



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

**AVALIAÇÃO PEDO-GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA EM ÁREA
CONTAMINADA: ESTUDO DE CASO NO LIXÃO DA
ESTRUTURAL, DF**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 227

RICARDO AVELINO COSTA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS

Brasília, Julho de 2024.



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

**AVALIAÇÃO PEDO-GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA EM ÁREA
CONTAMINADA: ESTUDO DE CASO NO LIXÃO DA
ESTRUTURAL, DF**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 227

RICARDO AVELINO COSTA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos - Orientador
(Instituto de Geociências/Universidade de Brasília - IG/UnB)

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar
(Escola de Minas - Departamento de Geologia/Universidade Federal de Ouro Preto - Degeo/UFOP)

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges
(Instituto de Geociências/Universidade de Brasília - IG/UnB)

Brasília, Julho de 2024.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo autor

Avelino Costa, Ricardo

AA949a Avaliação Pedo-Geológica e Geotécnica em Área Contaminada: Estudo de Caso no Lixão da Estrutural, DF / Ricardo Avelino Costa; orientador José Eloi Guimarães Campos. -- Brasília, 2024.

86 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, 2024.

1. Geotecnia. 2. Pedologia. 3. Áreas Contaminadas. 4. Geologia. I. Guimarães Campos, José Eloi, Orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao meu professor, Zé Eloi, por aceitar me orientar, ser muito parceiro, ter paciência e compreensão. A sua amizade, confiança e os ensinamentos transmitidos me agregaram muito pessoalmente e profissionalmente. É o meu maior exemplo e espelho de profissional e geólogo.

Agradeço ao meu pai e meu irmão, José Palmério e Cícero, por todo apoio, compreensão e afeto em mais essa etapa da minha vida.

Agradeço minha companheira, Raylline, por todo carinho, amor e paciência.

A Florença, agradeço pelas sugestões que me foram dadas para este trabalho, e ao Guilherme, por todo incentivo de sempre.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos e colegas de trabalho da Dossel Ambiental, pelo suporte e compreensão.

Conforme a Portaria 206 de 4 de setembro de 2018, que dispõe de obrigatoriedade de citação da CAPES: firmo aqui que “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

Dedico este trabalho a minha mãe, Maria Isabel, professora rígida na sala de aula e em casa. Sempre me incentivou a estudar muito, cobrando e sempre confiando no meu potencial.

RESUMO

A região do Lixão da Estrutural constitui uma área de deposição de resíduos sólidos desde os anos 1960, sem impermeabilização ou qualquer sistema de coleta de efluentes, possibilitando a contínua geração e livre circulação do chorume, contaminando principalmente os solos e as águas subterrâneas. Este projeto objetiva apresentar um diagnóstico da condição geotécnica das áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural, com base no contexto pedo-geológico, dados geofísicos, índice de sondagem SPT (Standard Penetration Test) a diferentes profundidades e integração de dados. Os resultados foram organizados em duas perspectivas: *i*) compondo seções laterais integradas e *ii*) sob avaliação de tipos de fundações, rasas ou profundas, a diferentes profundidades (de 1 a 6 metros). A integração dos resultados mostra que na região podem ser discriminadas cinco horizontes com as seguintes características geotécnicas: aterro de resíduos com feições geotécnicas variáveis; horizontes A + B com índices N_{SPT} predominantemente menores que 5 (classes geotécnicas *Muito Mole* a *Mole*); horizonte C1 com índices N_{SPT} entre 6 e 10 (classe *Média*); horizonte C2 com predominância de índices N_{SPT} entre 11 e 19 (classe *Rija*) e material basal caracterizado como rocha alterada com índices maiores que 19 definindo a Classe *Dura*. Os resultados ainda mostram que os limites entre os diferentes horizontes ou materiais mostra profundidades variáveis, abruptas e escalonadas lateralmente, o que foi interpretado como resultante de falhas existentes reativadas por eventos tectônicos mais recentes. Com relação ao zoneamento dos tipos de fundações em profundidade, os resultados indicam uma leve tendência de orientação para fundações preferencialmente rasas até 2 metros de profundidade e predominância de orientação para fundações profundas de 2 a 6 metros. O conjunto de sondagens realizadas na área e em outras localidades com mesmo contexto pedológico, geomorfológico e geológico mostram que na região a profundidade do impenetrável é anômala, sendo maior que 23 metros para a maioria dos pontos. Os resultados da comparação entre tomografia elétrica e os perfis de índice SPT não se mostraram promissores, muito provavelmente em função da presença do lixiviado que determina um forte controle sobre a resistividade aparente dos materiais. Ainda é possível afirmar que o chorume não foi responsável pela mudança das propriedades geotécnicas dos maciços, mas que potencialmente pode afetar as futuras fundações profundas de obras civis instaladas na região. Além disso, potenciais problemas geotécnicos causados pela grande heterogeneidade do aterro podem ocorrer devido à restrita estabilidade desse material quando submetido a carga de eventuais edificações de maior porte. Essas questões devem ser consideradas nas análises de viabilidade para implantação de empreendimentos urbanos de médio a grande porte na região, devendo ser consideradas as variáveis técnicas, financeiras e fundiárias.

