de diâmetro externo de 50mm submetido a queda livre de 750 mm de um peso de 65 kg. Utiliza-se um trépano de lavagem para realizar a escavação por meio do trado e do bombeamento de água. O conjunto amostrador (FIGURA 2) é constituído pela cabeça, corpo e sapata. A parte referente a cabeça apresenta uma saída de drenagem proporcionado a retenção do sedimento dentro do corpo do amostrado o qual é bipartido para a posterior caracterização do sedimento em laboratório. Assim como a cabeça do amostrador, as duas hastes não devem estar empenadas, pois o empeno destas poderá resultar na transmissão de parte da energia da queda do martelo para a parede de perfuração acarretando no aumento do número necessário de golpes para a cravação do amostrador. A quantidade de golpes necessários para a cravação de 30cm após os 15 cm iniciais do amostrador denomina-se número SPT ou N_{spt} (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

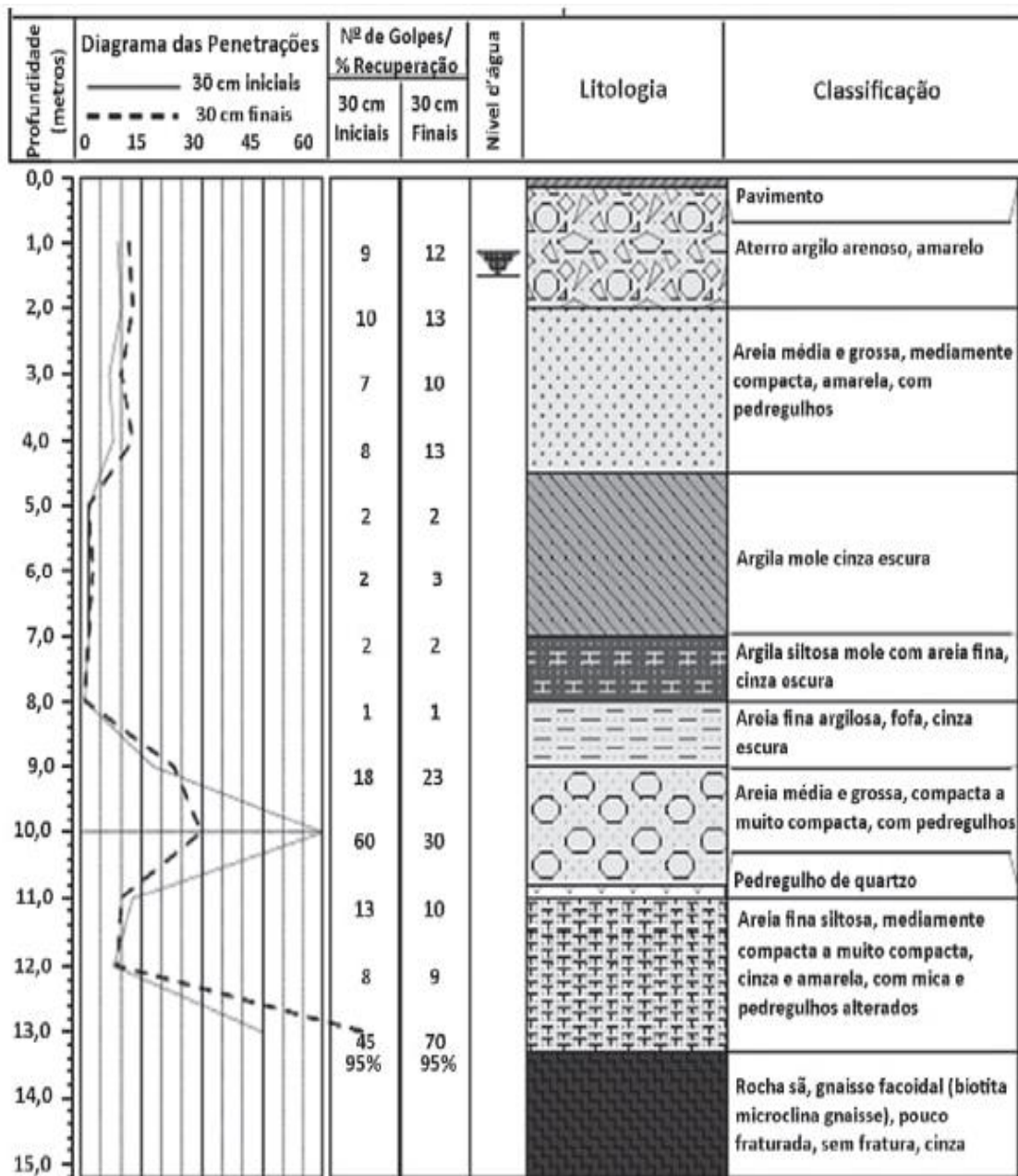
Figura 2 - Amostrador do tipo Terzaghi



Fonte: Oz (2024).

Devido a praticidade, a experiência e ao emprego difundido no mercado, o ensaio sondagem a percussão é o meio mais usual para a realização da investigação do solo na engenharia civil. Este é um ensaio de campo rápido e permite a determinação da coluna estratigráfica (FIGURA 3), o nível estático d'água e o estado de compactação do solo. Este método, considerado econômico, é capaz de fornecer a densidade dos solos granulares e a consistência dos sedimentos coesos. Estas informações em conjunto com os valores N_{spt} são fundamentais para o dimensionamento de fundações rasas e profundas. (CASTRO et al., 2016). Contudo, a presença de matacões no subsolo influencia diretamente o teste de sondagem a percussão, pois poderá levar à errada compreensão de que a camada de rocha impenetrável foi alcançada. Além disso, procedimentos errôneos de calibração do equipamento e falta de conservação dos acessórios criam medições viciosas dos valores N_{spt} (ROCHA et al., 2015).

Figura 3 - Exemplo de boletim de ensaio de sondagem SPT com os elementos profundidade, Nspt, nível d'água, litologia e classificação de compactação



Fonte: Pereira (2018).

De acordo com AECWEB (2015), o preço médio do ensaio de sondagem a percussão é barato comparado ao valor total de uma obra de milhões de reais. Ressalta-se a importância do ensaio como meio fundamental para o conhecimento da capacidade de suporte do solo de maneira a projetar fundações que economizem o máximo de material possível e que sejam capazes de suportar os esforços da edificação e transmiti-los à superfície. A implementação incorreta de fundações leva a maiores gastos para a realização de reforços estruturais durante a construção da edificação e após sua construção.

A norma ABNT (2020) apresenta uma tabela que associa os valores de SPT com o estado de consistência do solo. Este ensaio permite a coleta de pequena parcela do solo para análise tátil e visual e ensaio de granulometria, porém não em quantidade suficiente para a realização de outros ensaios mecânicos que indiquem a resistência do material, como ensaio de cisalhamento direto (ASTM, 2012). O valor N_{spt} é correlacionado com a consistência de um solo (TABELA 1) baseada na resistência a compressão não confinada, q_u , e pressão atmosférica, P_a (KULHAWY e MAYNE, 1990) dada por

$$\frac{q_u}{P_a} = 0,58 N_{spt}^{0,72}. \quad (2.1)$$

Tabela 1 - Correlação aproximada do número de golpes SPT com a consistência de um solo argiloso

Nspt	Consistência	q_u (kN/m ²)	q_u (lb/ft ²)
2	Muito Mole	25	500
4	Mole	50	1000
8	Moderadamente rija	100	2000
16	Rija	200	4000
32	Muito rija	400	8000
>32	Dura	>400	>8000

Fonte: Das (2007).

2.2 Eletorresistividade

De acordo com a DNER (1995) o método geofísico da eletorresistividade consiste no cálculo da resistividade do material em subsuperfície a partir da leitura da voltagem decorrente da passagem de uma corrente elétrica. Cada material geológico possui uma resistividade diferente conforme suas características mineralógicas, assim é possível estimar a resistividade de diversos materiais em subsuperfície através da leitura de diferentes potenciais elétricos ao qual eles são submetidos quando uma corrente elétrica é injetada. A resistência de um material qualquer é expressa por (BRAGA, 2016)

$$R = \rho \left(\frac{L}{S} \right), \quad (2.2)$$

em que L é o comprimento do material em metros (FIGURA 4), S é a área em m^2 , ρ é a resistividade elétrica dada em Ωm e R é expresso em Ω . De acordo com a Lei de Ohm temos a relação

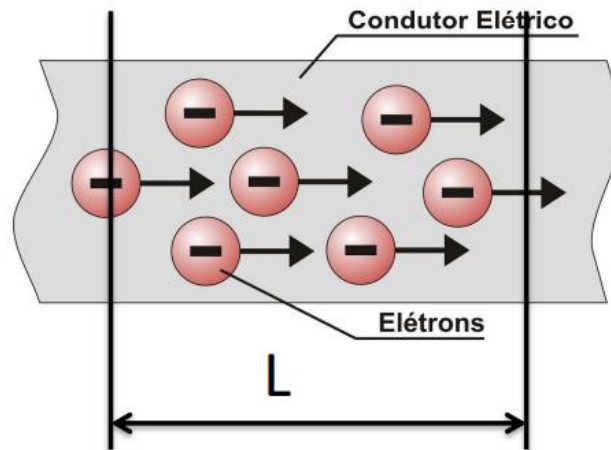
$$\Delta V = I \cdot R, \quad (2.3)$$

em que I é a intensidade de corrente dada em Ampères (A) e ΔV é a diferença de potencial elétrico dada em volts (V). A partir das eq. (2.2) e (2.3) deduzimos a expressão da resistividade dada por

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (2.4)$$

em que K é denominado de fator geométrico.

Figura 4 - Esquema passagem de corrente elétrica e resistência em função de um comprimento L



Fonte: Simões (2019).

A resistividade é um parâmetro físico que consegue identificar estruturas como falhas e saturação em sedimentos e rochas. A resistividade de um sedimento ou material rochoso varia conforme a disposição dos vazios e o preenchimento destes, e é inversamente proporcional ao nível de saturação, a conectividade e a quantidade de sais dissolvidos nos poros de uma rocha (NERY, 2013). As propriedades elétricas de sedimentos e rochas possuem muita variação, geralmente a capacidade de condução de corrente elétrica de materiais

consolidados e inconsolidados é diretamente proporcional ao tamanho, volume e distribuição dos vazios e o fluido que os preenche. Ainda que estes vazios permitam a passagem da corrente elétrica corroborando para a existência natural de corrente elétrica no meio, é necessário que uma corrente elétrica artificial seja induzida ao subsolo para a investigação da subsuperfície (TREFETHEN, 1968). A subsuperfície é anisotrópica, portanto a resistividade muda pontualmente em todas as direções espaciais. Assim o método não calcula a resistividade real das camadas, mas uma resistividade aparente ρ_a , que é a média ponderada das resistividades reais de várias camadas levando em consideração que elas são homogêneas (ROCHA et al. 2015). Deste modo adaptamos a eq. (2.4) para

$$\rho_a = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right). \quad (2.5)$$

A eletrorresistividade faz uso de eletrodos pontuais ou contatos de linha longa para injetar uma corrente artificial ao subsolo. Dessa forma é lido diferença de potencial nos demais eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente elétrica possibilitando a obtenção da resistividade aparente dos materiais da subsuperfície (TELFORD et al., 1990). Apesar de uma logística de fácil implementação, o método é sensível a ruídos superficiais causados pela dificuldade em cravar vários eletrodos e estender fios longo através de locais acidentados e com presença de raízes. O método é mais eficaz quando as camadas da subsuperfície encontram-se bem-dispostas horizontalmente e pouco inclinadas. Neste modo de prospecção a profundidade de leitura dos dados depende da disposição dos eletrodos de injeção e recepção de corrente elétrica, pois a medida que aumenta o espaço entre os eletrodos receptores de corrente mais profundo a corrente penetra no subsolo.

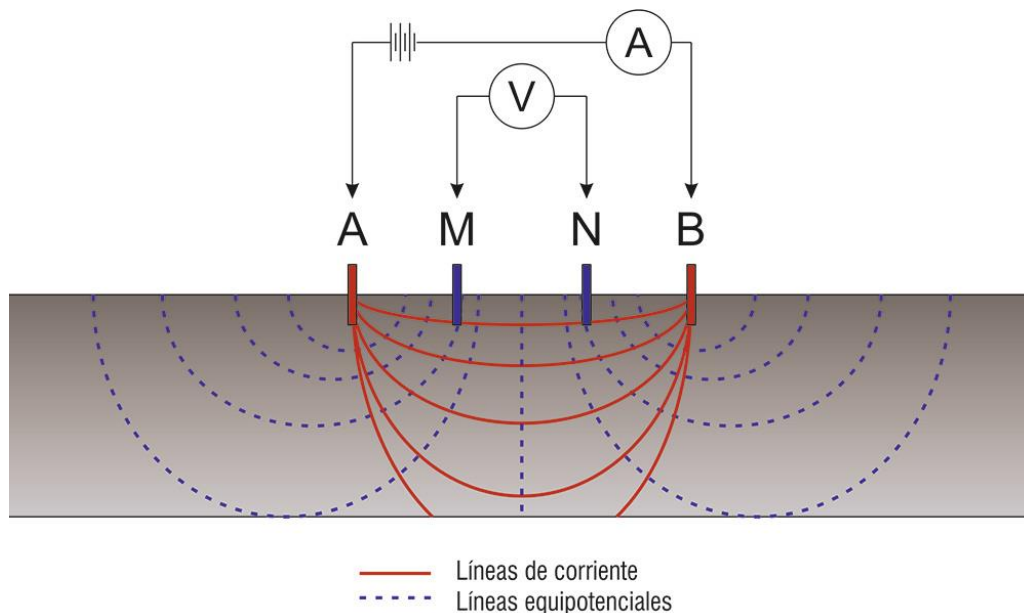
A corrente elétrica propaga-se por meio eletrônico, em que a passagem dos elétrons pela matriz de uma rocha onde o nível de impureza e a disposição dos minerais determinará a resistência a passagem de corrente, e por meio iônico onde a movimentação dos íons nos poros, fissura e sedimentos inconsolidados proporciona a propagação da corrente elétrica. Fatores como nível de saturação, número e disposição de vazios, nível de compactação, metamorfismo, efeitos tectônicos, textura e resistividade de minerais e líquidos e gases que preenchem os poros influenciam diretamente no meio eletrônico e iônico de passagem de corrente elétrica. A combinação destes modos de passagem de corrente e fatores determinam a resistividade das rochas as quais em sua grande parte possuem como composição elementos mal condutores como carbonatos e silicatos, contudo a presença de água influencia e modifica a capacidade de condução da corrente no meio rochoso. Valores

de resistividade real em materiais saturados podem ser apresentados como ampla variação de baixa magnitude ao contrário dos valores relacionados a materiais secos onde há grande diferença da ordem de 100 a 10.000 Ωm dificultando a interpretação litológica (BRAGA, 2016).

2.2.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Uma das técnicas do método da eletrorresistividade é a sondagem elétrica vertical (SEV), que obtém valores de resistividade real verticalmente, sem levar em consideração variação lateral. Para a estimativa da resistividade é necessária a leitura dos valores de voltagem entre os eletrodos M e N através da injeção de corrente a partir dos eletrodos A e B (FIGURA 5). A sondagem elétrica vertical pode ser empregada para o estudo de um perfil geológico, definição do topo da rocha sã e do nível de profundidade de um aquífero (SOUZA e GANDOLFO, 2021).

Figura 5 - Disposição dos eletrodos de corrente A e B e de potencial M e N na SEV



Fonte: Acervo de Everest Geophysics (2024).

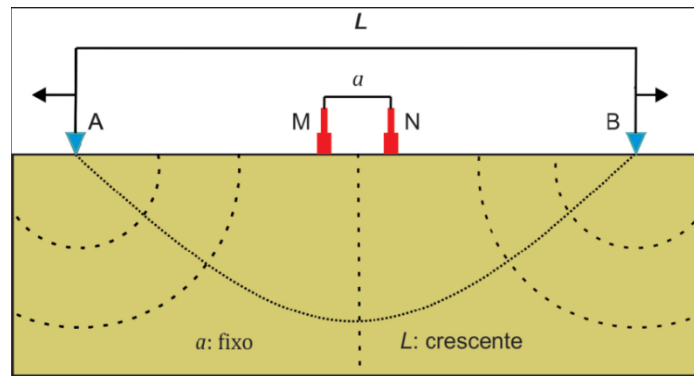
O arranjo de eletrodos mais empregado em sondagens elétricas verticais é o Schlumberger. Este arranjo movimenta somente os eletrodos AB para cada leitura de

voltagem, mantendo fixos os eletrodos MN (FIGURA 6). Deste modo as leituras se tornam menos suscetíveis a ruídos e a erros de interpretação em ambientes heterogêneos. A resistividade aparente ρ_a para o arranjo Schlumberger é calculada pela eq. (2.5) com fator geométrico definido como

$$K = \frac{\pi(AM \cdot AN)}{MN}, \quad (2.6)$$

em que AM, AN e MN são as distâncias respectivas entre os eletrodos A e M, A e N e M e N.

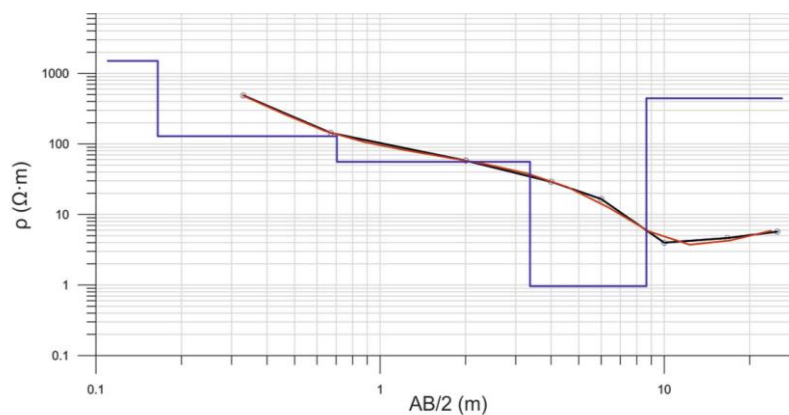
Figura 6 - Arranjo Schlumberger para SEV. A distância L entre os eletrodos AB aumenta enquanto a distância a entre os eletrodos MN é constante.



Fonte: Adaptado de Couto Junior e Antonio (2015).

Os resultados do ensaio são interpretados por meio da formação de curvas entre resistividade aparente e o comprimento AB/2 em escala bilogarítima (FIGURA 7). O emprego da SEV possibilita a espacialização de informações em uma região de forma precisa, veloz, econômica, com praticidade na definição da profundidade de investigação e é minimamente invasiva.

Figura 7 - Gráfico Distancia AB/2 versus Resistividade aparente

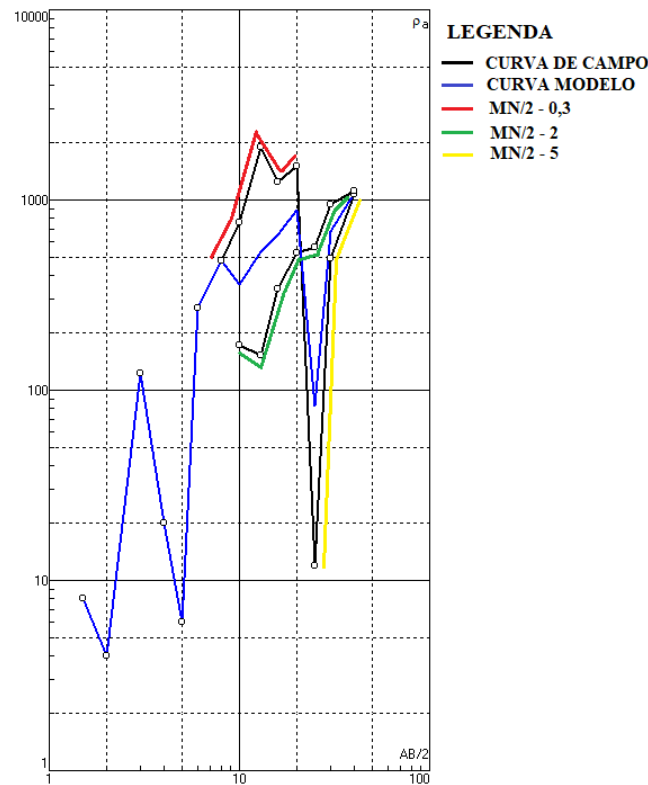


Fonte: Acervo de Everest Geophysics (2024).

Por outro lado, a sondagem elétrica vertical também é restringida quanto ao espaço necessário para a abertura dos eletrodos de corrente a fim de que o ensaio atinja a profundidade de investigação desejada, o que torna esta técnica de difícil execução em ambientes urbanos. A profundidade máxima de investigação Z é definida pela relação $Z = AB/4$ e o limite do espaçamento entre os eletrodos MN para o arranjo Schlumberger é definido como $MN \leq AB/5$. Já o centro da SEV deve ser escolhido em local distante de tubulações e canalizações próximas aos eletrodos M e N e fora do alcance da linha de expansão AMNB, pois a influência destas estruturas próximas podem acarretar em distorções no campo elétrico influenciando em boa parte dos dados gerados na curva de campo. A partir do centro da SEV duas trenas em sentidos opostos devem ser dispostas ao longo da linha AMNB cujas marcações auxiliam na disposição dos eletrodos que deverão ser bem cravados no solo de maneira a evitar solos fofos e raízes a fim de que a corrente elétrica emitida não perca a intensidade (BRAGA, 2016).

Durante a aquisição dos dados em campo deve-se observar quedas nos valores de potencial, a resistência do contato solo eletrodo e fugas de corrente para assegurar a qualidade dos dados de campo. O aumento da distância entre os eletrodos AB provoca a rápida redução do valor do potencial da corrente, que ao passar por camadas saturadas de baixa resistividade também tem seu potencial bem reduzido podendo gerar dados ruidosos. Para aumentar o potencial induzido pela corrente pode-se aumentar a intensidade desta ou executar a operação de embreagem. O aumento da intensidade da corrente está limitado a capacidade do resistivímetro e aos limites seguros de operação do ensaio, já a operação de embreagem consiste em aumentar o espaçamento dos eletrodos M e N de tal forma que a voltagem lida é acentuada (FIGURA 8).

Figura 8 - Curva de SEV para vários valores MN diferentes. A embreagem garante a continuidade da curva evitando valores errôneos devido a valores altos de aberturas AB



Fonte: Autor.

Após a aquisição dos dados de campo, as resistividades aparentes calculadas devem passar pela etapa de processamento para a elaboração do modelo geoeletrico final. No modelo geoeletrico final a resistividade aparente será transformada em uma seção geoeletrica com resistividade real e com espessura associada a cada camada. Os dados de resistividade real são estimados através de inversão por polimento de mediana através do algoritmo de sondagem elétrica total (BOBATCHEV, 1997). Para minimizar a ambiguidade dos dados (HADAMARD, 1942) é necessário que a interpretação do modelo geoeletrico seja vinculada com as informações geológicas a priori, que podem ser adquiridas tanto por furos de sondagens quanto por outros métodos geofísicos ou geológicos de superfície.

2.2.2 Caminhamento Elétrico (CE)

O caminhamento elétrico é uma técnica do método de eletroresistividade que, assim como a sondagem elétrica vertical, é executada através da transmissão artificial de corrente elétrica ao subsolo pelos eletrodos AB gerando uma diferença de potencial nos eletrodos

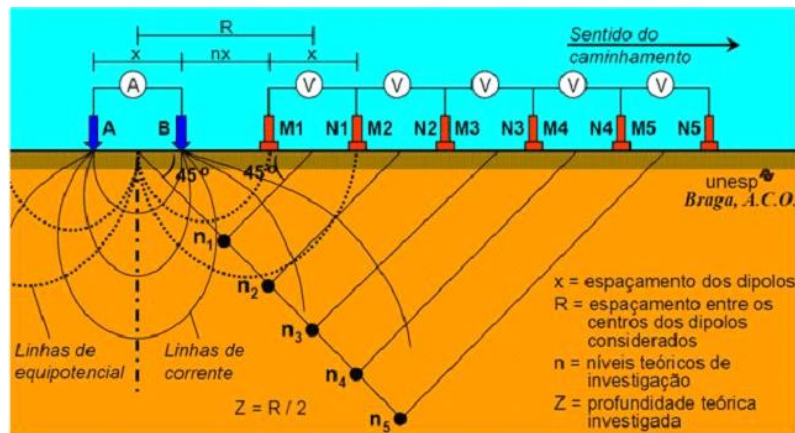
MN. Ao contrário da SEV, o CE permite projetar os dados de campo, obtidos para vários pontos ao longo de uma direção, em uma seção geoeletrica 2D onde a resistividade aparente varia lateralmente e em profundidade. Assim o caminhamento possibilita que várias seções geoeletricas unidimensionais em sequência formem juntas um modelo geoeletrico bidimensional. O caminhamento elétrico é usualmente utilizado na exploração mineral, investigação de falhamentos, determinação de topo rochoso e na localização de aquíferos fraturados e/ou confinados (KEAREY et al., 2009).

No CE, o arranjo dipolo-dipolo é o mais usual pois permite que o operador realize o a aquisição mantendo os eletrodos AB e MN alinhados na mesma direção com espaçamento constante. No arranjo dipolo-dipolo os eletrodos AB se mantêm fixos enquanto o par MN avança até o final do perfil. Em seguida o par AB se movimenta num deslocamento constante e novamente somente o par MN avança. A aquisição termina quando o par AB se movimenta até o final do perfil. À medida que os eletrodos MN avançam enquanto os eletrodos AB ficam fixos, o nível de investigação aumenta gerando cálculos de resistividade aparente em várias profundidades de investigação. Em campo, pode-se definir a profundidade de investigação Z para cada nível em função da distância R entre os centros dos dipolos AB e MN, assim a profundidade teórica é dada por $Z=R/4$. O perfil de caminhamento elétrico é plotado dispondo a resistividade aparente lida a determinada profundidade Z em uma projeção de 45°, começando do centro dos dipolos AB e MN até o ponto médio entre eles (FIGURA 9). Para o arranjo dipolo – dipolo a resistividade aparente ρ_a é definida pela eq. (2.5), e o fator geométrico K é definido como

$$K = 2\pi x \left(\frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \right), \quad (2.7)$$

em que x é a distância constante entre os eletrodos A e B e M e N e n é o nível de profundidade teórica a partir da distância dos eletrodos MN em relação aos eletrodos AB (SOUZA e GANDOLFO, 2021).

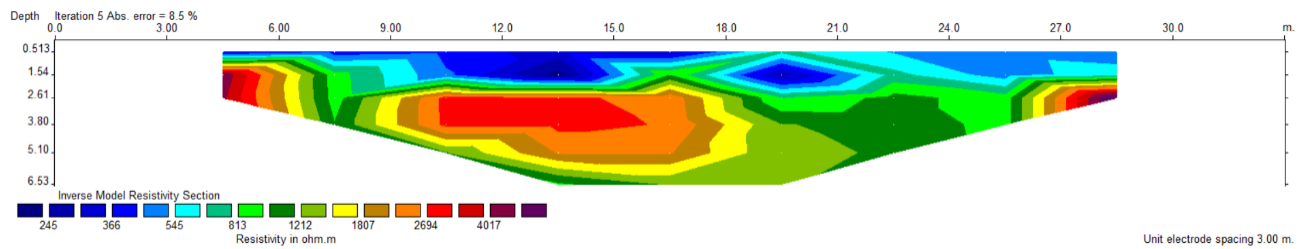
Figura 9 - Esquema de aquisição num CE com arranjo dipolo-dipolo. AB são os eletrodos e corrente e MN são os eletrodos de potencial com espaçamento x que se movimentam n vezes até o final do perfil



Fonte: Braga (2016).

O nível de investigação é definido de acordo com a profundidade em que se deseja investigar, já que o espaçamento entre os dipolos é determinado conforme a quantidade desejada de caminhamentos de MN a fim de que se obtenham uma pseudoseção representativa total do ambiente. Na prática, o mínimo recomendado é que este arranjo seja executado com 5 níveis. Para local poços artesianos recomenda-se empregar espaçamento de 40 m com pelo menos 5 níveis de investigação e para identificação de plumas de contaminação recomenda-se utilizar espaçamento de 20 m com pelo menos 5 níveis de investigação. Durante a execução do caminhamento elétrico deve-se atentar para a qualidade da leitura dos valores de diferença de potencial que normalmente diminuem a medida que a profundidade de investigação aumenta. Embora seu emprego seja difícil em ambientes urbanos devido a necessidades de amplo espaço para a cravação de eletrodos, que devem estar em contato com o solo, o caminhamento elétrico é pouco suscetível a ruídos e realiza boas leituras em os ambientes geológicos em razão da grande variação de resistividade aparente dos materiais da subsuperfície (BRAGA, 2016).

Após a aquisição, os valores de resistividade real são estimados a partir dos valores de resistividade aparente. Esta estimativa é calculada através do método de inversão dos mínimos quadrados com vínculo de suavidade (BINLEY e SLATER, 2020). Os dados são apresentados em formato de seção com linhas de isovalores de resistividade real representando cada nível (FIGURA 10). Uma seção com valores realísticos apresenta um erro médio quadrático (*Root Mean Square -RMS*) de ajuste menor de 10%, contudo valores entre 10% e 15% são aceitáveis.

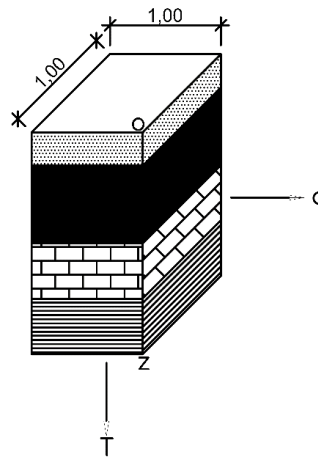
Figura 10 - Exemplo de apresentação de dados invertidos de CE

Fonte: Autor.

2.3 Resistência Transversal

Na prospecção geoeletrica há finas camadas de difícil diferenciação que modificam a microanisotropia do meio. Por meio da teoria fundamental da microanisotropia (MAILLET, 1947), pode-se estabelecer um princípio de equivalência entre camadas planas de um perfil geológico. Considera-se que uma camada de espessura h , condutividade média σ e anisotropia θ seja equivalente a uma camada isotrópica de espessura $\theta \times h$ e condutividade σ . Dentro da camada anisotrópica o campo elétrico transversal e a densidade longitudinal da corrente são ambos θ vezes maiores do que dentro da camada isotrópica equivalente. Na relação entre uma camada micro anisotrópica e a camada isotrópica correspondente o produto T da espessura pela resistividade transversal e o produto C da espessura pela condutividade longitudinal permanecem inalterados. Assim, estes dois produtos são capazes de caracterizar um leito ou uma série geológica ainda melhor e mais convenientemente do que sua espessura, sua condutividade média e sua anisotropia. Estes produtos são definidos como variáveis de Dar Zarrouk: resistência unitária transversal (T) e condutância unitária longitudinal (C). Considerando uma coluna geológica (FIGURA 11), T mede a resistência às linhas de corrente perpendiculares às camadas, e C é a condutância oferecida a essas linhas de corrente (MAILLET, 1947).

Figura 11 - Ilustração do conceito de Resistência Transversal T e da Condutância unitária Longitudinal C



Fonte: Modificado de Mailliet (1947).

Para uma seção geoeletrica com m camadas, a Resistência Transversal da i -ésima camada é obtida por meio da expressão

$$T_i = \rho_i h_i, \quad (2.8)$$

em que ρ_i e h_i são a resistividade real e a espessura da i -ésima camada. Para toda seção geoeletrica a Resistência Transversal Total é obtida por

$$T = \sum_{i=1}^m \rho_i h_i. \quad (2.9)$$

2.4 Correlação entre Resistência Transversal T e Índice de Resistência à Penetração Nspt na literatura

Na literatura a correlação T x Nspt se mostrou positiva e diretamente proporcional com alto coeficiente de determinação. Schettini (2016) investigou as condições do aterro sanitário da cidade de São Carlos por meio da análise de dados de eletrorresistividade e sondagem a percussão SPT encontrando boa correlação entre o perfil de sondagem SPT com os perfis de sondagens elétricas verticais.

Balamaheswari e Premalatha (2023) levantaram dados geotécnicos e geofísicos de 3 locais para estudar a correlação entre a resistividade aparente e o número de golpes SPT.

O primeiro local representa um perfil formado por uma camada arenosa bem graduada de 4 metros de espessura seguida por uma camada argilo arenosa de 5 metros de espessura localizada acima de uma rocha dura, cuja correlação obtida $SPT = 0,1781\rho - 0,3258$ foi linearmente positiva com coeficiente de determinação de **0,89**. O segundo local foi representado por um perfil constituído por uma camada arenosa e siltosa bem selecionada de 6,5 m, uma camada de 3m de espessura de argila arenosa seguida por uma camada de cascalho mal selecionada com 5 metros de espessura localizada acima de rocha dura, cuja correlação obtida fora negativa $SPT = -0,0525\rho + 19,046$ e de coeficiente de determinação **0,67**. O terceiro local possui em seu perfil do subsolo 6,5 m de espesura de solo arenoso bem selecionado com fnos teores de silte seguido por 7,5 m de espessra de argila arenosa localizada sobre rocha dura, cuja correlação obtida foi $SPT = -0,0641\rho + 16,186$ e de coeficiente de determinação **0,17**. O segundo e terceiro locais apresentaram uma correção linear negativa com queda no coeficiente determinação em relação ao primeiro local devido a transição entre os sedimentos do perfil do subsolo e a presença de sedimento arenoso com silte na primeira camada.

Oh e Sun (2008) também fizeram uso da correlação $T \times N_{spt}$ obtidos da prospecção de uma barragem de aterro de tipo núcleo central para prevenir infiltração. Altos valores de resistividade foram relacionados a baixos valores de SPT indicando a presença de canalizações e baixo teor de argila elevando o valor de resistividade. Altos valores de SPT e baixos valores de resistividade indicaram a existência de uma zona de filtro com enchimento rochoso. Assim, os autores chegaram à conclusão de que o material a ser empregado como núcleo da barragem deva ter baixa resistividade a fim de que a infiltração seja impedida.

No estudo de Gonçalves e Botelho (2018) foi empregada a sondagem elétrica vertical juntamente com a sondagem a percussão SPT na região de aterro na via expressa BA-093. As camadas com baixa capacidade de suporte (baixo valor N_{spt}) tendiam a apresentar também menores valores de resistividade aparente assim como também da mesma forma inversa, os sedimentos com altos valores de N_{spt} tendiam a apresentar valores de resistividade elétrica, constando-se boa correlação entre os dois métodos.

Em outro estudo também realizado na Bahia, Gonçalves et al. (2019) fizeram a correlação entre os valores de $T \times N_{spt}$ obtidos de 13 prospecções realizadas em 3 locais de encosta de diferentes características de solos tropicais. Na área 1, para o subsolo é constituído por aterro de silte argiloso, camada de areia fina a média com pedregulhos, camada de argila siltosa com areia fina e materia orgânica, e por fim uma camada de silte arenoso com

pedregulho. Os autores obtiveram correlação linearmente positiva $SPT = 0,093\rho + 2,75$ com coeficiente de determinação **0,97**. Ainda na área 1, há uma zona de mangue onde o estudo detectou a presença de água salina abaixo da camada de aterro, nesta zona de mangue a correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,01\rho + 7,08$ com coeficiente de determinação **0,54** em virtude da transição entre os sedimentos de aterro e a camada de argila mole saturada abaixo do nível freático. Na área 2, para a porção superior de um talude, o subsolo é constituído por camada de aterro de silte argiloso com areia média e pedregulho, seguido por silte arenoso com argila e por alterações de folhelho. Nesta área foi obtida correlação linearmente negativa $SPT = -0,24\rho + 29,11$ com coeficiente de determinação **0,71** devido a presença do folhelho cuja superfície apresenta minerais trilaminares de textura argilosa que facilitam a movimentação da corrente elétrica reduzindo a resistividade. Para a parte inferior do talude, o subsolo é formado por silte arenoso com argila, seguida por camada massapê de argila siltosa, silte arenoso com fragmentos de rocha alterada, e por argila siltosa sobreposto a silte argiloso com areia fina. A correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,25\rho - 7,7$ com coeficiente de determinação **0,98**. Na área 3, onde a subsuperfície é constituída por aterro de silte arenoso com pedregulhos, seguido de silte arenoso com alteração de rocha, foi obtida correlação linearmente positiva $SPT = +0,04\rho + 1,94$ com coeficiente de determinação **0,97**.

De acordo com Sudha et al (2009) as correlações lineares são próprias à cada localidade e o coeficiente de determinação está diretamente controlado pela mudança da geologia da subsuperfície. Os autores correlacionam $T \times N_{spt}$ em Uttar Pradesh na Índia, sendo a proporção de argila o responsável pela diferença de inclinação entre as curvas de correlação para as regiões de Jhansi e Aligarh. Em Aligarh, a subsuperfície apresenta primeira camada siltosa insaturada com traços de sedimento argiloso e pedregulhos seguida por camada siltosa saturada. A correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,028T + 10,909$ com coeficiente de determinação **0,974**. Já em Jhansi, há maior predominância de matéria fina na subsuperfície, com maior teor de argila na camada saturada e insaturada. A correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,102T + 4,922$ com coeficiente de determinação **0,975**.

Os estudos de Olayinka et al (2019) foram realizados na Universidade Ahmadu Bello, do Estado de Kaduna na Nigéria, onde as rochas pré-cambrianas do embasamento são constituídas por granitos, gnaisses e xistos. Foi realizada correlação entre o número de golpes SPT e a Resistência Transversal entre dois pontos de investigação próximos entre si. No

ponto 1, o subsolo é constituído por camada de argila arenosa laterítica sobreposta a camada de areia argilosa laterítica e a lateritos. A correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,0776T - 16,917$ com coeficiente de determinação **0,8003**. No ponto 2, litologia é a mesma com a diferença da última camada descrita como rocha intemperizada laterítica concreconária. A correlação obtida foi linearmente positiva $SPT = 0,0215T + 11,595$ com coeficiente de determinação **0,6892**.

Já o trabalho de Costa et al (2021) foi realizado na Comunidade Parque Richuelo do Bairro Tarumã, Zona oeste da Cidade de Manaus correlacionando dados de Resistência Transversal de três sondagens elétricas verticais com duas sondagens à percussão SPT. No primeiro furo de sondagem o subsolo é descrito por uma camada de aterro de material orgânico sobreposta a uma camada de areia média a fina argilosa e a uma camada de areia média a fina, onde está localizado o nível freático. Próximo a este furo foram executadas duas SEVs e obtidas correlações linearmente positivas $SPT = 0,0013T + 1,0012$ e $SPT = 0,0002T + 2,8213$ com coeficientes de determinação **0,793** e **0,907** respectivamente. No segundo furo de sondagem o subsolo é descrito por uma camada de aterro de material orgânico sobreposta a uma camada de areia grossa a médio argilosa, onde está localizado o nível freático seguida. Após a camada anterior, os autores descrevem uma camada de areia fina à média sobreposta a uma camada de areia fina a média siltosa e uma camada de silte pouco arenoso. Próximo a este furo foi executada outra SEV e obtida correlação foi linearmente negativa $SPT = -0,0001T + 4,1562$ com coeficiente de determinação **0,7605**. Para este segundo furo de sondagem os sedimentos existentes no subsolo apresentaram maior composição de silte e areia e menor influência do aterro na composição do solo natural.

Costa et al. (2021) definiram o subsolo investigado como um sedimento fofo e pouco compacto preponderantemente arenoso e siltoso e com a existência do nível de aquífero próximo a superfície entre 1,8m a 2 m de profundidade, o que define a região impraticável para a implementação de obras civis. No local, os autores identificaram várias manifestações patológicas como trincas e fissuras nas edificações da comunidade que se expande irregularmente desprovida de infraestrutura e saneamento. As sondagens elétricas verticais possibilitaram melhor prospecção e interpretação das camadas de sedimentos propiciando uma alta correlação entre os dados de $T \times N_{spt}$. Costa et al (2021) concluem que o emprego da sondagem elétrica vertical aliada a sondagem a percussão SPT é eficiente para a correta interpretação da subsuperfície e como base para o correto dimensionamento

de projetos geotécnicos a serem implementados na região amazônica.

2.5 Equipamentos e Softwares

Os ensaios de sondagem elétrica vertical foram realizados com um resistivímetro Tectrol de modelo TDC 1000/12R12A (FIGURA 12). Os caminhamentos elétricos foram realizados utilizando um resistivímetro de modelo IRIS SYSCAL KID (FIGURA 13). Para anotação das leituras de SEV utilizamos uma tabela que contém a relação entre os espaçamentos AB/2 e MN/2 e o valor direto de K, e para anotação das leituras de CE utilizamos uma tabela com a localização dos eletrodos A, B, M e N e seus respectivos K para cada nível. (APÊNDICE A).

Figura 12 - Resistivímetro Tectrol e eletrodos AB e MN em arranjo Schlumberger



Fonte: Acervo de Coltan Jr. (2023).

Figura 13 - Resistivímetro SYSCAL KID em arranjo dipolo-dipolo



Fonte: Autor

Utilizamos o software IPI2WIN v. 3.0.1 para a inversão de dados de SEV e o software RES2DINV v. 3.4 para inversão de dados de CE. Para a inversão de SEV, definimos o arranjo em Schlumberger e inserimos as informações dos espaçamentos $AB/2$, $MN/2$ e ρ_a . Em seguida realizamos os ajustes de curva no software aproximando os pontos os mais próximos possíveis da curva de tendência dos resultados a fim de obter um erro RMS menor que 10%. O software gera uma tabela com o número de camada, espessura de cada camada e a resistividade real correspondente. Para inversão de CE, carregamos os dados com as coordenadas AB , MN e ρ_a e executamos a inversão por mínimos quadrados com vínculo de suavidade até conseguirmos um erro RMS de ajuste menor que 15%.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Bacia do Amazonas

Abrangendo partes dos estados do Amazonas e do Pará e com área de 500.000 km², a Bacia do Amazonas está localizada entre os crátons das Guianas ao norte e o do Brasil Central ao sul. Seus sedimentos do Fanerozóico desenvolveram-se sobre rochas

metamórficas e graníticas do Proterozoico (WANDERLEY et al., 2005). O embasamento Pré-Cambriano da Bacia do Amazonas é composto por granitos – greenstones, cinturões de alto grau metamórfico e baixos deposicionais. Sua formação pode ser apontada como originada na zona de alívio na direção norte sul resultante da dispersão de esforços de compressão na direção leste oeste da vinculação da Faixa Móvel Araguaia Tocantins à Orogenia Brasileira Pan – Africana no fim do ciclo Brasileiro. Adiante, a bacia foi procedida por resfriamento de massa magmáticas originando a subsidência regional e a formação de uma sinéclise intracontinental.

A estratigrafia da Bacia do Amazonas se desenvolveu em duas megassequências de primeira ordem que constituem 5.000 m de rochas sedimentares e cristalinas: sequência Paleozoica de rochas sedimentares com várias intrusões de diques e soleiras de diabásio Mesozoico, e sequência Mesozoico – Cenozoico sedimentar (FIGURA 14). A primeira é subdividida em quatro sequências de segunda ordem delimitadas por quebra de sedimentação resultante de movimentos tectônicos nas bordas da Placa Gondwânica: Ordovício – devoniana, Devono – Tournaisiana, Neoviseana e Pensilvaniano – Permiana (LOUREIRO et al., 2021).

A sequência Ordovício – Devoniana dá origem ao Grupo Trombetas. Este é constituído pelas seguintes formações: Autás–Mirim composta por arenitos e folhelhos neríticos neo-ordovicianos, Nhamundá formada por arenitos neríticos e depósitos glaciogênicos eosilurianos, Pitinga (folhelhos e diamictitos silurianos), Manacapuru (arenitos, pelitos neríticos neossilurianos-eodevonianos) e Jatapu (marinhos parálicos litorâneos eodevonianos) (MELO e LOBOZIAK, 2003).

A sequência Devono – Tournaisiana é composta pelos grupos Urupadi e Curuá. O grupo Urupadi abrange as Formações Maecuru (arenitos e pelitos neríticos a deltaicos) e Ererê de (siltitos, folhelhos e arenitos neríticos, parálicos). Já o grupo Curuá possui as Formações Barreirinha (folhelhos negros, físseis, siltitos e arenitos finos), Curiri (diamictitos, folhelhos e siltitos com dropstones e arenitos com formas lobadas e acanaladas) e Oriximiná, alternando entre arenitos e siltitos (CAPUTO, 1984).

Já a sequência Neoviseana é composta pela formação Faro formada por arenitos argilosos e bioturbados e pelitos (MELO e LOBOZIAK, 2003). Por fim, a sequência Pensilvaniano – Permiana é constituída pelo Grupo Tapajós, o qual possui as seguintes Formações: Monte Alegre (arenitos eólicos e wadis, siltitos e folhelhos de interduna e lagos), Itaituba (folhelhos, carbonatos e anidritas de fácies lagunar e marinho raso), Nova Olinda (folhelhos, carbonatos, calcários, anidritas e halitas de inframaré e planícies de sabkha) e

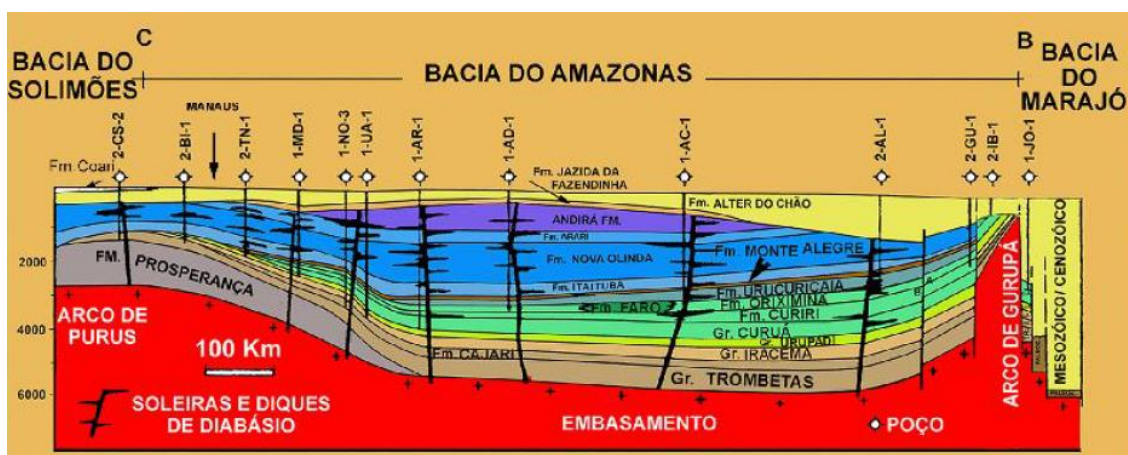
Andirá (arenitos e sedimentos vermelhos (red beds) e raras anidritas, de fácies lacustrinas e fluviais (LOUREIRO ET AL., 2021).

A segunda megassequência de primeira ordem, Mesozoico – Cenozoica é formada pelas seguintes Formações: Alter do Chão constituída por arenitos grossos, conglomerados de fácies de planície e leques aluviais; Solimões (cunha argilosa com pelitos com matéria orgânica e conchas de moluscos) e Marajó (CUNHA et al., 2007).

Na Formação Alter de Chão há sedimentos de canal com clastos de argila de espessura variando entre 1 a 20 cm e raros pedaços de madeira silificados com comprimento de até 10 cm. Há também no topo do ciclo sedimentos de planícies de inundações efêmeras e lacustres onde existe arenito fino com laminação cruzada em grande quantidade e níveis delgados de pelitos. Na formação Alter-do-chão considera-se Arenito Manaus os sedimentos silificados lacustres e paleossolos caracterizados por marcas de raízes, estruturas pediformes, gretas de contração e bioturbação contendo silte arenoso (FERNANDES FILHO, 1996).

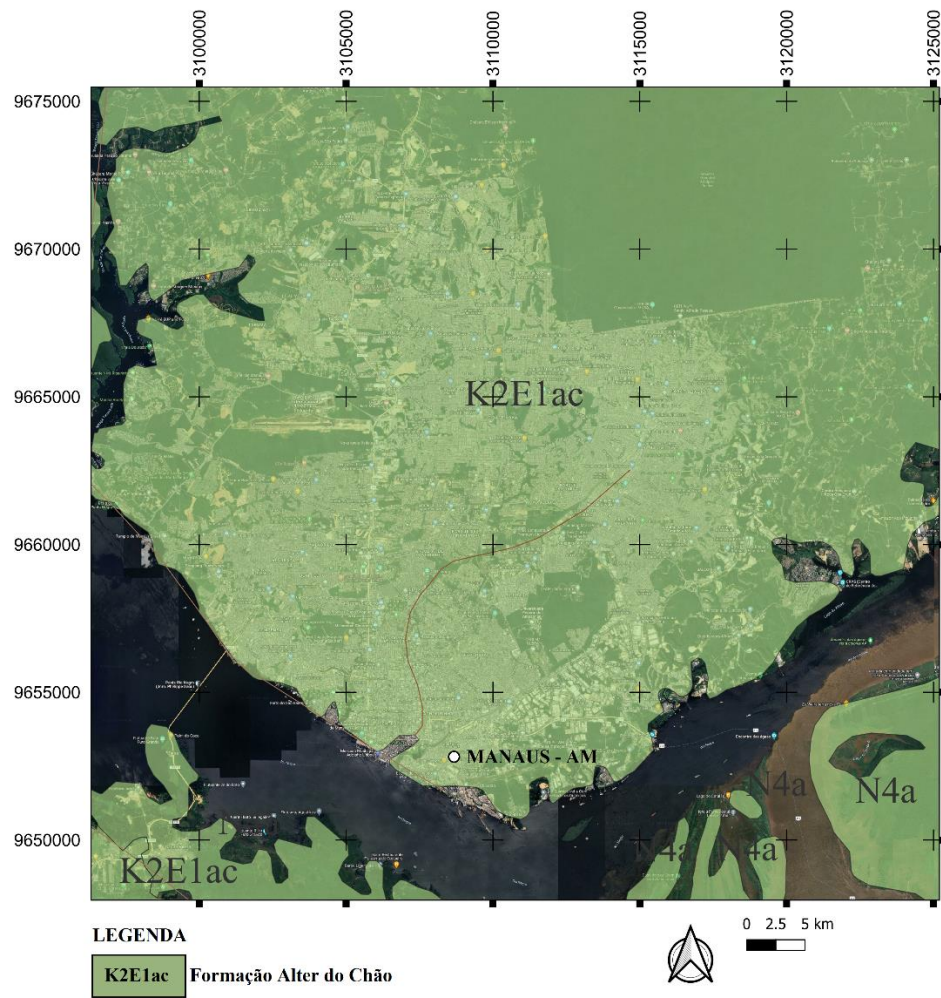
A estratigrafia de Manaus é caracterizada pela Formação Alter do Chão do Cretáceo superior e sedimentos arenoargilosos do Holoceno (FIGURA 15). A estratigrafia da cidade teve sua influência direta devido a movimentos neotectônicos ao longo do Quaternário (CARVALHO et al., 2003). Assim, a Bacia do Amazonas na região de Manaus apresenta um bloco estrutural que se desenvolveu pela atuação de falhas nas direções N-S, NW-SE e NE-SW num evento distensivo. Tais falhamentos (normais planos e lístricos, transcorrentes e inversos) orientaram os cursos dos igarapés Tarumã – Açu, Puraquequara, Leão, Mariano e o Rio Negro, além de deslocamentos de horizontes latossólicos (FIGURA 16).

Figura 14 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas



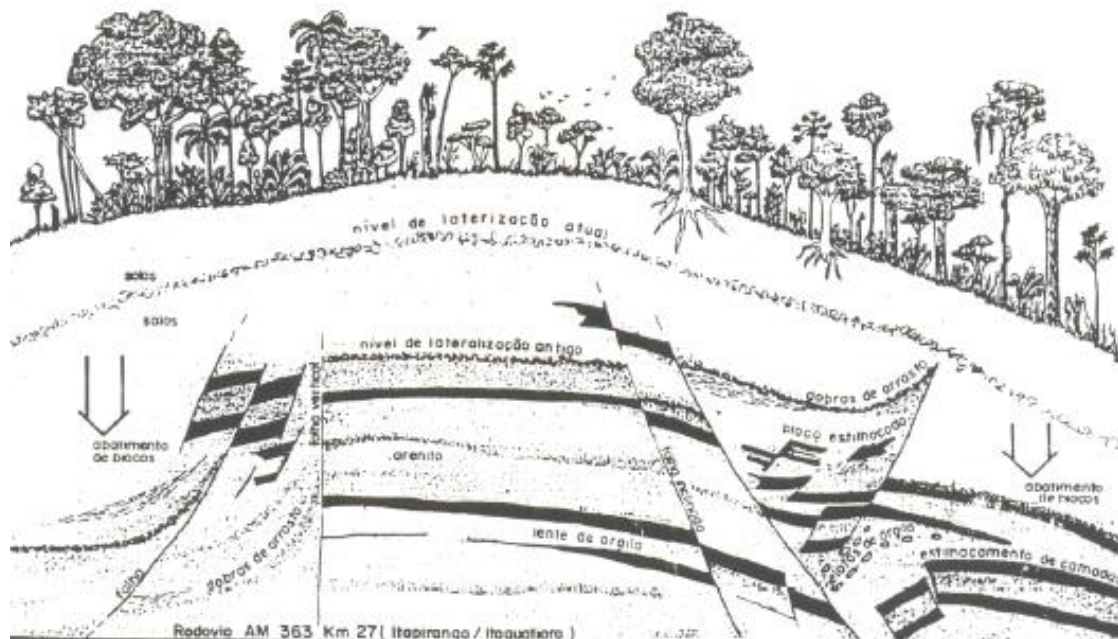
Fonte: Caputo (2014).

Figura 15 - Mapa geológico da cidade de Manaus-AM



Fonte: Adaptado de CPRM (2006).

Figura 16 - Seção geológica esquemática, em corte de estrada na zona norte de Manaus-AM, indicando dois níveis de laterização afetados por falhas

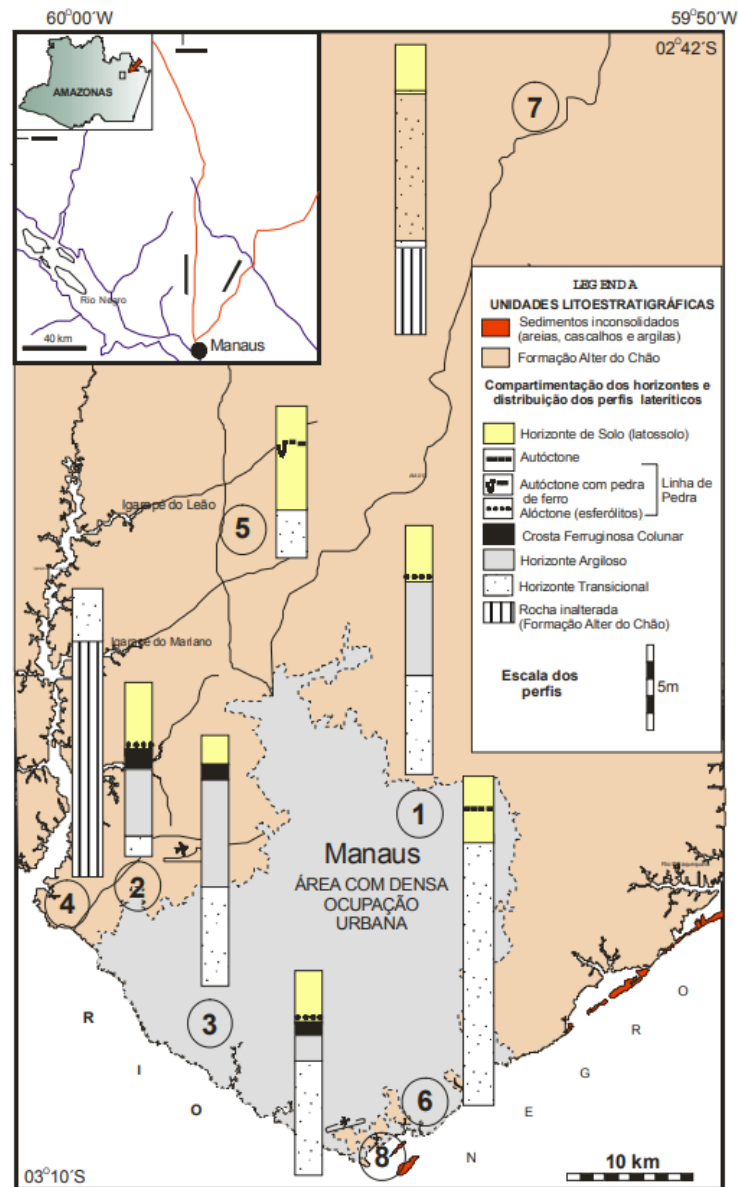


Fonte: Fernandes Filho (1996).

3.2 Perfis Lateríticos

Em Manaus-AM, os perfis lateríticos encontram-se bem distribuídos na região e em exposição em cortes de estradas e nas margens dos rios Negro, Solimões e Amazonas (FIGURA 17). Há dois tipos de lateritos existentes no município: o primeiro de crosta ferruginosa, localizado nas partes sul, sudeste e sudoeste da cidade, composto pelos horizontes transicional, argiloso, ferruginoso, esferolítico e solo. E o segundo perfil é truncado no nível dos horizontes transicional e argiloso devido a existência da linha de pedra, localizado nas partes nordeste e central da região. Nos dois perfis os principais minerais encontrados são caulinita, hematita, goethita, quartzo, gibbsita, anatásio erutilo (FERNANDES FILHO, 1996).

Figura 17 - Perfis lateríticos do município de Manaus-AM



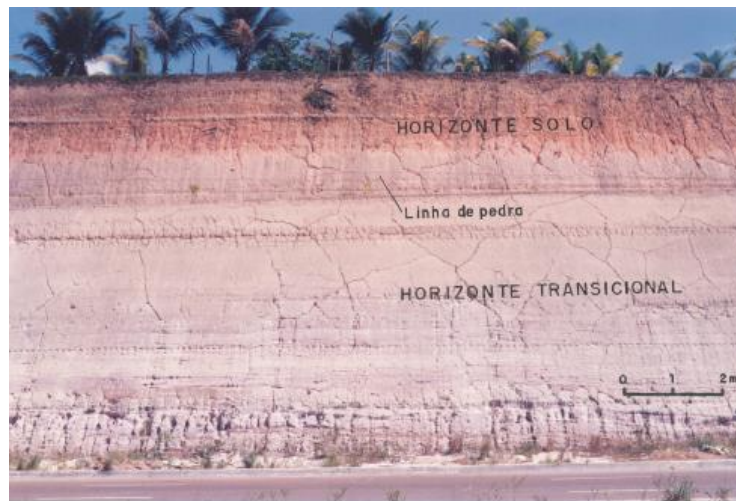
Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2003).

Os níveis de hematita aumentam do horizonte transicional em direção ao ferruginoso. Já as quantidades de alumina e sílica apresentam teores diferentes ao da hematita, acompanhando assim os teores de caulinita, gibbsita e quartzo. O intemperismo da Formação Alter do Chão, de natureza silico-aluminosa, ao enriquecer teores de hematita e empobrecer níveis de alumina e sílica, desenvolveu a crosta ferruginosa que, posteriormente, se decompôs originando o horizonte esferolítico e ao horizonte solo.

O horizonte transicional (FIGURA 18) é a base do perfil laterítico de coloração variante entre o branco da base e o rosa no topo, este horizonte apresenta predominância

de caulinita, goethita, quartzo e anatásio. Possui espessura comum de 3,5 m e de 8 m na região nordeste de Manaus, na qual está ligada à linha de pedra. Neste horizonte observa-se sedimentação referente à Formação Alter do Chão como estratificações plano-paralelas, cruzada plana e acanalada, lentes conglomeráticas e acamamentos. Com espessura que varia entre 5 a 11 m, o horizonte argiloso (FIGURA 19) apresenta coloração avermelhada na porção predominante argilosa e machas esbranquiçadas na porção arenoargilosa. Além da predominância da caulinita há também a existência dos minerais hematita, goethita, gibbsita e anatásio.

Figura 18 - Exposição de horizonte transicional e linha de pedra em perfil da avenida Grande Circular, zona norte de Manaus-AM



Fonte: Fernandes Filho (1996).

Figura 19 - Comparação entre horizontes solo, esferolítico e argiloso

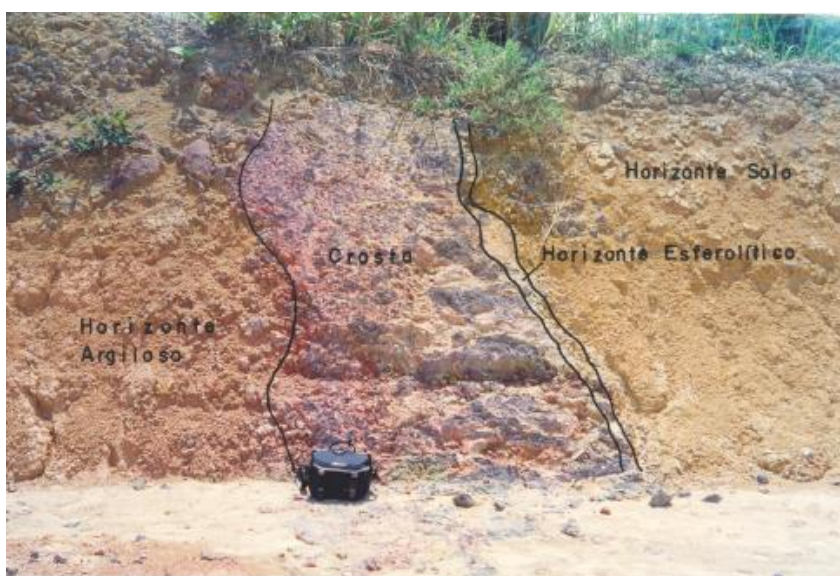


Fonte: Fernandes Filho (1996).

O horizonte ferruginoso apresenta crosta ferruginosa e por sua vez possui espessura que varia de 0,5 a 1 m. Essa crosta é formada por óxidos de ferro em material argiloso de

coloração rosa – avermelhada ou amarela empalidecida, neste horizonte há predominância de hematita e goethita e a presença de caulinita. No horizonte esferolítico, com espessura de 30 a 50 cm, é formado por esferolitos de óxi - hidróxidos de ferro existente no material argiloso de coloração amarela. Neste horizonte a caulinita retorna a ser o mineral em maior quantidade possuindo goethita, quartzo e hematita. Nas regiões central e nordeste há a existência da linha de pedra, com espessura de 15 a 80 cm, formada por óxi – hidróxidos de ferro oriundos da crosta ferro – aluminosa. De coloração pálida marrom, a linha de pedra forma lentes extensas na região central e possui fragmentos inseridos em material argiloso amarelo no nordeste da cidade. Por fim, o horizonte solo, de espessura que varia de centímetros a dezenas de metros, está composto por sedimento argiloso e arenoargiloso amarelado. Devido a ação das falhas este horizonte constantemente está disposto lado a lado com horizontes inferiores (FIGURA 20). Grande parte da matriz argilosa destes horizontes é holocênica (MAIA e MARMOS, 2010).

Figura 20 - Estruturas colunares com diferentes horizontes



Fonte: Fernandes Filho (1996).

Na subsuperfície da cidade encontra-se o Arenito Manaus, que é uma feição de ocorrência em corpos compactos distribuídos ao longo de horizontes descontínuos, compostos predominantemente por arenitos de granulometria grossa a fina, além de siltitos e argilitos silicificados e ferruginosos, caracterizados por baixa seleção. Sua composição principal é de quartzo, com raros fragmentos de quartzito metamórfico e feldspatos. Esta litologia possui espessura centimétrica até 76m, que aparecem em até 228m de profundidade (PALMA et al., 2013). Na camada acima do Arenito Manaus está uma formação caulínica e ferruginosa de fraca coesão e coloração vermelha ou branca oriunda do intemperismo do

clima quente e úmido da região. Adicionalmente há dominância de Latossolos amarelos de 8 a 10 m de espessura com composição argilosa, arenoargilosa e arenosa amarelada com predominância de quartzo e caulinita (LIMA et al., 2008).

3.3 Latossolo Amazônico

De acordo com Maia e Marmos (2010) a matriz argilosa predominante nos horizontes de sedimentos da Manaus são argilas holocênicas. A formação dos depósitos argilosos ocorre pelo transporte do material nos rios da Amazônia, os quais possuem formas meandradas e seus tempos de subida e descida corroboram para a deposição dos materiais transportados pelas áreas de várzea. A formação das argilas holocênicas ocorre pela laterização, cujo processo dá-se através de: partição de partículas de H_2O , hidratação dos grãos do solo, dissolução, carbonatação, oxidação e redução conferindo ao sedimento a característica de granulometria fina (OLIVEIRA, 2001).

Na litologia da subsuperfície de Manaus existe a dominância de Latossolos amarelos, que possuem 8m a 10m de espessura de cor amarela. Os Latossolos amazônicos são predominantemente argilosos, sua matriz argilosa é formada principalmente por argilo mineral caulinita (mineral em elevado grau de intemperismo) e óxidos de ferro goethita e hematita. Em sua composição arenosa, o Latossolo possui os minerais mais resistentes aos processos de intemperismo como o quartzo. Em relação ao nível de pH, os sedimentos que compõem o Latossolo amazônico são ácidos devido a predominância de cargas superficiais líquidas negativas nos horizontes subsuperficiais as quais facilitam a troca de íons positivos em relação aos íons negativos (MAIA E MARMOS, 2010). Seu perfil inclui argila, areia argilosa e areia (FIGURA 21) com forte drenagem e coloração amarela com predominância de quartzo e caulinita (LIMA; CARVALHO; FROTA, 2008).

Figura 21 - Perfil de Latossolo amarelo



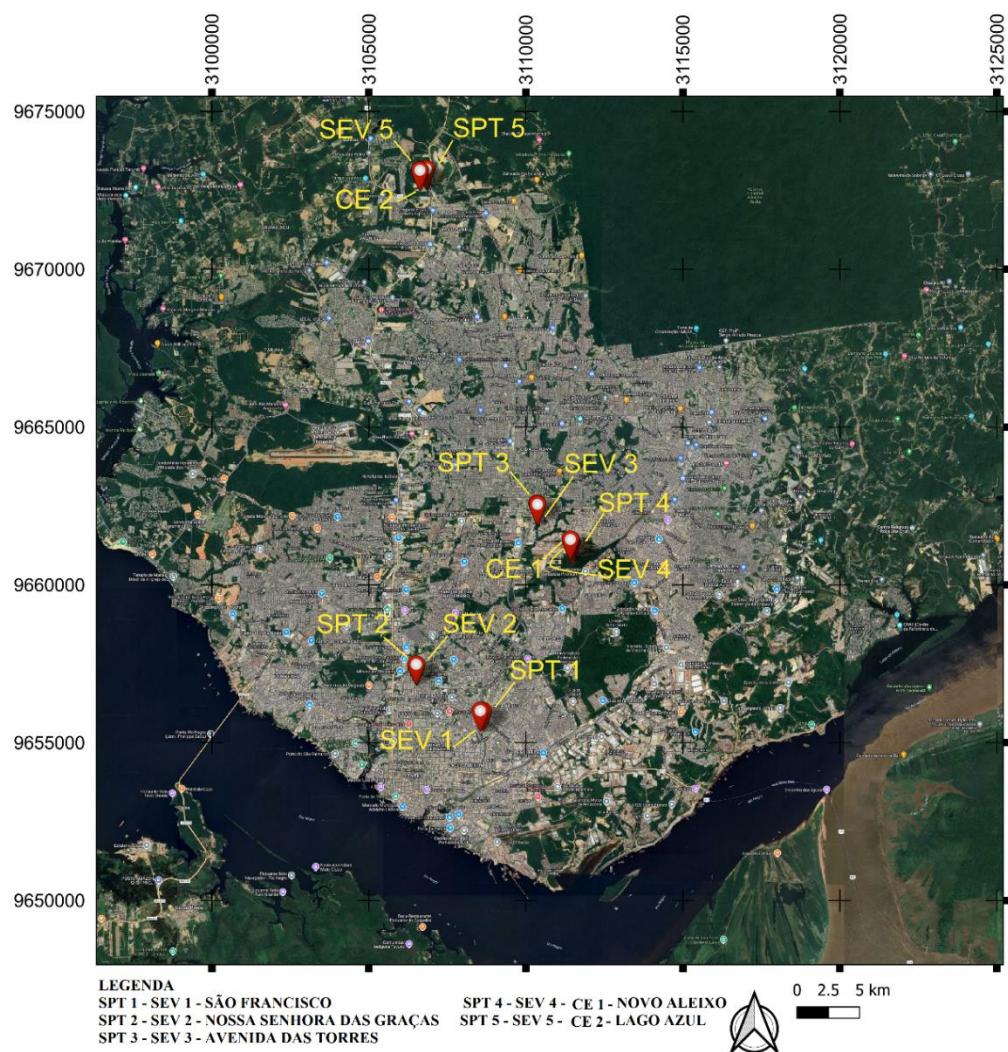
Fonte: Maia e Marmos (2010).

O Latossolo é constituído por sedimentos não saturados dispostos em horizontes sequenciais: A, Bw e C. O horizonte A, onde pode estar presente a vegetação de floresta primária, é constituído por uma camada drenante impedindo a criação de erosões hídricas principalmente na região da Amazônia central próximo a cidade de Manaus. Devido a intemperização do solo, a quantidade de minerais primários (os primeiros elementos a serem removidos durante ação de intemperismo) existentes no horizonte Bw é menor do que 4% em relação aos minerais que constituem todo o horizonte. Estes estão dispostos em blocos subangulares e granular de tamanho pequeno ou muito pequeno de forte força de ligação e arenosa com baixo teor de silte. A predominância dos minerais dispostos em estrutura granular influencia para que poros distribuídos em frequência bimodal se formem nos sedimentos tornando o solo muito poroso. Por sua vez o horizonte C não pouco difere do horizonte Bw e a transição entre estes ocorre de forma plana ou difusa (MAIA E MARMOS, 2010).

4 RESULTADOS

Realizamos 5 SEVs e 2CEs próximos a 5 furos SPT ao longo da zona oeste, norte e centro-sul de Manaus-AM (FIGURA 22). As CEs foram realizadas somente no mesmo local das SEVs 4 e 5, pois as coordenadas das SEVs 1, 2 e 3 apresentaram muitas utilidades urbanas subterrâneas (redes de esgoto, asfalto e concreto) que inviabilizariam a logística da aquisição. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as coordenadas das aquisições. Os dados referentes a distância entre os furos de sondagens e as sondagens elétricas verticais bem como a cota referente a cada ponto foram obtidos por meio do Google Maps, Boletins de Sondagem e Mapa Topográfico da Cidade de Manaus (desenvolvido com a fonte de dados do Modelo digital de elevação TessaDEM quase global de 30 m que fornece dados de elevação levando em consideração a urbanização, a vegetação e os corpos de água).

Figura 22 - Distribuição dos furos de sondagem SPT, SEVs e CEs na cidade de Manaus



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Informações dos Pontos onde foram executados os furos de sondagem SPT

PONTO	CORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS 84		MÊS DO FURO	COTA
SPT 1	3°06'34.6"S	60°00'02.6"W	MAIO/2022	50 m
SPT 2	3°05'47.5"S	60°01'11.7"W	OUTUBRO/2022	29 m
SPT 3	3°03'04"S	59°59'08"W	MARÇO/2023	61 m
SPT 4	3°03'39.5"S	59°58'30.5"W	ABRIL/2022	54 m
SPT 5	2°57'15.6"S	60°01'01.2"W	JULHO/2020	84 m

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Informações dos Pontos onde foi realizado os ensaios de Sondagem Elétrica Vertical próximos aos furos de sondagem SPT

PONTO	CORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS 84		MÊS	DISTÂNCIA SPT - SEV	COTA
SEV 1	3°06'35.1"S	60°00'05.1"W	ABRIL/2024	70 m	50 m
SEV 2	3°05'47"S	60°01'11.5"W	ABRIL/2024	15 m	29 m
SEV 3	3°03'06.6"S	59°59'07.4"W	ABRIL/2024	85 m	61 m
SEV 4	3°03'37.6"S	59°58'31.9"W	AGOSTO/2024	50 m	54 m
SEV 5	2°57'17"S	60°01'07.6"W	AGOSTO/2024	200 m	81 m

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Informações dos Pontos onde foi realizado os ensaios de Caminhamento Elétrico próximos aos furos de sondagem SPT

PONTO	CORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS 84		MÊS	COTA
CE 1	3°03'37.7"S	59°58'32.5"W	AGOSTO/2024	54 m
CE 2	2°57'17"S	60°01'07.6"W	AGOSTO/2024	81 m

Fonte: Autor.

4.1 Interpretação dos dados De Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico

Foram executadas cinco SEVs ao todo, uma para cada um dos bairros: São Francisco e Nossa Senhora das Graças da zona centro-sul; no bairro Novo Aleixo da zona leste; nos bairros Flores e Lago Azul da zona norte. Durante a execução das sondagens elétricas verticais nas regiões de Novo Aleixo e Lago Azul foi executada também a técnica de caminhamento elétrico.

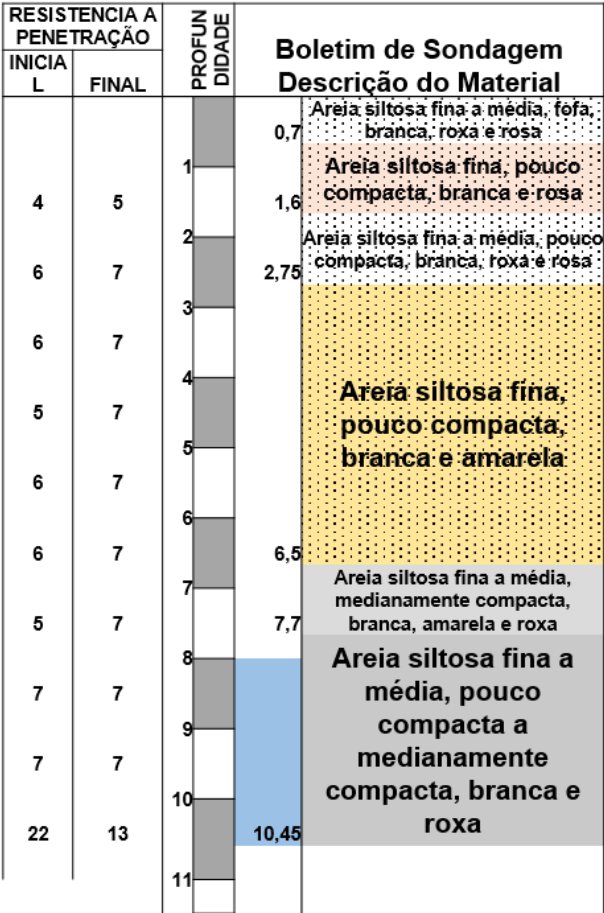
A Figura 23a apresenta o boletim de sondagem do furo realizado no Bairro São Francisco associado a SEV – 01. O boletim de sondagem descreve o perfil como uma camada de sedimento areno siltoso predominante com espessura de até 10,45 m e a variando de fofa até 0,7 m a pouco compacta até 6,5 m e à medianamente compacta até 10,45 m. A presença do nível do lençol freático foi encontrada a profundidade de 8 m.

A inversão geoeletrica da SEV-01, indicada na Figura 23b, apresentou a estimativa de 4 camadas geoeletricas: primeira camada condutiva de 20Ωm com 0,5 m de espessura, segunda camada muito resistiva de 35562 Ωm com 0,5 m de espessura, terceira camada

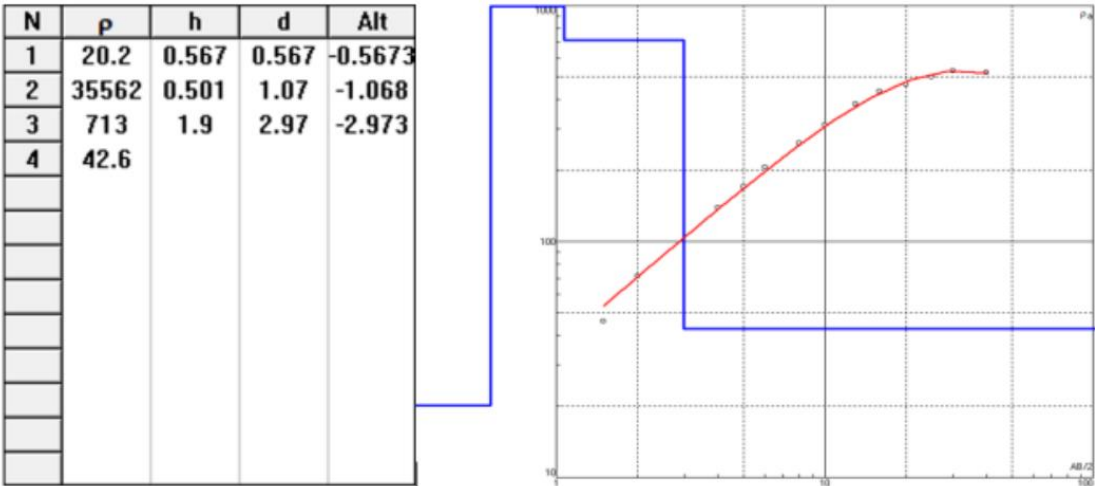
medianamente resistiva de $713 \Omega\text{m}$ com 1,9 m de espessura e a quarta camada condutiva com $42,6\Omega\text{m}$. A segunda camada mais condutiva provavelmente está relacionada a resquícios de elementos de concreto observados na superfície do terreno o qual foi submetido à trabalho de contenção geotécnica com sacos de areia para prevenir futuros deslizamentos de terra (FIGURA 24). As demais camadas geoelétrica convergem com o perfil de sondagem, pois há uma espessa camada de sedimento arenosiltoso muito poroso com baixa compactação, representada pela primeira e terceira camadas geoelétricas.

Figura 23 - Dados SPT e da SEV-01. (a) Boletim de sondagem SPT realizado no Bairro São Francisco. (b) Resultados da inversão da SEV-01

(a)



(b)



Fonte: Autor.

Figura 24 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em terreno próximo a quadra poliesportiva Campo da CEAM no Bairro São Francisco. As linhas vermelhas representam a contenção do talude



Fonte: Autor.

A Figura 25a apresenta o boletim de sondagem do furo realizado no bairro Nossa Senhora das Graças associado a SEV – 02. No boletim de sondagem a litologia está descrita como uma camada de sedimento arenoso fino a médio e pouco siltoso até a profundidade de 7,2 m, seguido da camada de sedimento arenoso fino a grosso pouco siltoso até a profundidade de 9,79 m e o topo da rocha sã a 9,79m. O nível do lençol freático foi encontrado a 2,85 m de profundidade.

A SEV-02 foi capaz de estimar quatro camadas geoeletricas de resistividade crescente conforme exibido na Figura 25b. As camadas geoeletrica apresentaram espessuras e resistividade de 1m e 275Ωm; 1,52 m e 498 Ωm; e 4,08 m e 149 Ωm para a primeira, segunda e terceira camadas respectivamente. A quarta camada possui resistividade de 4274Ωm com topo a 6,5m. As três camadas do modelo geoeletrico explicam o aumento da compactação dos sedimentos. Apesar de a NBR 6484 (ABNT, 2020) interpretar valores $5 \leq N_{spt} \leq 8$ como pouco compactos para areias, a seção geoeletrica mostra que a partir de 2,42m de profundidade há uma compactação das areias devido ao aumento de resistividade, mesmo com o nível d'água a 2,85m. Todavia a SEV foi realizada num ambiente altamente urbanizado (FIGURA 26) onde há muita utilidade subterrânea, portanto os materiais concretados no subsolo também explicam o aumento de resistividade. No modelo

geoeletrico observa-se que a partir da profundidade de 2,42m há um salto do valor de resistividade indicando a existência do aumento de compactação dos sedimentos.

Figura 25 - Dados SPT e da SEV-02. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado no Bairro Nossa Senhora das Graças. (b) Resultados da inversão da SEV-02

(a)

RESISTENCIA A PENETRAÇÃO		PROFUNDIDADE	DE	Boletim de Sondagem Descrição do Material
INICIAL	FINAL			
		0,3		Camada de Entulho
4	5	1		Areia fina a média acizentada
6	7	2		
6	7	3	2,85	
6	7	4	4,25	Areia fina a média pouco siltosa esbranquiçada
5	7	5		
6	7	6		
6	7	7	7,2	Areia fina a grossa pouco siltosa avermelhada
5	7	8		
7	7	9		Rocha ou matacão impenetrável
7	7	10	9,79	
22	13	11		

(b)

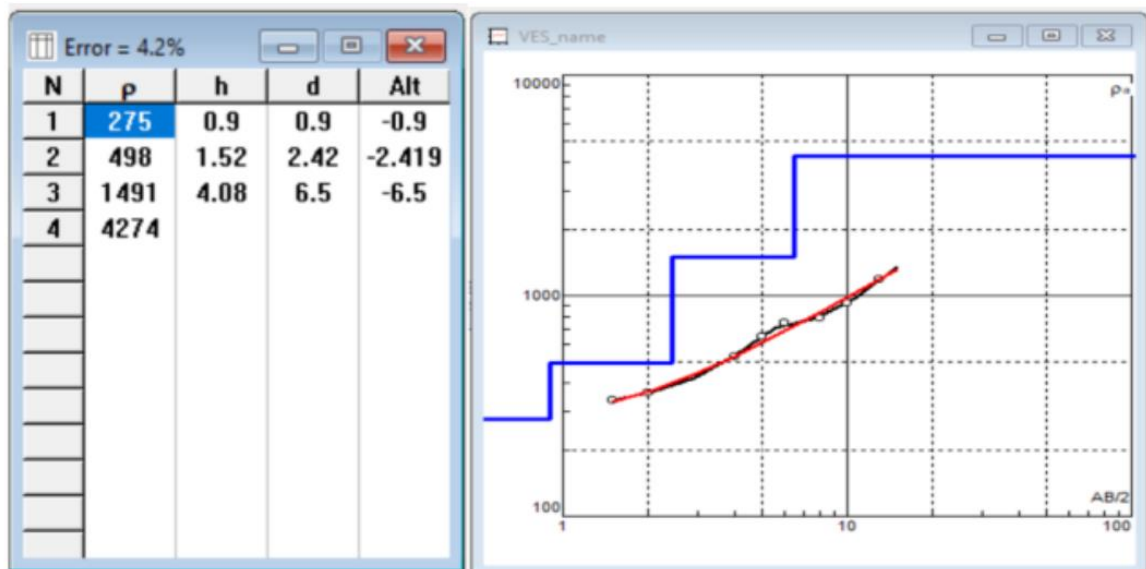


Figura 26 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em terreno próximo ao Clube Hípico de Manaus no bairro Nossa Senhora das Graças



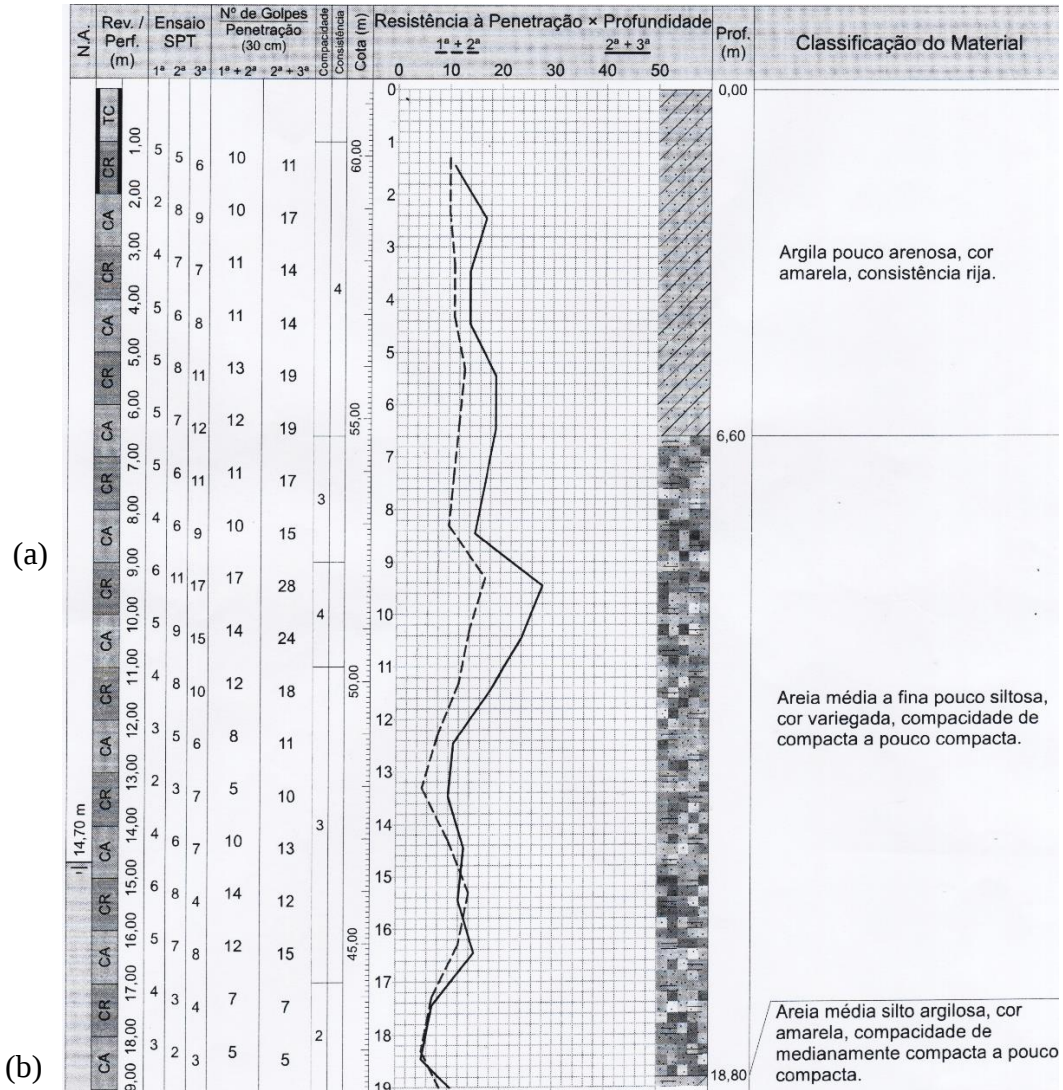
Fonte: Autor.

A Figura 27a apresenta o boletim de sondagem do furo realizado na Avenida das Torres, bairro Flores, associado a SEV – 03. O modelo geoeletrico estimado é exibido na Figura 27b e apresenta três camadas geoeletricas: primeira camada condutiva de $227\Omega\text{m}$ com 1,45 m de espessura, segunda camada resistiva de $7594\Omega\text{m}$ de 1,44 m de espessura e o topo de uma camada condutiva de $64\Omega\text{m}$. O boletim de sondagem descreve o perfil composto inicialmente de uma camada de argila pouco arenosa rija de até 6,6 m de profundidade seguida de uma camada de areia média a fina pouco siltosa compacta a pouco compacta até a profundidade de 18,80 m, e o nível freático é indicado à 14,7 m de profundidade.

O valor de $227\Omega\text{m}$ indica uma litologia argiloarenosa. Porém, o valor elevado $7594\Omega\text{m}$ indica a possibilidade da existência de uma camada compacta de 1,44 m de espessura. Esta camada pode ser interpretada como sedimento arenoso médio a fino pouco siltoso muito compacto. A distância entre a coordenada da SEV-03 e o furo de sondagem é de 85m, portanto na coordenada da SEV a camada arenosa se encontra numa profundidade mais rasa (FIGURA 28). Por fim a terceira camada geoeletrica mais condutiva de $64,7\Omega\text{m}$ indica a saturação do sedimento arenoso médio a fino pouco siltoso pouco compacto a 2,89 m de profundidade pois é provável que o nível freático identificado no boletim de sondagem a 85 m de distância do furo encontre-se a uma profundidade mais

rasa no ponto da SEV 3.

Figura 27 - Dados SPT e da SEV-03. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado no bairro Flores, Avenida das Torres. (b) Resultados da inversão da SEV-03



Fonte: Autor.

Figura 28 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical em canteiro central na Avenida das Torres, bairro Flores



Fonte: Autor.

A Figura 29a exibe o boletim de sondagem do furo executado na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Bairro Novo Aleixo, o qual foi relacionado à SEV – 04. O perfil é descrito pelo boletim de sondagem em duas camadas de sedimentos, a primeira de argila arenosa de coloração branca e consistência média de 4 m de espessura, a segunda camada de areia siltosa fina a média de coloração branca e amarela de compactação pouca a mediana de 6,45 m de espessura.

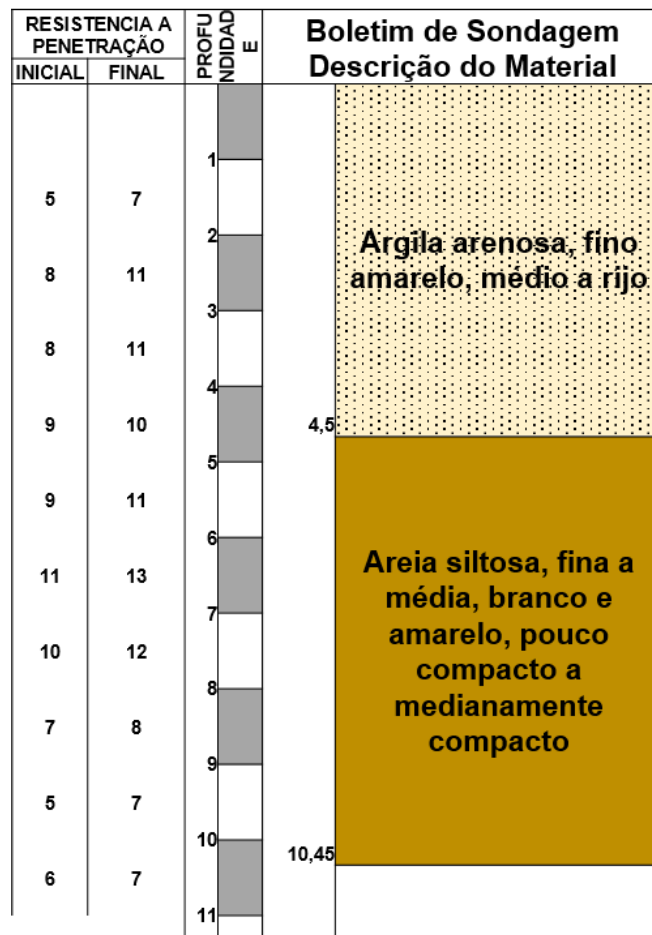
A inversão geoeletrica da SEV-04 exibida na Figura 29b estimou 5 camadas geoeletricas. A primeira camada é resisitiva com $935 \Omega\text{m}$ de 0,77 m de espessura, a segunda camada condutiva com $185 \Omega\text{m}$ de 0,99 m de espessura, na terceira camada de 2,92 m de espessura há um salto de resistividade para $9472 \Omega\text{m}$, a quarta camada é condutiva com $244 \Omega\text{m}$ de 9,39 m de espessura e a quinta camada há um salto muito grande de resistividade para $78557 \Omega\text{m}$.

Na Figura 30a está indicado os dados invertidos de caminhamento elétrico e na Figura 30b o caminhamento está associado ao modelo geoeletrico e ao perfil do boletim de sondagem. As duas primeiras camadas do modelo geoeletrico convergem com a interpretação de sedimento argilo arenoso. A terceira camada, de resistividade $9472 \Omega\text{m}$, indica uma zona de material antrópico, possivelmente concreto devido à construção da praça (FIGURA31). A quarta camada geoeletrica é mais condutiva e converge com a

interpretação de um sedimento areno siltoso. A quinta camada de 78557 Ωm se refere às tubulações da rede de drenagem do local.

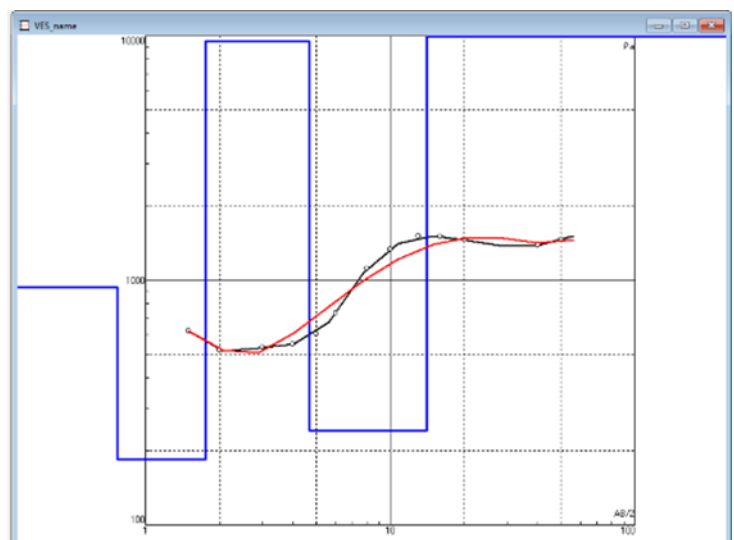
Figura 29 - Dados SPT e da SEV-04. (a) Boletim de sondagem NSPT realizado na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo, relacionado à SEV- 04 (b) Inversão de dados da SEV-04

(a)



(b)

N	p	h	d	Alt
1	935	0.771	0.771	-0.7708
2	185	0.988	1.76	-1.759
3	9472	2.92	4.68	-4.675
4	244	9.39	14.1	-14.07
5	78557			



Fonte: Autor.

Figura 30 - (a) Perfil invertido do caminhamento elétrico realizado na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo. (b) Interpretação conjunta do caminhamento elétrico com o modelo geoeletrico da SEV-04 e com o boletim de sondagem NSPT

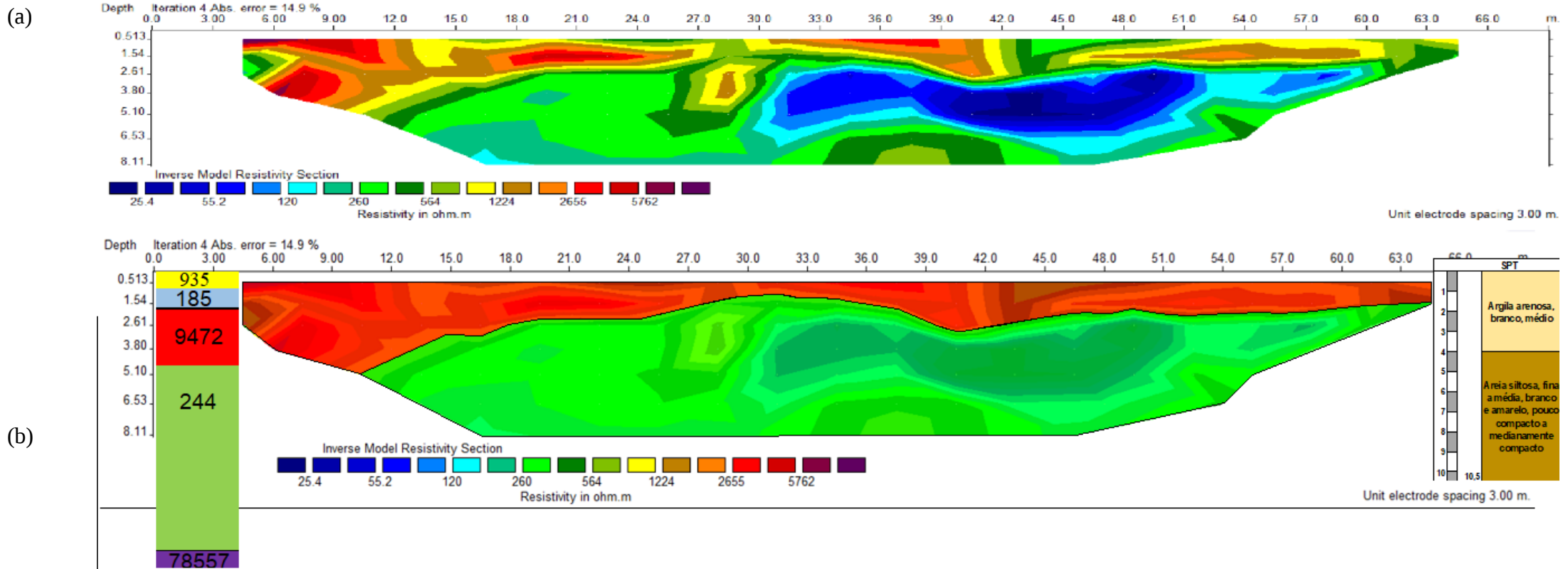


Figura 31 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico na Praça Parque da Juventude Nascentes das Águas Claras I, Novo Aleixo



Fonte: Autor.

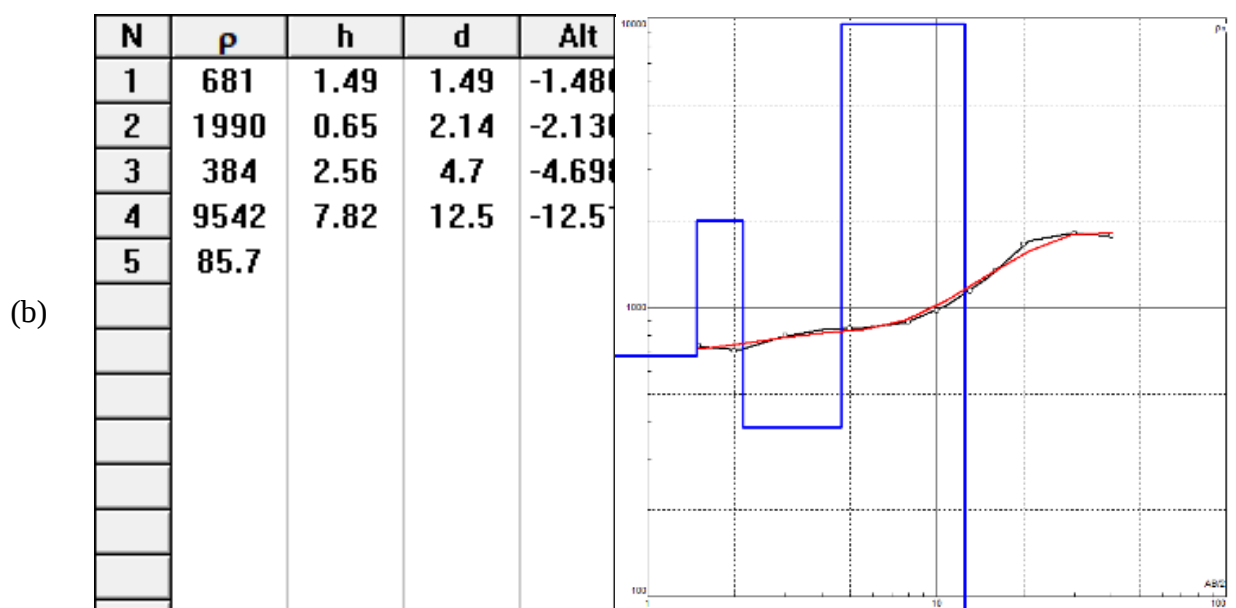
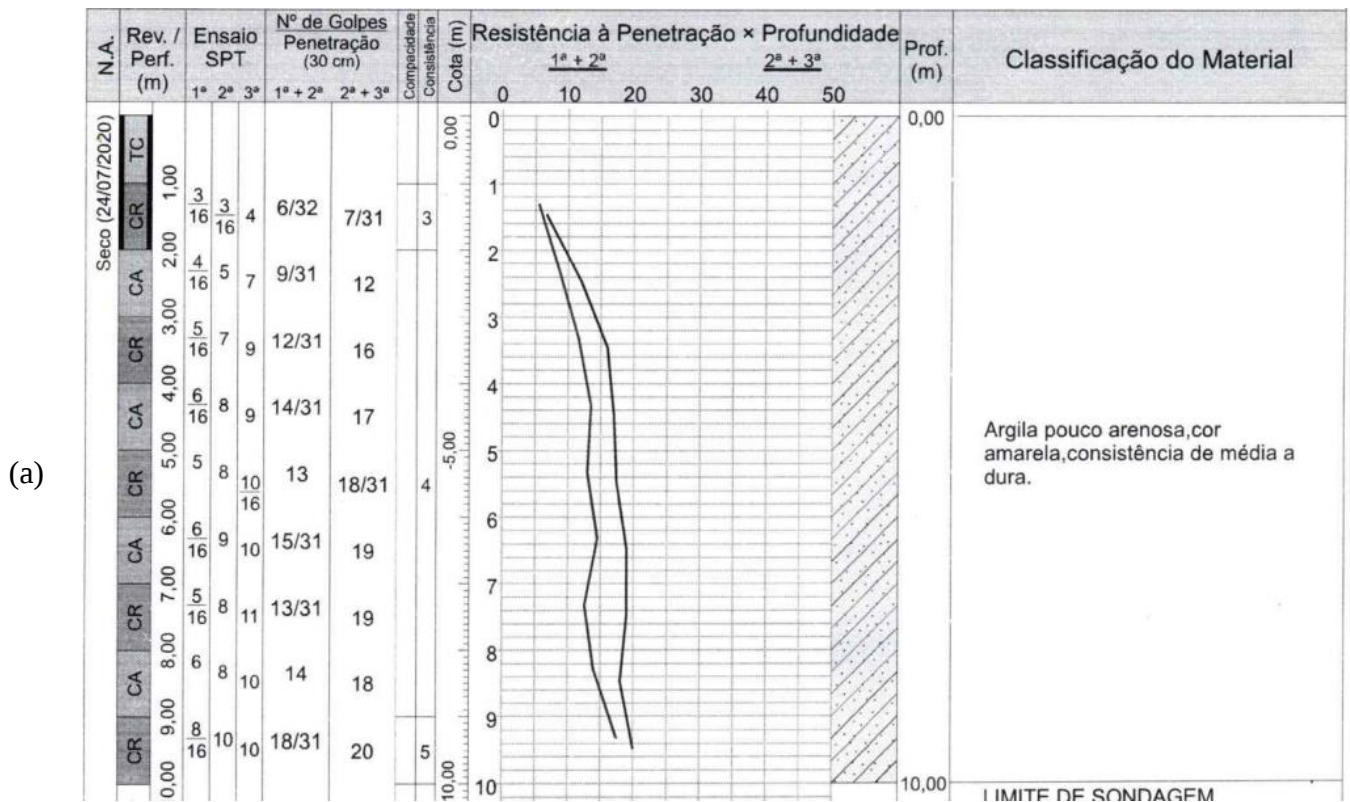
A Figura 32a mostra o boletim de sondagem do furo realizado no Bairro Lago Azul, relacionado à SEV – 05. A descrição do boletim de sondagem é resumida em uma única camada de sedimento argiloso pouco arenoso de coloração amarela de consistência média a dura de 10 m de espessura.

Já a inversão geoeletrica da SEV-05 indicada na Figura 32b foi capaz de estimar 5 camadas geoeletricas: primeira camada de resistividade $681 \Omega\text{m}$ de 1,49 m de espessura, segunda camada mais resistiva com $1990 \Omega\text{m}$ de 0,65 m de espessura, terceira camada condutiva com $384 \Omega\text{m}$ e 2,56 m de espessura, na quarta camada de 7,82 m de espessura há um salto de resistividade para $9542 \Omega\text{m}$ e a quinta camada é bem condutiva com $85,7 \Omega\text{m}$.

A Figura 33a exibe os dados invertidos de resistividade do caminhamento elétrico enquanto a Figura 33b mostra o caminhamento associado ao modelo geoeletrico da SEV e ao perfil do boletim de sondagem, indicando que a subsuperfície está dividida em três camadas geoeletricas da mesma litologia argilosa e pouco arenosa. Por meio do perfil de caminhamento, verificamos a existência de zonas bem condutivas a partir da coordenada de 60m, indicando a presença de rede de drenagem urbana no começo e no fim da estrada de terra batida. A camada de resistividade de $9542 \Omega\text{m}$ na SEV representa a terceira camada de sedimento argilo arenoso de consistência dura interpretada no caminhamento elétrico. Apesar do furo de sondagem não encontrar o nível estático d'água a 10m,

podemos inferir partir de 12m na SEV a existência de sedimentos saturados devido à resistividade de 85,7 Ωm .

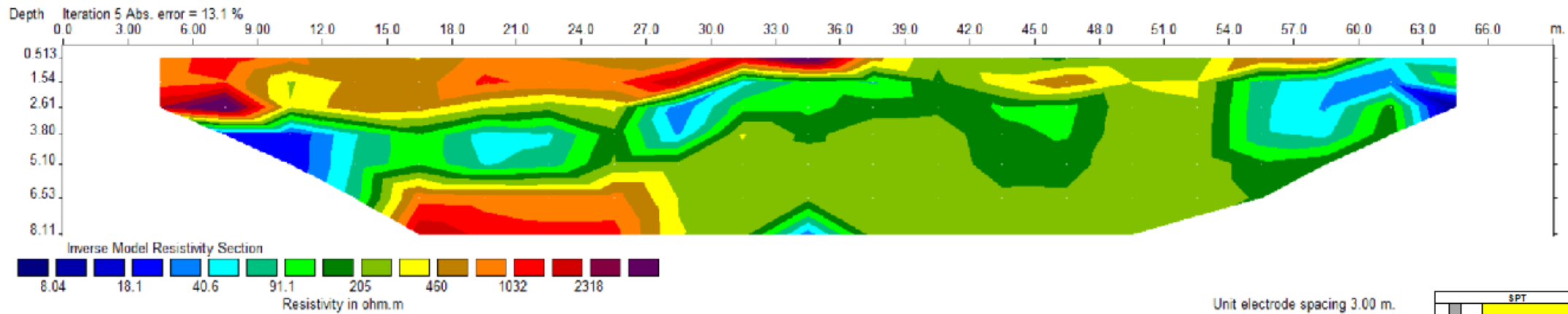
Figura 32 - (a) Boletim de sondagem NSPT realizado em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário da Cidade de Manaus relacionado a SEV-05 (b) Inversão geolétrica da SEV-05



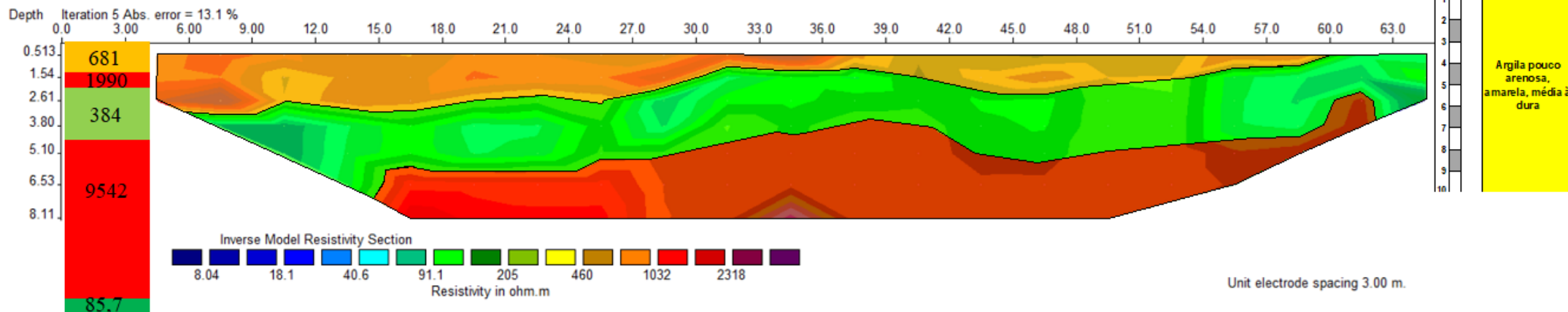
Fonte: Autor.

Figura 33 – Perfil invertido do caminhamento elétrico realizado em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário de Manaus. (b) Interpretação conjunta do caminhamento elétrico com o modelo geoeletrico da SEV-05 e com o boletim de sondagem SPT

(a)



(b)



Fonte: Autor.

Figura 34 - Execução de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico em estrada de terra batida com acesso pela Avenida dos Guaranás próximo ao Aterro Sanitário de Manaus, bairro Lago Azul



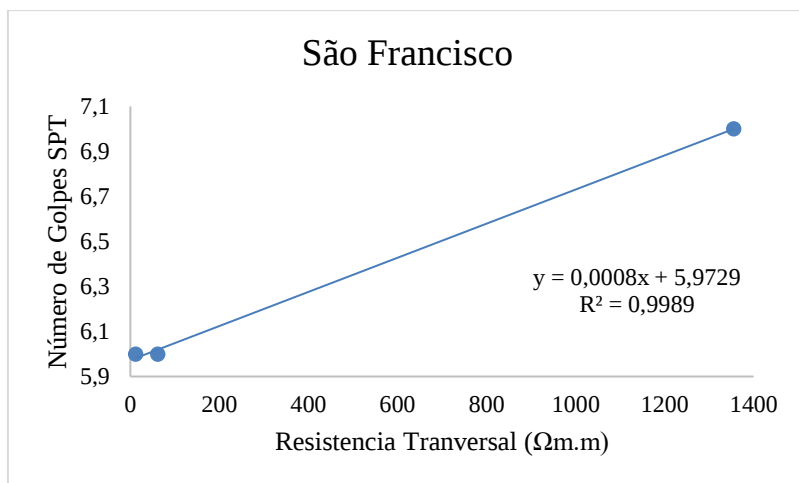
Fonte: Autor.

4.2 Correlações $T \times N_{spt}$

Conforme exibido pelos Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 estão apresentadas as correlações entre a Resistencia Transversal T e N_{spt} para os bairros respectivos de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Avenida das Torres (Flores) e Lago Azul, onde executamos uma SEV próximo a cada furo SPT (TABELA 3). Todas as correlações R^2 apresentam coeficiente angular positivo muito próximo de 0 variando entre 0,0002 a 0,0008 e coeficiente linear variando entre 4,5 e 14,1 indicando o valor mínimo do SPT para cada local. A região de Nossa Senhora das Graças apresentou $R^2 \approx 0,9$ enquanto para as demais apresentaram de $R^2 \approx$

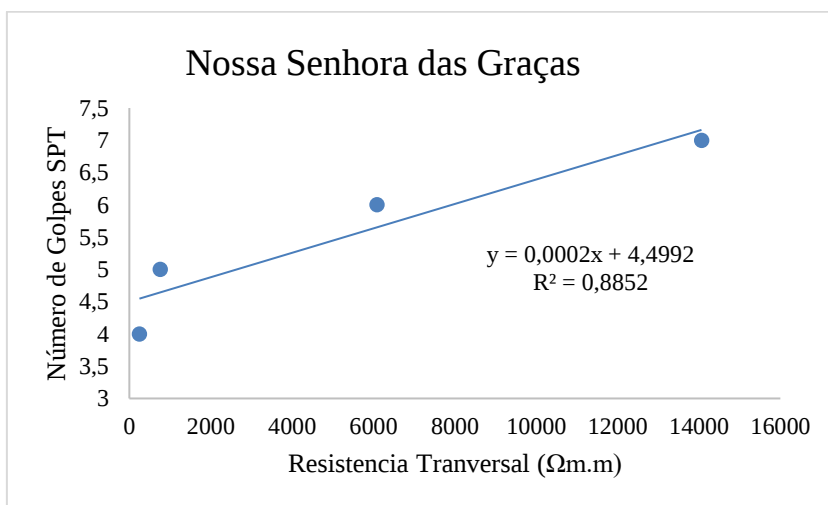
1.

Gráfico 1 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de São Francisco



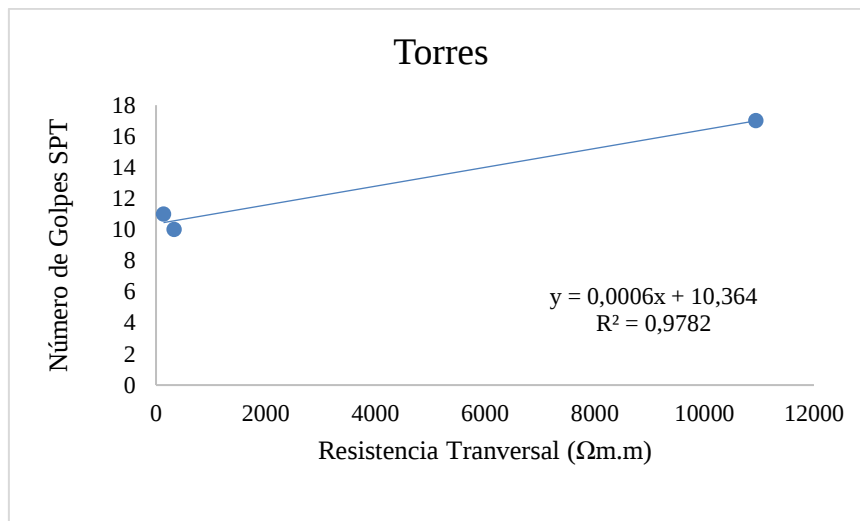
Fonte: Autor.

Gráfico 2 - Correlação dos dados de Resistência Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Nossa Senhora das Graças



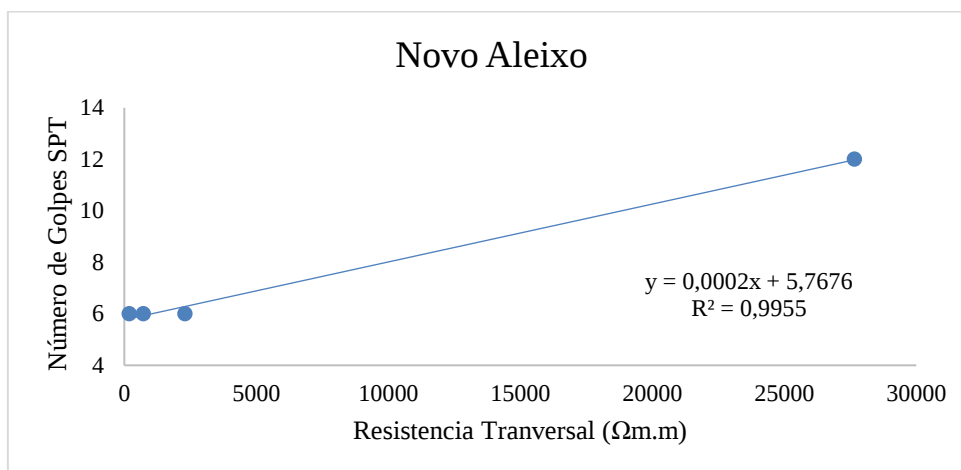
Fonte: Autor.

Gráfico 3 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região da Avenida das Torres (Flores)



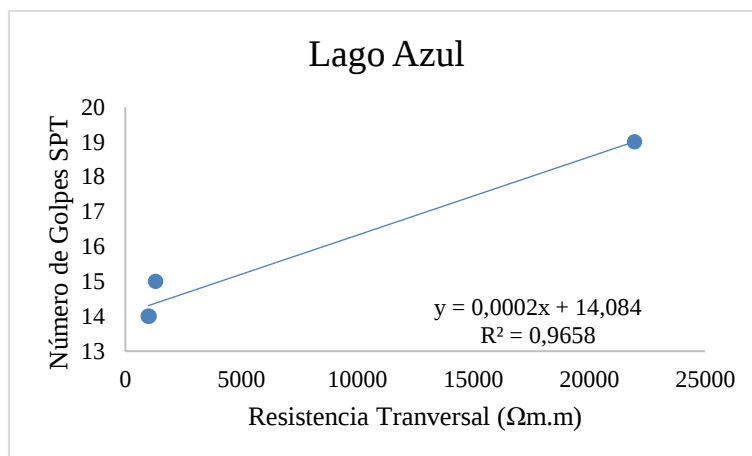
Fonte: Autor.

Gráfico 4 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Novo Aleixo



Fonte: Autor.

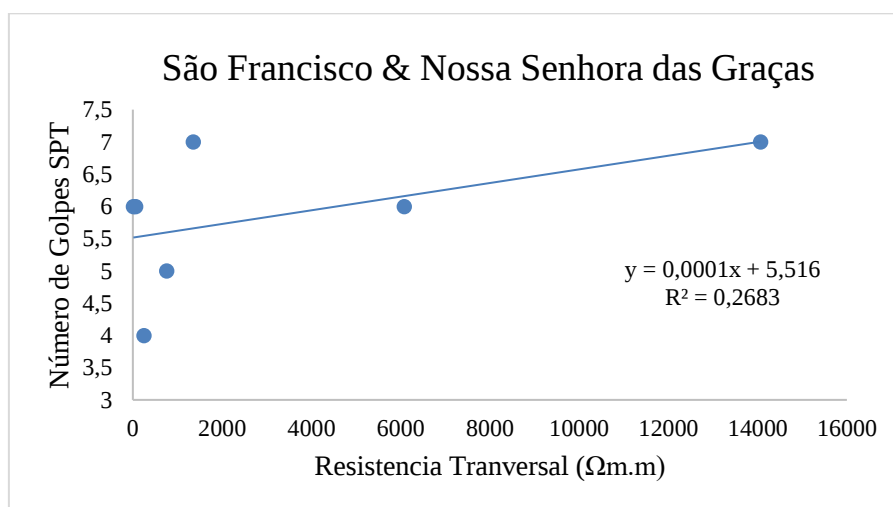
Gráfico 5 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT da região do Bairro de Lago Azul



Fonte: Autor.

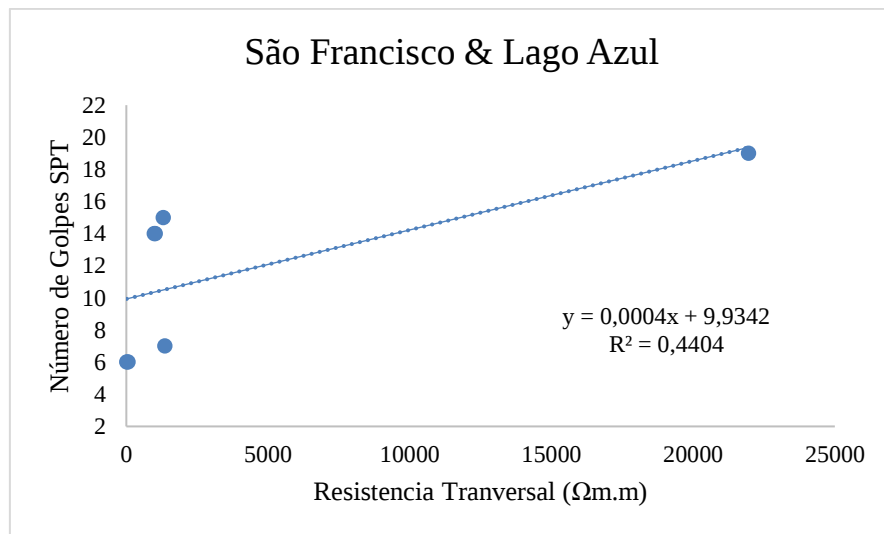
Conforme observa-se nos Gráficos 6, 7, 8, e 9 os dados respectivos para o bairro de São Francisco têm baixa correlação com os dados dos bairros Nossa Senhora das Graças e Lago Azul. Já para com os dados referente a Avenida das Torres (Flores) a correlação é alta com coeficiente angular de 0,0008, coeficiente linear de 7,7 e coeficiente de determinação de 0,74, e para com os dados referente ao bairro Novo Aleixo a correlação é alta com comportamento linear diretamente proporcional com coeficiente angular positivo muito próximo de 0 e coeficiente linear de 6 indicando o valor mínimo do N_{spt} e $R^2 \approx 0,97$.

Gráfico 6 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Nossa Senhora das Graças



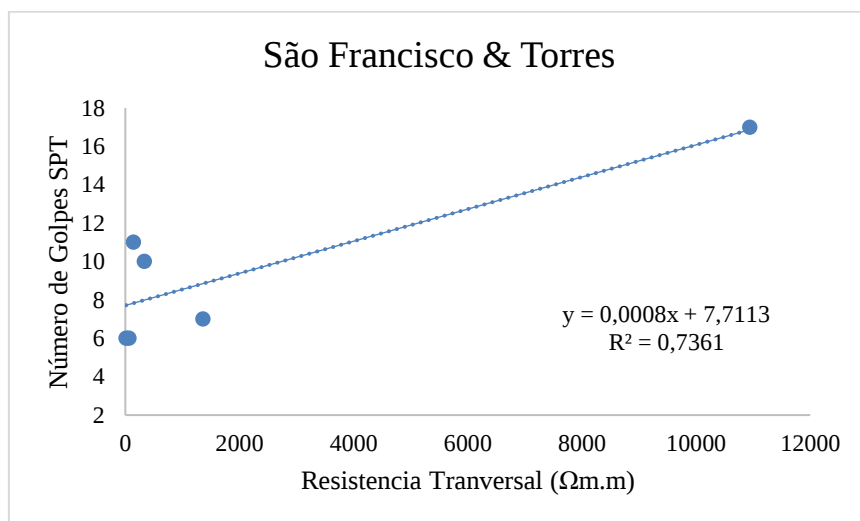
Fonte: Autor.

Gráfico 7 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Lago Azul



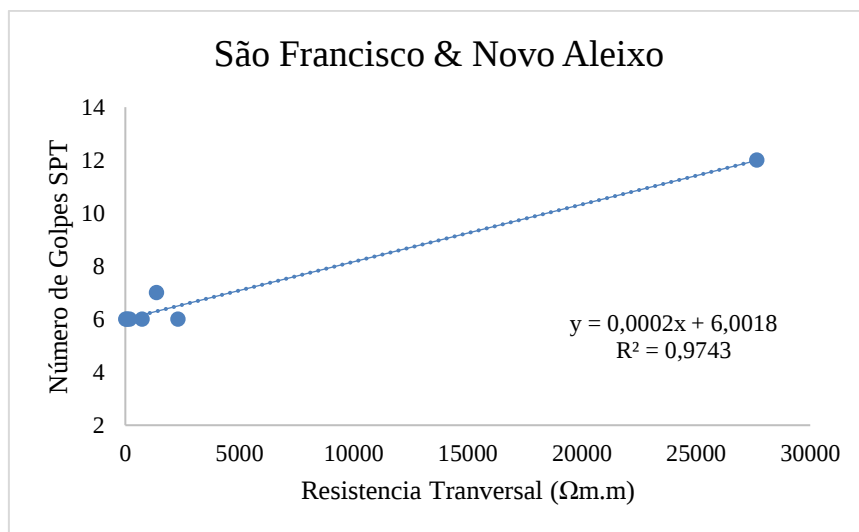
Fonte: Autor.

Gráfico 8 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Torres



Fonte: Autor.

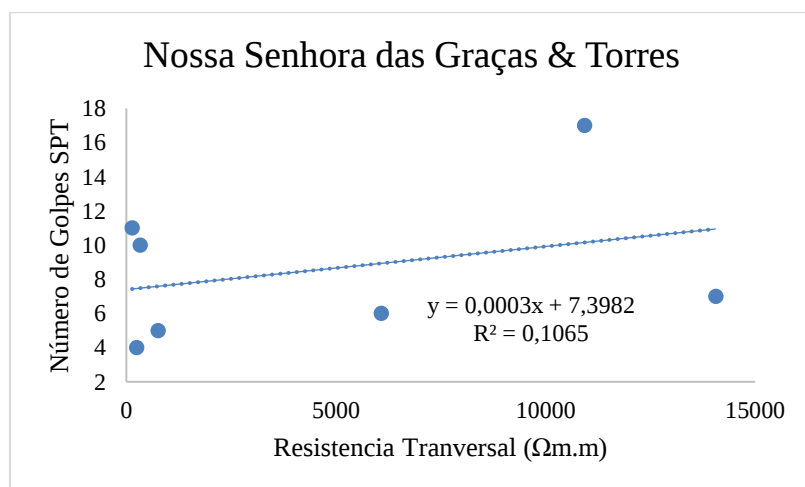
Gráfico 9 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco e Novo Aleixo



Fonte: Autor.

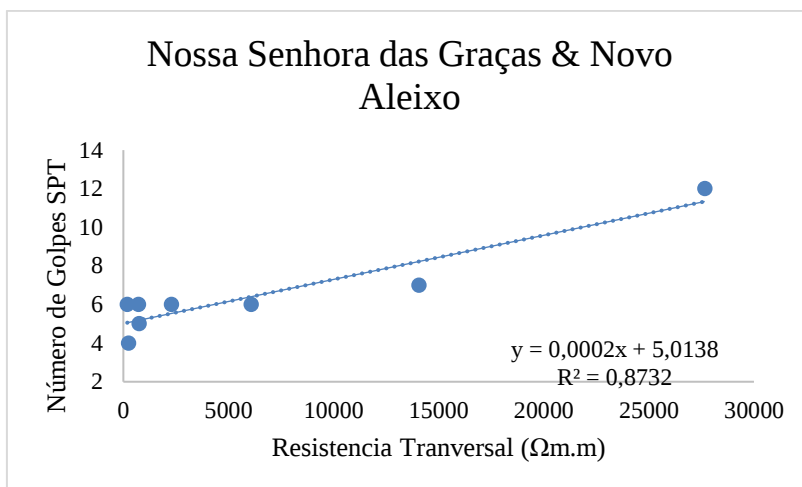
Os Gráficos 10, 11 e 12 mostram a correlação respectiva entre as regiões de Avenida das Torres (Flores), Novo Aleixo, e Lago Azul com o bairro Nossa Senhora das Graças. Verificamos que há uma baixa correlação com a Avenida das Torres e Lago Azul. Contudo, com o Novo Aleixo os dados se ajustaram com uma alta correlação, bem com comportamento linear diretamente proporcional com coeficiente angular positivo muito próximo de 0 e coeficiente linear de 5 indicando o valor mínimo do Nspt com coeficiente $R^2 \approx 0,87$.

Gráfico 10 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Torres



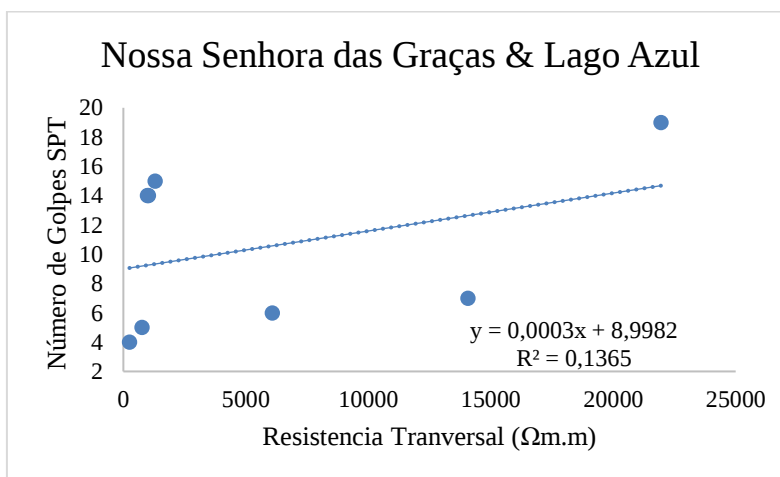
Fonte: Autor.

Gráfico 11 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Novo Aleixo



Fonte: Autor.

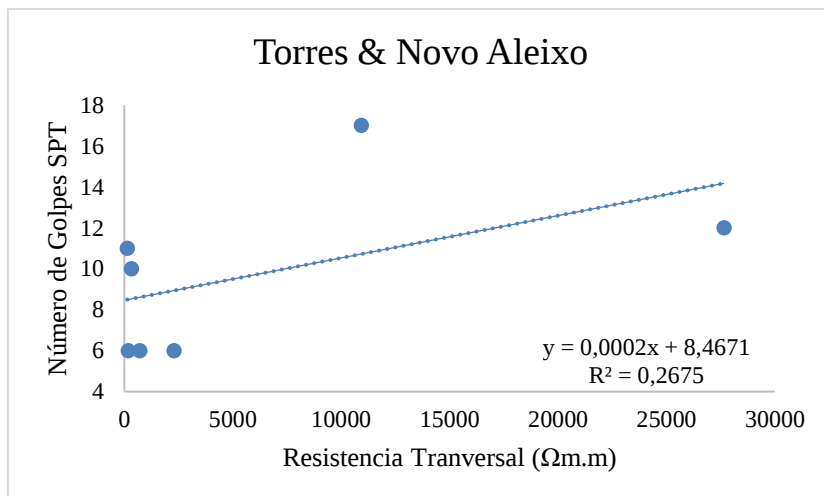
Gráfico 12 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Nossa Senhora das Graças e Lago Azul



Fonte: Autor.

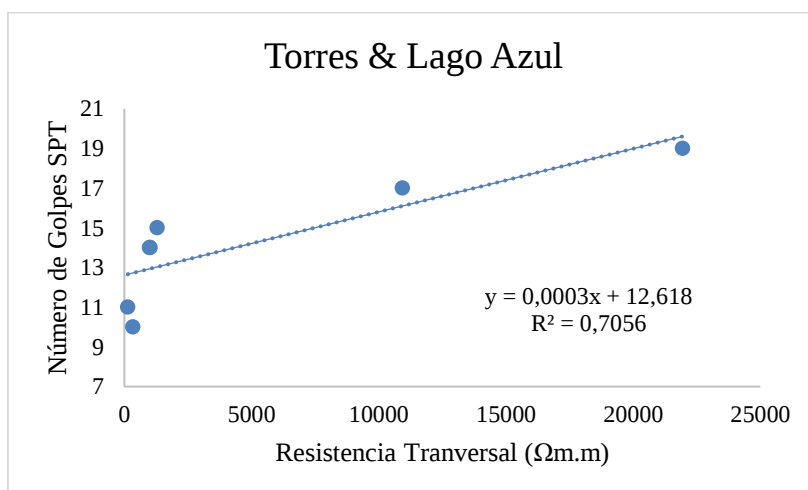
Observamos que os dados da região da Avenida das Torres têm baixa correlação com os dados do Novo Aleixo (Gráfico 13). Em comparação com o Lago Azul (Gráfico 14) obtivemos $R^2 \approx 0,71$ com comportamento linear diretamente proporcional e com coeficiente angular positivo muito próximo de 0 e coeficiente linear 12,6 indicando o valor mínimo de N_{spt} .

Gráfico 13 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Torres e Novo Aleixo



Fonte: Autor.

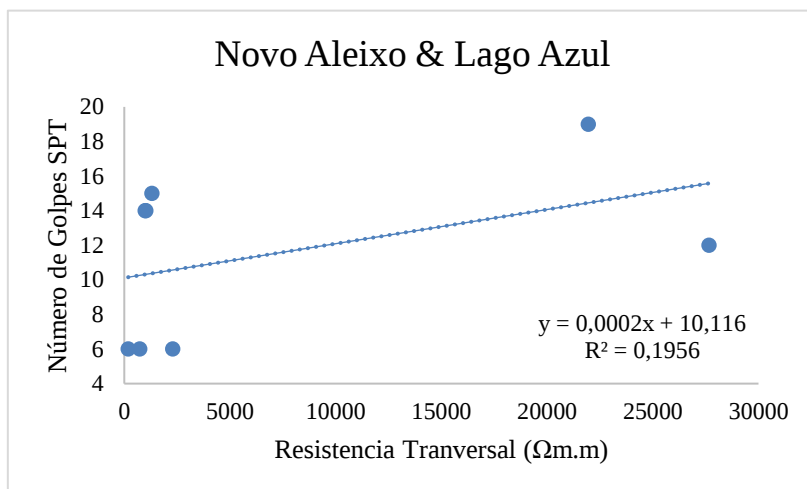
Gráfico 14 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Torres e Lago Azul



Fonte: Autor.

Já o Gráfico 15 descreve a correlação entre Novo Aleixo com Lago Azul cuja curva apresenta comportamento linear diretamente proporcional com coeficiente angular positivo muito próximo de 0 e coeficiente linear 10,12 indicando o valor mínimo do Nspt com $R^2 \approx 0,20$.

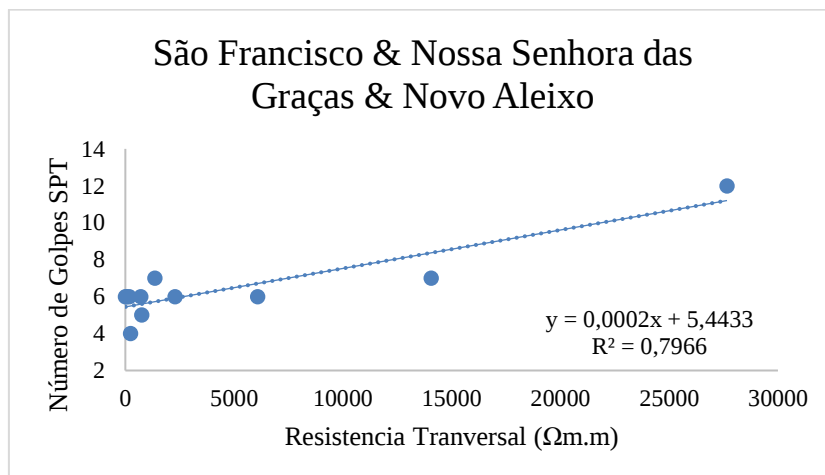
Gráfico 15 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de Novo Aleixo e Lago Azul



Fonte: Autor.

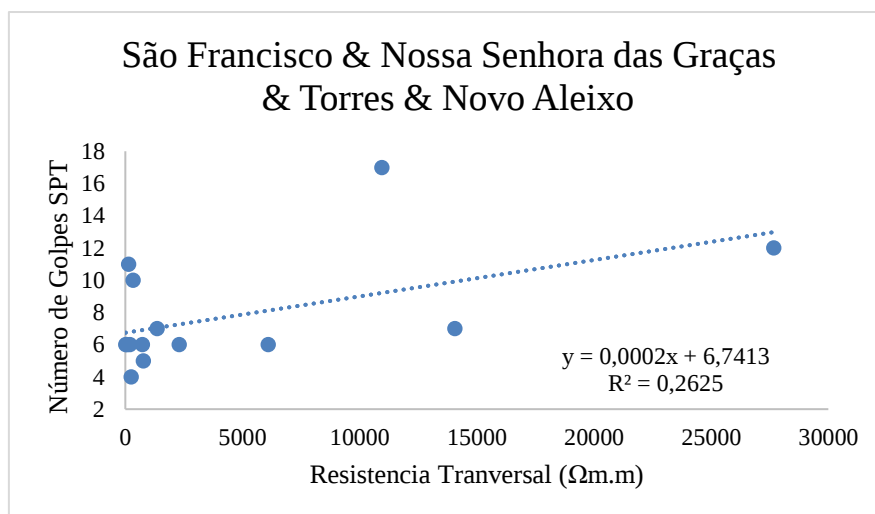
Os dados dos bairros São Francisco, Nossa Senhora das Graças e Novo Aleixo resultaram em uma boa correlação com coeficiente angular positivo muito próximo de 0 e coeficiente linear 5,4 indicando o valor mínimo de Nspt com $R^2 \approx 0,8$ (Gráfico 16). Acrescentando os dados de Avenida das Torres (Flores) temos a correlação com redução do coeficiente de determinação para $R^2 \approx 0,26$ (Gráfico 17), a reta permanece com o coeficiente angular em 0,0002 e o coeficiente linear aumenta para 6,7. Reunindo os dados de todas as regiões ao incluir o bairro Lago Azul a correlação apresenta redução do coeficiente de determinação para 0,21 com coeficiente angular aumentando para 0,0003 e coeficiente linear aumentando para 8,2 (Gráfico 18).

Gráfico 16 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças e Novo Aleixo



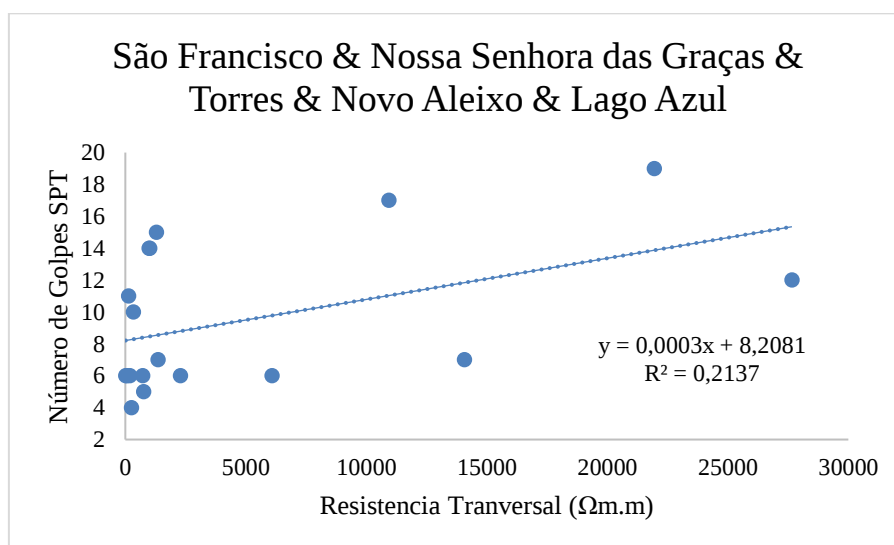
Fonte: Autor.

Gráfico 17 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres e Novo Aleixo



Fonte: Autor.

Gráfico 18 - Correlação dos dados de Resistencia Transversal com o Número de Golpes NSPT entre as regiões de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres, Novo Aleixo e Lago Azul



Fonte: Autor.

Ao todo foram realizadas 18 correlações (Tabela 5). Todas apresentam coeficiente angular muito próximo de zero indicando a pouca variação na composição entre os sedimentos ao longo da profundidade investigada, e o coeficiente linear variando entre 4 a 14 indicando ser este o mínimo Nspt. Dentre as equações da Tabela 4, podemos utilizar 10 equações com $R^2 > 0,7$ (em verde) isoladamente para cada bairro ou para um conjunto de bairros para estimar o Nspt a partir de T. Adicionalmente, dentre as correlações com $R^2 >$

0,7 para vários bairros em conjunto destacamos as seguintes relações lineares

$$Nspt = 0,0002T + 5,4433 \quad (4.1)$$

$$Nspt = 0,0003T + 12,618, \quad (4.2)$$

As eq. (4.1), (4.2) são as respectivas relações lineares com R^2 aproximados de 0,8 (Gráfico 16) e 0,71 (Gráfico 14). Estas equações representam os bairros estudados na porção centro sul e centro norte da cidade de Manaus (FIGURA 35). Ressaltamos estas equações porque podemos definir duas zonas distintas ou podemos utilizar uma equação somente para calcular $Nspt$ nas proximidades dos pontos investigados, contudo isto não invalida a utilização das demais equações da Tabela 5 para o cálculo de $Nspt$ em cada bairro isoladamente. Nas Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39 é exibido a localização e a extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida em cada um dos cinco bairros investigados: São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Flores, Novo Aleixo e Lago Azul respectivamente. A partir dos dados obtidos criamos um quadro interpretativo (TABELA 6) relacionando T , $Nspt$, consistência e litologia para furos de sondagem nos bairros.

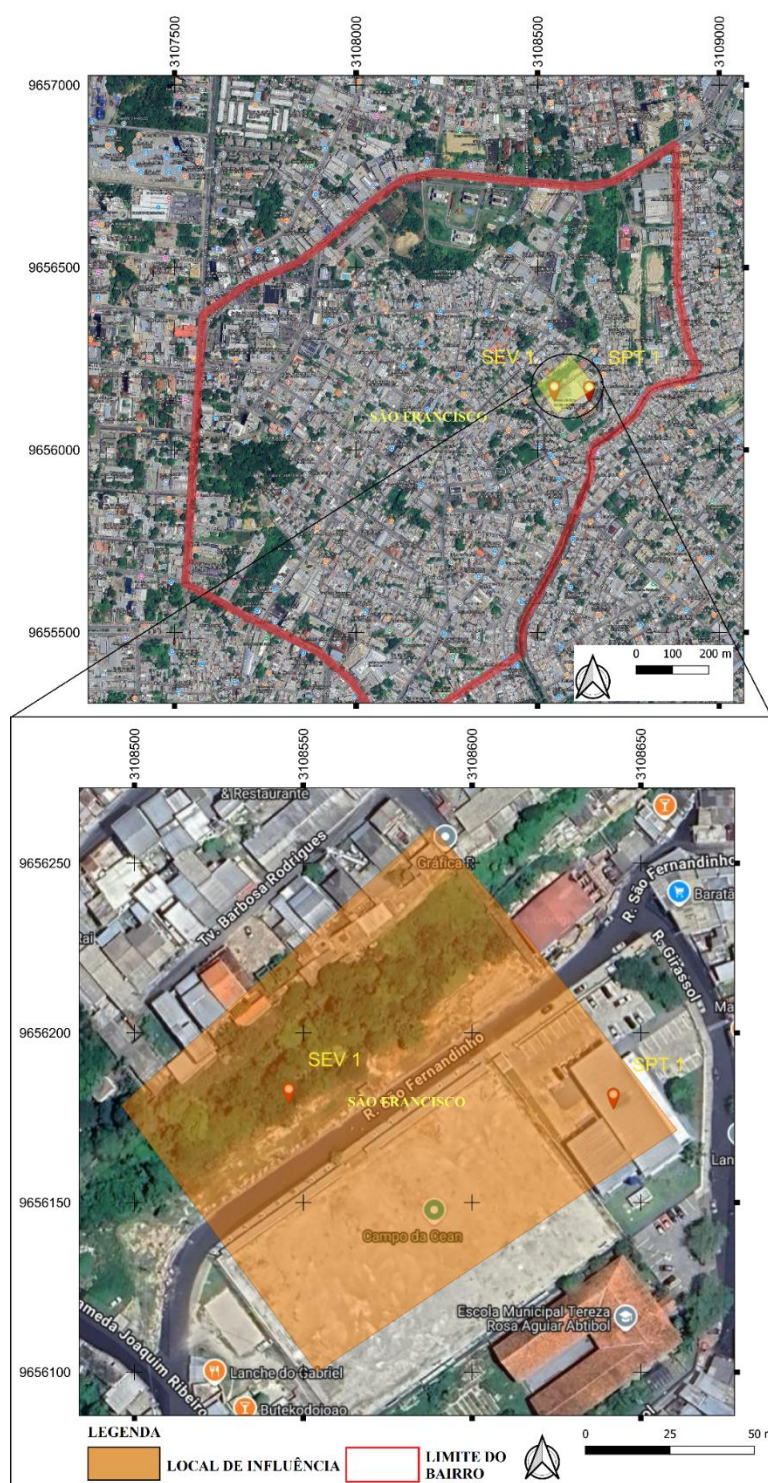
Tabela 5 - Lista de relações lineares entre Resistencia Transversal T com o Número de Golpes $Nspt$ para os bairros de São Francisco, Nossa Senhora das Graças, Torres, Novo Aleixo e Lago Azul. Linhas em verde indicam $R^2 > 0,7$

Relação	Região	R^2
$Nspt = 0,0008T + 5,9729$	São Francisco	0,9989
$Nspt = 0,0002T + 5,7676$	Novo Aleixo	0,9955
$Nspt = 0,0006T + 10,364$	Torres	0,9782
$Nspt = 0,0002T + 6,0018$	São Francisco & Novo Aleixo	0,9743
$Nspt = 0,0002T + 14,084$	Lago Azul	0,9658
$Nspt = 0,0002T + 4,4992$	Nossa Senhora das Graças	0,8852
$Nspt = 0,0002T + 5,0138$	Nossa Senhora das Graças & Novo	0,8732

Aleixo		
$Nspt = 0,0002T + 5,4433$	São Francisco & Nossa Senhora das Graças & Novo Aleixo (REGIÃO CENTRO SUL)	0,7966
$Nspt = 0,0008T + 7,7113$	São Francisco & Torres	0,7361
$Nspt = 0,0003T + 12,618$	Torres & Lago Azul (REGIÃO CENTRO NORTE)	0,7056
$Nspt = 0,0004T + 9,9342$	São Francisco & Lago Azul	0,4404
$Nspt = 0,0001T + 5,516$	São Francisco & Nossa Senhora das Graças	0,2683
$Nspt = 0,0002T + 8,4671$	Torres & Novo Aleixo	0,2675
$Nspt = 0,0002T + 6,7413$	São Francisco & Nossa Senhora das Graças & Torres & Novo Aleixo	0,2625
$Nspt = 0,0003T + 8,2081$	São Francisco & Nossa Senhora das Graças & Torres & Novo Aleixo & Lago Azul	0,2137
$Nspt = 0,0002T + 10,116$	Novo Aleixo & Lago Azul	0,1956
$Nspt = 0,0003T + 8,9982$	Nossa Senhora das Graças & Lago Azul	0,1365
$Nspt = 0,0003T + 7,3982$	Nossa Senhora das Graças & Torres	0,1065

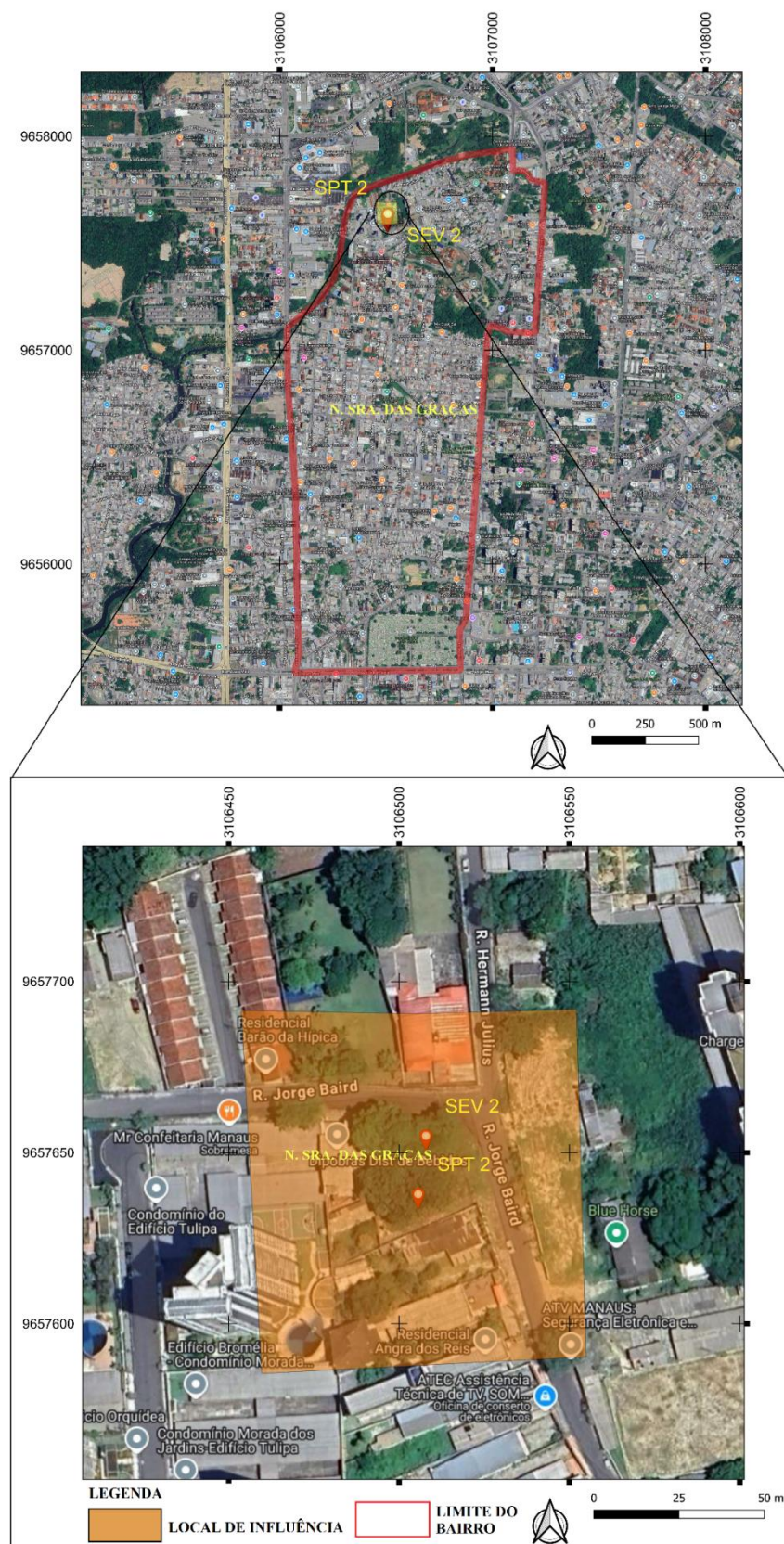
Fonte: Autor.

Figura 35 – Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de São Francisco



Fonte: Autor.

Figura 36 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Nossa Senhora das Graças



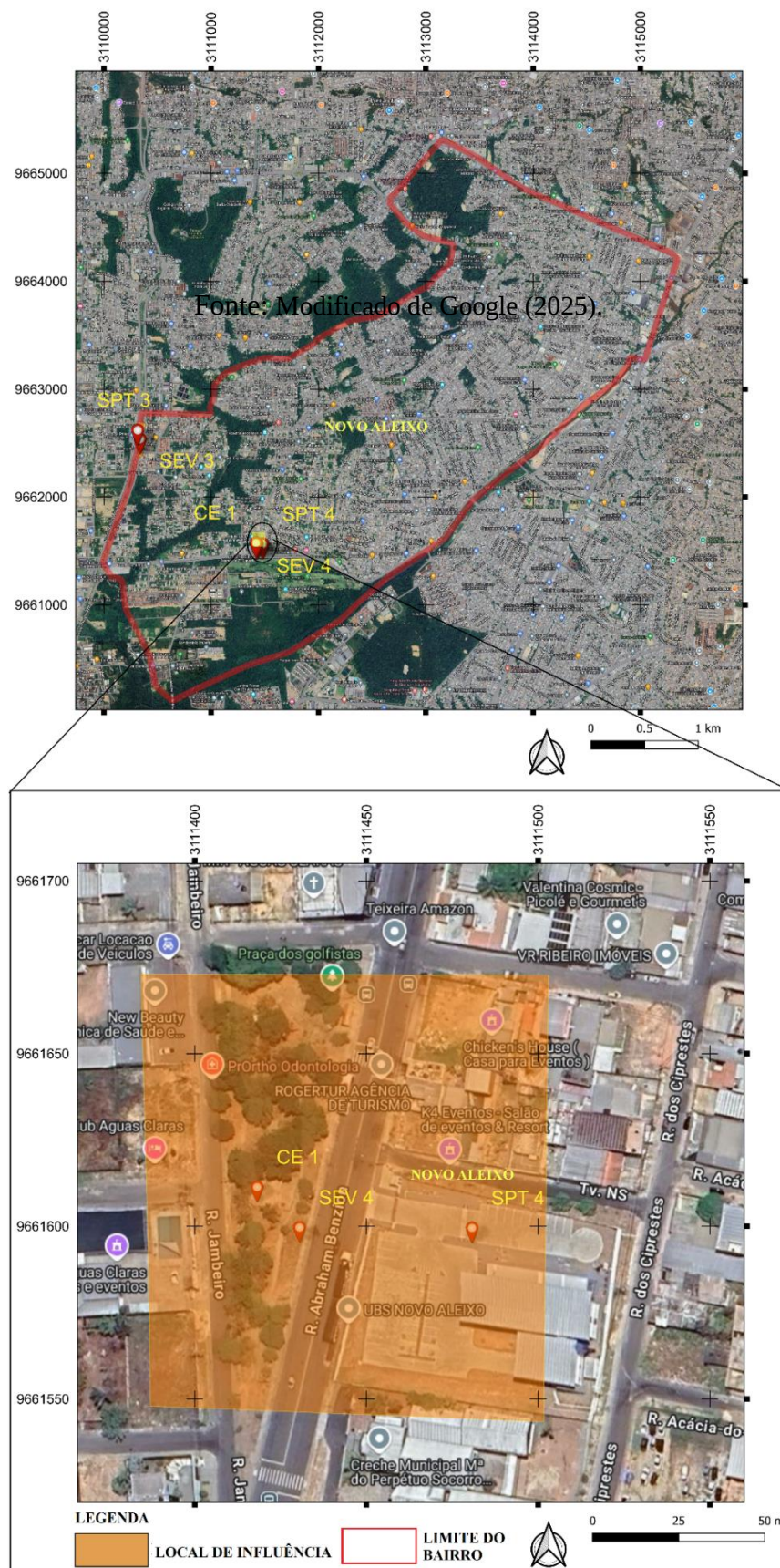
Fonte: Autor.

Figura 37 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Flores



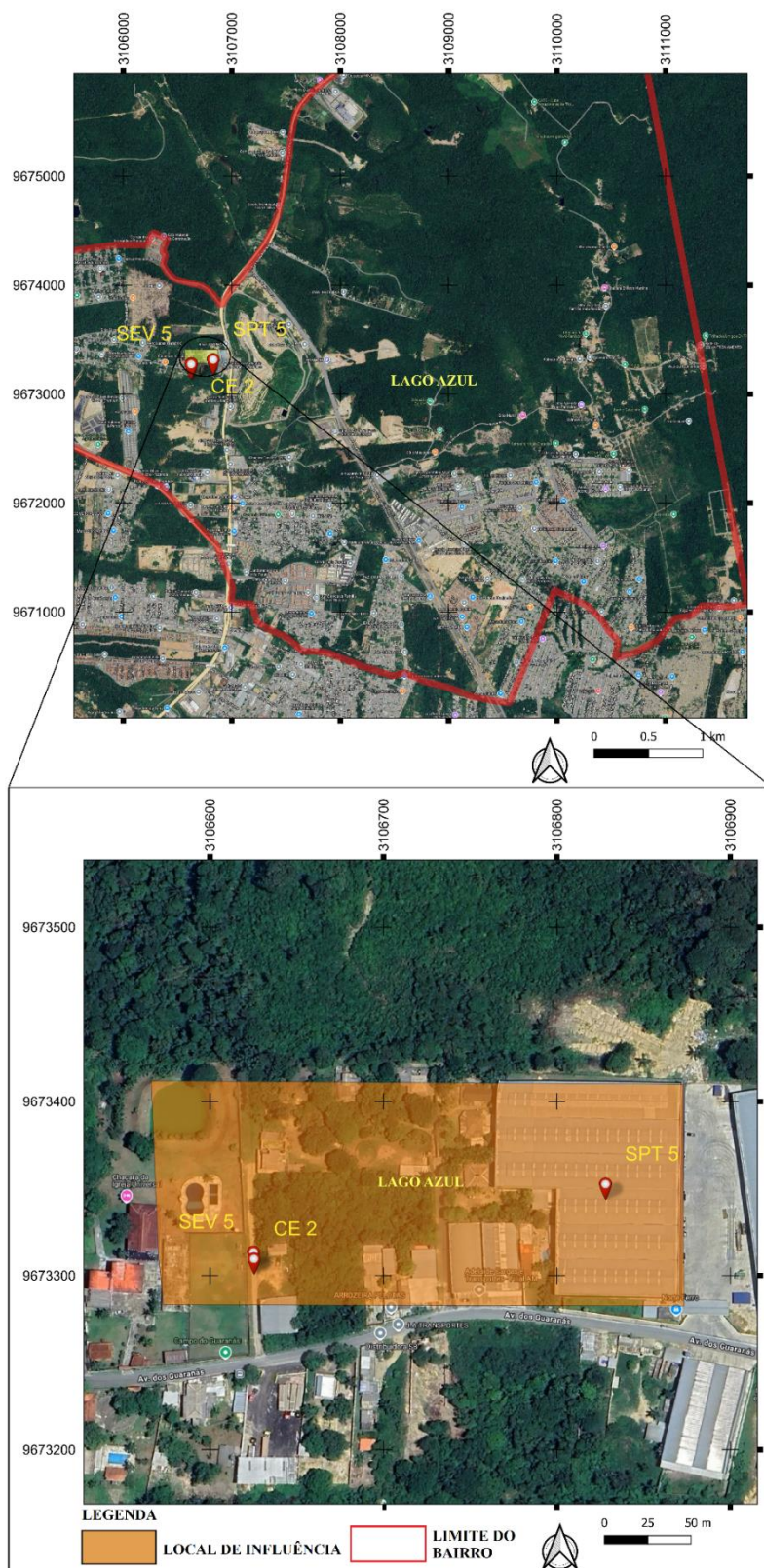
Fonte: Autor.

Figura 38 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Novo Aleixo



Fonte: Autor.

Figura 39 - Localização e extensão da área de influência válida ao redor dos pontos de investigação para a correlação desenvolvida no Bairro de Lago Azul



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Quadro de orientação para a interpretação de futuros furos de sondagens realizados nas regiões da cidade de Manaus onde as investigações foram realizadas

Litologia	Consistência	Nspt	Resistencia Transversal (Ωm^2)
Argila	Rija	10	300
Argila Arenosa	Rija	6	700
Argila Arenosa	Dura	19	20.000
Argila Arenosa	Média	6 - 14	150 – 1.000
Argila Pouco Arenosa	Média	14	1.000
Areia	Compacta	17	10.000
Areia	Pouco Compacta	4 - 5	250 – 750
Areia Saturada	Compacta	11	150
Areia Siltosa	Medianamente Compacta	12	25.000
Areia Siltosa	Pouco Compacta	6 - 7	1350 - 2.250
Areia Siltosa	Fofa	6	10 - 50
Areia Pouco Siltosa Saturada Fina e Média	Compacta	6	6.000
Areia Pouco Siltosa Saturada Fina e Grossa	Compacta	7	14.000

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

A geotecnia é a área da engenharia civil que estuda o comportamento do solo e das rochas em relação às obras civis. Esse campo abrange desde a caracterização dos materiais do subsolo até a avaliação de sua capacidade de suportar cargas e resistir a deformações. Em regiões como Manaus, onde seu Latossolo é heterogêneo e altamente intemperizado, a geotecnia desempenha um papel crítico na mitigação de riscos e na viabilidade de projetos de engenharia. Nesse contexto, a eletrorresistividade, um método geofísico indireto, tem se mostrado uma ferramenta valiosa na geotecnia ao permitir a investigação do subsolo de forma não invasiva. Essa integração possibilita a obtenção de dados sobre a estratigrafia e propriedades mecânicas do subsolo em áreas onde métodos convencionais, como o ensaio NSPT, podem ser limitados ou de difícil execução. Dessa forma, o uso combinado de dados geoeletricos e geotécnicos contribui para uma melhor compreensão das condições do terreno, auxiliando na tomada de decisões mais embasadas para projetos de engenharia.

Neste trabalho, foram desenvolvidas novas relações entre a Resistência Transversal T de Dar Zarrouk, obtida pela eletrorresistividade e o Índice de Resistência à Penetração (N_{spt}), obtidos por ensaios SPT, um para cada uma das 5 regiões investigadas na cidade de Manaus. Realizamos a aquisição de 5 Sondagens Elétricas Verticais ao todo, 2 Caminhamentos Elétricos e obtivemos o N_{spt} de 5 boletins SPT, um para cada bairro investigado. Os resultados obtidos demonstram que as relações propostas são adequadas para os bairros pois elas possuem alta correlação, observou-se que com exceção da correlação referente à região de Nossa Senhora das Graças as demais correlações apresentavam maior coeficiente de determinação à medida que a distância entre o furo de sondagem e o ponto de SEV era menor. Obtivemos 10 equações que podem ser utilizadas em pontos nos arredores dos bairros. Devido à heterogeneidade do Latossolo da cidade, boas correlações $T \times N_{spt}$ foram obtidas também entre bairros próximos e, assim, pudemos zonear a cidade com equações para cada setor. Com base nos dados de campo foi produzido também um quadro interpretativo com litologia e consistência do subsolo da cidade a partir de valores de T . Contudo faz-se necessário que haja a aquisição de mais dados de campo em cada região estudada para aprimorar as correlações de forma que possam ser mais representativas de cada bairro investigado.

Estas novas relações lineares reforçam o potencial da integração de métodos indiretos, como a eletrorresistividade, com ensaios de campo convencionais para estudos de engenharia geotécnica em áreas urbanas da Amazônia. Além disso, as novas relações estabelecidas podem servir como uma base inicial para a criação de modelos preditivos que auxiliem no planejamento de fundações, obras de infraestrutura e estudos de risco geotécnico. Para trabalhos futuros sugerimos o cálculo das relações $T \times N_{spt}$ para toda a zona urbana de Manaus e a utilização de outros métodos como Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) e tomografia de refração para complementação de resultados de ensaios geotécnicos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484-2001, Solo: Sondagens de Simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- AECWEB. O que é Sondagem de Solo. Revista Digital. 2015. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/sondagem-de-solo-ajuda-a-evitar-problemas-de-fundacao/11828>. Acesso em: 14 dez. 2022.
- AL-FARES, W.; BAKALOWICZ, M.; GUÉRIN, R.; DUKHAN, M. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, v. 51, n. 2-4, p. 97-106, 2002.
- ANCHUELA, O. P.; FRONGIA, P.; GREGORIO, F. D.; SAINZ, A. M. C.; JUAN, A. P. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy). **Engineering Geology**, v. 237, p. 129-139, 2018.
- ARCHIE, G.E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. **Transactions of the AIME**, v. 146, p. 54-62, 1942.
- ASPEG Engenharia Civil e Geotécnica. 2018. Disponível em: <https://www.facebook.com/aspeg.com.br/photos/o-que-é-a-sondagem-à-percussão-sondagem-a-percussão-ou-sondagem-spt-é-um-método/2023544164352379/>. Acesso em: 21 de ago. 2024.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080-04, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**, Pensilvânia: ASTM, 2012.
- BALAMAHESWARI, M.; PREMALATHA, K. Establishing the Correlations Between Electrical Resistivity and SPT N in Sandy Soils. **EasyChair Preprint**, v. 10327, 2023.
- BERGONZONI, F. A. **Aplicação da técnica de imageamento elétrico e caracterização geológico-geotécnica de área potencialmente cárstica em Cajamar/SP**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Cajamar, São Paulo, 2018.
- BIGMAN, D. P.; DAY, D. J. **Ground penetrating radar inspection of a large concrete spillway: A case-study using SFCW GPR at a hydroelectric dam**. In: BIGMAN, D. P.; DAY, D. J. *Construction Materials*, 2022, v. 16, e00975.
- BINLEY, ANDREW; SLATER, LEE. **Resistivity and Induced Polarization: Theory and Applications to the Near – Surface Earth**. Cambridge – New York, USA: Cambridge University Press, 2020. ISBN 978-1-108-49274-4 Hardback.
- BOBACHEV, ALEXEY. **IPI2Win – Resistivity Sounding Interpretation**: Software livre para Windows para interpretação 1D de sondagens elétricas verticais. Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. Versão 3.0.3 a 7.01.03 (1990 – 2003).

Disponível em: <http://geophys01.geol.msu.ru/ipi2win.htm>. Acesso em: 21 ago. 2024.

BOWLING, J. C.; RODRIGUEZ, A. B.; HARRY, D. L.; ZHENG, C. Delineating Alluvial Aquifer Heterogeneity Using Resistivity and GPR Data. **Groundwater. NGWA**, v. 46, n. 6, p. 890 – 903, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00103.x>.

BRADFORD, J. Gpr Offset Dependent Reflectivity Analysis For Characterization Of A High-Conductivity Lnapl Plume. In: EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, European Association of Geoscientists & Engineers, 16., 2003, EUA. **Anais [...]**. EUA: European Association of Geoscientists & Engineers, 2003. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.190.con08>.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRAGA, A., MALAGUTTI FILHO, W., DOURADO, J., CHANG, H. K. Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. **J. Environ. Eng. Geophys.** v. 4, n. 2, p. 123–130, 1999. DOI:10.4133/JEEG4.2.123.

CAPUTO, MARIO VINCENTE. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. University of California Santa Barbara. 1984. Tese de Doutorado (Programa de Doutorado em Geologia) - Universidade da Califórnia, College of Letters and Science, Santa Barbara, 1984. 586 p.

CAPUTO, MARIO VINCENTE. **Bacia do Amazonas: estratigrafia, tectônica e magmatismo**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2014.

CARVALHO, A. S.; SOUZA, V. S.; FERNANDES FILHO, L. A.; NOGUEIRA, A. C. R. A geologia da região de Manaus. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 8., 2003, Manaus – AM. **Anais [...]**. Manaus: 2003, 9 – 13 de nov.

CASTRO, BRUNO CARRILHO.; GARCIA, ANDRESSA FAQUINELLI.; GONDO, GUSTAVO HARUO BELTRAN.; MARQUES, SAMUEL DE FRANÇA.; SOUSA, MARCOS VINICIUS.; QUEIROZ, JANAÍNA SANTANA.; REINALDO, RAYDEL LORENZO. Perfis geotécnicos da cidade de Palmas – TO por meio de sondagens SPT e ensaios geofísicos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRASEGM, 18., 2016, Belo Horizonte – Minas Gerais. **Anais [...]**. Belo Horizonte: A Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016. 19 – 22 de out.

CASTRO, DAVID LOPES. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2024. Disponível em: <https://files.passeidireto.com/d597f4d2-51cc-4d36-833b-6953f59b0802/bga.png>. Acesso em: 28 ago. 2024.

COSTA, JOSUE DA SILVA.; SANTOS, HELDER MANUEL DA COSTA.; DEHAINI, JAMILE. Utilização de eletroresistividade e sondagem geotécnica na caracterização de solos em área de expansão urbana de Manaus/am. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 17., 2021, Belo Horizonte – Minas Gerais. **Anais [...]**. Belo Horizonte: 2021, 26 a 29 de set.

COLTAN JR. DEGEO – Departamento de Geociências. Disponível em: <https://degeo.ufam.edu.br/pibic.html>. Acesso em: 04 dez. 2024.

COUTO JUNIOR, MARCO ANTONIO. Hydrogeoelectrical Characterization of Termas de Ibira Region, Parana Basin, by 1D Joint Inversion of TDEM/VES Soundings. Scientific Figure on **ResearchGate**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-18-Esquema-do-arranjo-Schlumberger-Afasta-se-os-eletrodos-A-e-B-eletrodos-de_fig2_281605365. Acesso em: 21 ago. 2024.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas**. Amazonas: CPRM, 2006. 1 mapa. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/2967>. Acesso em: 3 dez. 2024.

CUNHA, PAULO ROBERTO DA CRUZ; MELO, JOSE HENRIQUE GONÇALVES; SILVA, OSVALDO BRAGA. **Bacia do Amazonas**. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro: Petrobras, 2007. v. 15, n. 2, p. 227-251.

DAS, BRAJA M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6ª edição norte americana. Tradução All Tasks. Revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEVI, A., ISRAIL, M., ANBALAGAN, R., GUPTA, P.K., 2017. Subsurface soil characterization using geoelectrical and geotechnical investigation at bridge site in Uttarakhand Himalayan region. **J. Appl. Geophys.** v. 144, p. 78–85. DOI:10.1016/j.jappgeo.2017.07.005.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 040-95, Prospecção geofísica pelo método de eletrorresistividade**, Brasília: DNER, 1995.

EVEREST GEOPHYSICS. Métodos Elétricos. Sondagem Elétrica Vertical. Disponível em: <https://everestgeophysics.com/es/metodos/electricos/sondeo-electrico-vertical/>. Acesso em: 21 ago. 2024.

FERNANDES FILHO, LUCINDO ANTUNES. **Geologia, mineralogia, geoquímica dos lateritos de Manaus - AM**. 1996. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência na área de Geoquímica e Petrologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 1996.

FARIAS, E. S.; MACHADO, S. L.; GIACHETI, H. L. Integrated use of georadar, electrical resistivity, and SPT for site characterization and water content estimative. **Soils and Rocks**, v. 46, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2023.006422>.

GIAO, P. & CHUNG, SUNG & KIM, D.Y & TANAKA, H. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. **Journal of Applied Geophysics**. v. 52, p. 157-175, 2003. 10.1016/S0926-9851(03)00002-8.

GLOAGUEN, E.; CHOUTEAU, M.; MARCOTTE, D.; CHAPUIS, R. Estimation of hydraulic conductivity of an unconfined aquifer using cokriging of GPR and hydrostratigraphic data. **Journal of Applied Geophysics**. v. 47, n. 2, p. 135-152, 2001. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00057-X).

GOOGLE SATELLITE HYBRID. Google LLC. SRC EPSG: 3857 – WGS 84 / Pseudo-Mercator. 2024. Disponível em: <https://mt1.google.com/vt/lyrs=y&x={x}&y={y}&z={z}>. Acesso em: 04 dez. 2024.

GONÇALVES, JULIANA TELES DINIZ. **Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaio SPT na investigação de perfis de solos da região metropolitana de Salvador (RMS)**. 2019. Trabalho de Dissertação do Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

GONÇALVES, JULIANA TELES DINIZ; BOTELHO, MARCO ANTONIO BARSOTTELLI. Integração de sondagens geofísicas de eletrorresistividade e sondagens geotécnicas SPT: estudo de caso em aterro na via expressa BA-093. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 16., 2018, São Paulo – SP. **Anais [...]**. São Paulo: 2018, 2 – 5 de set.

GONÇALVES, JULIANA TELES DINIZ; BOTELHO, MARCO ANTONIO BARSOTTELLI; MACHADO, SANDRO LEMOS; NETTO, LEONIDES GUIRELI. Correlation between field electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts at tropical soils in Brazil. **Environmental Challenges**, v. 5, 2021, 100220.

GUETING, N.; VIENKEN, T.; KLOTZSCHE, A.; KRUK, J. V. D.; VANDERBORGHT, J.; CAERS, J.; VEREECKEN, H.; ENGLERT, A. High resolution aquifer characterization using crosshole GPR full-waveform tomography: Comparison with direct-push and tracer test data. **Water Resources Research**, v. 53, n. 1, p. 49 -72, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016WR019498>.

HADAMARD, J. **Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique**. Princeton: Bull Princeton Univ., v. 13, p. L-20. 1902.

HUGENSCHMIDT, J.; MASTRANGELO, R. GPR inspection of concrete bridges. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 4, p. 384-392, 2006.

IMPLURB. Mapa temáticos. Instituto Municipal de Planejamento Urbano. Disponível em: <https://www2.manaus.am.gov.br/docs/portal/secretarias/implurb/Mapas%20Tem%C3%A1ticos/2021/MAPA%20ANEXO%20I%20-%20ZONA%20EXPANS%C3%83O%20URBANA%20E%20ZONA%20URBANA.pdf/.>> Acesso em: 06 jan. 2023.

JOHNSON, T. C.; ROUTH, P. S.; BARRASH, W.; KNOLL, M. D. A field comparison of Fresnel zone and ray-based GPR attenuation-difference tomography for time-lapse imaging of electrically anomalous tracer or contaminant plumes. **Geophysics**, v. 72, n. 2, p. 21–29, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2431638>.

KANNAN, R. C. Designing foundations around sinkholes. **Engineering Geology**, v. 52, p. 75 – 82, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00057-X).

KARIMINEJAD, N.; SEPEHR, A.; BERNATEK – JAKIEL, A.; NADAL – ROMERO, E.; RASHTI, M. R. Ecological engineers or underground plumbers? Mechanisms of the biological activities in controlling soil pipes and gully headcuts. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 595, 2023.

KEAREY, PHILIP; BROOKS, MICHAEL; HILL, IAN. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de textos, 2009.

KULHAWY, F. H.; MAYNE, P. W. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design**. Palo Alto, Calif: Electric Power Research Institute EL-6800, 1990, Project 1493-6.

LALAGUE, A., LEBENS, M.A., HOFF, I. ET AL. Detection of rockfall on a tunnel concrete lining with ground-penetrating radar (GPR). **Rock Mech Rock Eng**, v. 49, p. 2811–2823, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0943-y>.

LIMA, M. Goutte -; CARVALHO, J. Camapum de; FROTA, Consuelo Alves da. Étude des caractéristiques géotechniques et d'érodabilité des sols de la ville de Manaus (Brésil). **Revue Française de Géotechnique**, Lorraine, FRA, v. 123, n. 1, p.3-13, 1 mar. 2008. Trimestral.

LIU, H.; XIE, X.; CUI, J.; TAKAHASHI, K.; SATO, M. Groundwater Level Monitoring for Hydraulic Characterization of an Unconfined Aquifer by Common Mid-point Measurements using GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 19, n. 4, p. 259–268, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2113/JEEG19.4.259>.

LOUREIRO, ELAINE; JANNUZZI, JULIANA; FROTA, SAUDINO, CIBELE. **Bacia do Amazonas: sumário geológico e setores em oferta**. Brasília: Superintendência de avaliação geológica e econômica. Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis, 2021.

LU, Q., SATO, M. Estimation of Hydraulic Property of an Unconfined Aquifer by GPR. **Sens Imaging**, v. 8, p. 83–99, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-007-0035-x>.

LYNNE, B. Y.; HEASLER, H.; JAWOROWSKI, C.; SMITH, I. J.; SMITH, G. J.; FOLEY, D. Ground penetrating radar imaging of old faithful geyser vent, yellowstone national park, USA. In: New Zealand Geothermal Workshop, 38., 2016, Auckland, New Zealand. **Anais [...]**. Auckland, New Zealand: 2016.

MAIA, MARIA ADELAIDE MANSINI; MARMOS, JOSÉ LUIZ (Org.). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2010. [275] p. il., color.

MAILLET, R. The Fundamental Equations of Electrical Prospecting. **Geophysics**, vol. 12, n. 4. 1947. p. 529-556. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1437342>.

MARCAK, H., GOŁĘBIEWSKI, T. Changes of GPR spectra due to the presence of hydrocarbon contamination in the ground A stochastic interpretation of GPR data concerning the location of hydrocarbon plumes. **Near Surface Geophysics**, v. 4, n. 3, p. 163-176, 2006. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005042>.

MARCAK, H., GOŁĘBIEWSKI, T. Changes of GPR spectra due to the presence of

hydrocarbon contamination in the ground. **Acta Geophys**, v. 56, p. 485–504, 2008. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0003-4>.

MAXWELL, M.; SCHMOK, J. Detection And Mapping Of An Lnapl Plume Using GPR: A Case Study. *In: EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, European Association of Geoscientists & Engineers, 8., 1995, EUA. Anais [...].* EUA: 1995. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.206.1995_002.

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S. Devonian-Early Carboniferous miospore biostratigraphy of the Amazon Basin, Northern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology: an international journal, Amsterdam**, v. 124, n. 3-4, p. 131-202, May/2003.

NERY, GERALDO GIRÃO. **Perfilagem Geofísica em Poço Aberto: Fundamentos básicos com ênfase em petróleo**. Rio de Janeiro: SBGf, 2013. 222 pp.

OH, S.; SUN, C. G. Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. **Environmental Geology**, 54, p. 31 – 42. 2008.

OLAYINKA, L. A.; LAWAL, K. M.; AHMED, A. L.; AREMU, B. G.; ABUBAKAR, F.; USMAN, A.; DANIEL, E. Correlation of geoelectrical and geotechnical parameters of data obtained from geophysical survey conducted at Ahmadu Bello University Phase II, Zaria, Nigeria. **Applied Journal of Physical Science**. Benin – Nigéria. v. 1, n. 2, Agosto 2019. p. 14-23.

OLIVEIRA, JOÃO BERTOLDO DE. **Pedologia Aplicada**. Jaboticabal, SP: Fundação de Apoio A Pesquisa, Ensino e Extensão, 2001.

ORTEGA-RAMÍREZ, J.; BANO, M.; CORDERO-ARCE, M. T.; VILLA-ALVARADO, L. A.; CHAVEZ FRAGA, C. Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study. **Journal of Applied Geophysics**, v. 174, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103958>.

OZ DIAGNÓSTICO. Disponível em: <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20028.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

PALMA, K. A. L.; WAHNFRIED, I. D.; FERNANDES FILHO, L. A. “ARENITO MANAUS”: CONSIDERAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 13., 2013, Belém – Pará. **Anais [...].** Belém: 2013, 22 – 26 de set.

PARKINSON, G.; ÉKES, C. Ground Penetrating Radar Evaluation of Concrete Tunnel Linings. *In: International Conference on Ground Penetrating Radar*, 12., 2008, Birmingham, UK. **Anais [...].** Birmingham, UK: 2008.

PENG, M.; WANG, D.; LIU, L.; SHI, Z.; SHEN, J.; MA, F. Recent advances in the GPR detection of grouting defects behind shield tunnel segments. **Remote Sensing**, v. 13, n. 22, p. 45-96, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13224596>.

PEREIRA, CAIO. Sondagem SPT: O que é e como é feito esse ensaio. Escola Engenharia. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/sondagem-spt/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

PICANÇO, HELENA MARINHO. **Incorporação de resíduo cerâmico a um solo argiloso superficial de Manaus visando seu emprego em pavimentos**. 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2012.

PING, W.; ZHENQI, H.; YANLING, Z.; XINJU, L. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. **Journal of Applied Geophysics**, v. 126, p. 128–137, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.019>.

PINTO, CARLOS DE SOUSA. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORSANI, J. L.; FILHO, W. M.; ELIS, V. R.; SHIMELES, F.; DOURADO, J. C.; MOURA, H. P. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 55, n. 3-4, p. 199-209, 2004.

PORSANI, J. L.; JESUS, F. A. N.; STANGARI, M. C. GPR Survey on an Iron Mining Area after the Collapse of the Tailings Dam I at the Córrego do Feijão Mine in Brumadinho-MG, Brazil. **Remote Sens**, v. 11, n. 7, p. 8-60, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11070860>.

QIN, H.; ZHANG, D.; TANG, Y.; WANG, Y. Automatic recognition of tunnel lining elements from GPR images using deep convolutional networks with data augmentation. **Automation in Construction**. Elsevier, v. 130, n. 103830, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103830>.

REIS, NELSON JOAQUIM; ALMEIDA, MARCELO ESTEVES; RIKER, SILVIO LOPES; FERREIRA, AMARO LUIZ. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas**. Manaus, AM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais Serviço Geológico do Brasil, 2006.

ROCHA, BRENO PADOVEZI.; MORAIS, THAISE DA SILVA OLIVEIRA.; RODRIGUES, ROGER AUGUSTO.; ESQUIVEL, EDMUNDO ROGÉRIO.; GIACHETI, HERALDO LUIZ. Considerações sobre a execução e a interpretação de ensaios SPT. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – II Feira da Indústria de Fundações e Geotecnia – SEFE, 8., 2015, São Paulo – SP. **Anais [...]**. São Paulo: Acqua Consultoria, 2015. 23 – 25 de jun.

SARIBUDAK, M. Don't Mess with a Geophysicist's House: A Case Study of Ground Penetrating Radar (3D) for Concrete Moisture Mapping and Void Detection in the Saturated Soil beneath the Concrete Foundation. **Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions**, p. 365 – 374, 2012.

SAUCK, W A. A review of ground penetrating radar applications for engineering/environmental site characterization. **Geological Society of America**, v. 26, n. 5, 1994. Disponível em < <https://www.osti.gov/biblio/6837883>>, acesso em 01 de fevereiro de 2024.

SCHETTINI, L. **Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do aterro sanitário de São Carlos – SP, com o auxílio da geofísica**. 2016. Trabalho de Dissertação do Curso de Mestrado em Ciências da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São

Paulo, São Carlos, 2016.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SEIMETZ, EDUARDO XAVIER.; ROCHA, MARCELO PERES.; BORGES, WELITOM RODRIGUES.; CUNHA, LUCIANO SOARES.; NOGUEIRA, PEDRO VENCOVSKI.; CAVALCANTE, MARCIO MACIEL.; AZEVEDO, PAULO ARAÚJO. Estudos geofísicos ao longo do futuro trecho norte do metrô de Brasília: Resultados Preliminares. *In: Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 4., 2010, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: European Association of Geoscientists & Engineers, 2010, cp 197-00091. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.197.SBGF_2288.

SHAO, S., GAO, C., GUO, X. et al. Mapping the contaminant plume of an abandoned hydrocarbon disposal site with geophysical and geochemical methods, Jiangsu, China. **Environ Sci Pollut Res**, v. 26, p. 24645–24657, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05780-0>.

SILVA, MIQUÉAS BARROSO. **Análise gravimétrica de uma anomalia morfoestrutural na cidade Manaus-AM**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus AM, 2010.

SIMÕES, M. A. Lei de Ohm - Slides da Aula. 2019. Disponível em: http://masimoes.pro.br/fisica_el/a03/Lei%20de%20Ohm%20-%20Slides%20da%20aula.pdf. Acesso em: 03 out. 2024.

SOUZA, PEREIRA ANTONIO LUIZ; GANDOLFO, OTAVIO COARACY BRASIL. **Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente: Manual de Boas Práticas**. 1 ed. São Paulo: ABGE, 2021.

SUDHA, KUMARI; ISRAIL, M.; MITTAL, S.; RAI, J. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. **Journal of Applied Geophysics**. Amsterdã – Holanda, vol. 67, 2009. p. 74-79.

SURYO, EKO ANDI; GALLAGE, CHAMINDA; TRIGUNARSYAH, BAMBANG; MOCHTAR, B. INDRASURYA; SOEMITRO, RIA ASIH ARYANI. Application of Electrical Resistivity Method to detect Deep Cracks in Unsaturated Residual Soil Slope. *In: Soralump, S, Mairaing, W, Jotisankasa, A, & Sawangsuriya, A (Eds.) Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, 5., 2011, Tailândia. **Anais [...]**. Tailândia: 2011, p. 901-906.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TOSTI, F.; FERRANTE, C. Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures. **Surv Geophys**, v. 41, p. 485–530, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09565-5>.

TOSTI, F.; SLOB, E. Determination, by Using GPR, of the Volumetric Water Content in Structures, Substructures, Foundations and Soil. *In: Benedetto, A., Pajewski, L. (eds) Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. **Springer Transactions in Civil and**

Environmental Engineering. Springer, Cham, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0_7.

TREFETHEN, J. M. **Geology for Engineers, By Joseph M. Trefethen**. EUA: Van Nostrand Reinhold Inc., 1968.

VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; HUBER, E.; TAVARES, S. R. L.; MARQUES, F. A.; SILVA, M. S. L. Ground penetrating radar (GPR) models of the regolith and water reservoir of an underground dam in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Geophysics**, v. 206, n. 104797, 2022.

XIANG, L.; ZHOU, H. L.; SHU, Z.; TAN, S. H.; LIANG, G. Q.; ZHU, J. GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study. **NDT & E International**, v. 59, p. 68 – 76, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.004>.

XU, X.; ZENG, Z.; LI, D.; WU, J.; WU, X.; SHEN, J. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. **Engineering Geology**, v. 101, n. 1-4, p. 31-42, 2010.

WANDERLEY FILHO, J. R.; MELO, J. H. G.; FONSECA, V. M. M.; MACHADO, D. M. C. **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Amazonas**. Phoenix, Aracajú: ano 7, n. 82, 2005.

APÊNDICE A – Planilha de Sondagem Elétrica Vertical

Figura A1 – Planilha de SEV utilizada no trabalho.

AB/2 (m)	MN/2 (m)								ΔV (mV)	I (mA)	ρ_1 (Ωm)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_2 (Ωm)
	0,3	2,0	5	10,0	20,0	40,0	60,0	80,0						
1,5	11,31													
2,0	20,47													
3,0	46,65													
4,0	83,30													
5,0	130,43													
6,0	188,02													
8,0	334,63													
10,0	523,13	75,40												
13,0	884,41	129,59												
16,0	1.339,94	197,92												
20,0	2.093,92	311,02												
25,0	3.272,02	487,73	188,50											
30,0	4.711,91	703,72	274,89											
40,0	8.377,10	1.253,50	494,80											
50,0	13.089,49	1.960,35	777,54	376,99										
60,0	18.849,07	2.824,29	1.123,12	549,78										
80,0	33.509,82	5.023,41	2.002,77	989,60										
100,0	52.359,36	7.850,84	3.133,74	1.555,09	753,98									
150,0	117.809,15	17.668,32	7.060,73	3.518,58	1.735,73									
200,0	209.438,86	31.412,78	12.558,52	6.267,48	3.110,18	1.507,96								
300,0	471.238,03	70.682,69	28.266,48	14.121,46	7.037,17	3.471,46	2.261,95							
400,0	837.756,86	125.660,56	50.257,63	25.117,03	12.534,95	6.220,35	4.094,54	3.015,93						
500,0	1.308.995,36	196.346,40	78.531,96	39.254,20	19.603,54	9.754,65	6.450,74	4.783,07						

Fonte: Autor.