Palavras-chave: Sondagem tipo SPT, aspectos geotécnicos, chorume, Lixão da Estrutural.

ABSTRACT

The Estrutural Landfill region, Federal District, Brazil, constitutes an area of solid waste deposition since the 1960s, without waterproofing or any effluent collection system, allowing the continuous generation and free movement of leachate, mainly contaminating soils and groundwater. This project aims to present a diagnosis of the geotechnical condition of the areas adjacent to the Estrutural Landfill, based on data integration of the soil-geological context, geophysical data and Standard Penetration Test drilling index at different depths. The results were organized in two perspectives: i) composing integrated lateral sections and ii) under evaluation of types of foundations, shallow or deep, at different depths (from 1 to 6 meters). The integration of the results shows that five horizons with the following geotechnical characteristics can be discriminated in the region: waste landfill with variable geotechnical features; A + B horizons with N_{SPT} indices predominantly less than 5 (*Very Soft* to *Soft* geotechnical classes); C1 horizon with N_{SPT} indices between 6 and 10 (*Medium* class); C2 horizon with predominance of N_{SPT} indices between 11 and 19 (*Stiff* class) and basal material characterized as altered rock with indices greater than 19, defining the *Hard Class* (classification according to Brazilian SPT patterns). The results further show that the boundaries between the different horizons or materials show variable, abrupt and laterally stepladders depths, which was interpreted as resulting from existing faults reactivated by more recent tectonic events. Regarding the zoning of the types of foundations in depth, the results indicate a slight tendency towards shallow foundations orientation up to 2 meters depth and predominance of orientation for deep foundations from 2 to 6 meters. The set of SPT loggings carried out in the area and in other locations with the same pedological, geomorphological and geological context show that in the region the depth of the impenetrable is anomalous, being greater than 23 meters for most points. The results of the comparison between electrical tomography and SPT index profiles were not promising, most likely due to the presence of leachate that determines a strong control over the apparent resistivity of the materials. It is still possible to state that the leachate was not responsible for the change in the geotechnical properties of the materials, but it potentially could affect future deep foundations of civil works installed in the region. Furthermore, geotechnical problems caused by the significant heterogeneity of the landfill have the potential to occur due to the uncertain stability of this material when subjected to the load of any large buildings. These issues should be considered in the feasibility analyses for the implementation of intermediate to large urban projects in the region, and technical, financial and land variables should be considered.

Keywords: Standard Penetration Test, geotechnical aspects, leachate, Estrutural Landfill.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Justificativa do Trabalho	2
1.3 Localização	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Material e Métodos	4
1.5.1 Zoneamento Geotécnico	5
1.5.2 Campanhas de Campo	7
1.5.3 Comparação SPT x Eletrorresistividade	9
1.6 Organização do Trabalho	11
CAPÍTULO 2	12
SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO	12
2.1 Geologia	12
2.2 Solos	14
2.3 Relevo	15
2.4 Clima	18
2.5 Histórico de Ocupação do Lixão e Extensão atual da Pluma de Contaminação	20
CAPÍTULO 3	22
ANÁLISE GEOTÉCNICA DE ÁREAS ADJACENTES AO ATERRO	22
3.1 Introdução e Referencial Teórico	22
3.2 Perfis Geotécnicos, Materiais Geotécnicos e Geológicos	23
3.3 Comparações com Eletrorresistividade	51
CAPÍTULO 4	54
ZONEAMENTO DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES DE OBRAS CIVIS NAS ADJACÊNCIAS DO LIXÃO DA ESTRUTURAL, DISTRITO FEDERAL, BRASIL	54
4.1 Introdução	55
4.2 Metodologia	57
3. Resultados e Discussões	60
4.4. Considerações Finais e Conclusões	65
4.5 Referências Bibliográficas	66
CAPÍTULO 5	67
DISCUSSÕES	67
5.1 Neotectônica e Registros de Reativações no Distrito Federal	67
5.2 Implicações da Evolução Morfo-litoestrutural e Pedogenética	70
5.3 Planejamento Geotécnico e Ocupação Urbana	75
CAPÍTULO 6	79
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

APÊNDICE 1 - Logs de 156 Sondagens do Tipo SPT da CODHAB/GDF
APÊNDICE 2 - Logs de Sondagens SPT realizadas por este trabalho
APÊNDICE 3 - Logs de Sondagens SPT de outras fontes (Dados Secundários)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização do Lixão da Estrutural no Distrito Federal, com foco para as áreas adjacentes. .	3
Figura 1.2 - Fluxograma metodológico de desenvolvimento da pesquisa.	5
Figura 1.3 - Equipamento para ensaio de sondagem SPT manual (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012)..	8
Figura 1.4 - Contexto geológico e pedológico da região de estudo, com a indicação dos locais visitados para a caracterização do meio físico. Fonte: CAMPOS et al. (2001) e Embrapa (1978).....	9
Figura 1.5 - Estudos geofísicos e sondagens SPT já realizados na região do Lixão da Estrutural.....	10
Figura 2.1 - Unidades litológicas ocorrentes na área de estudo, centro-oeste do Distrito Federal (Fonte: CAMPOS et al., 2001).	12
Figura 2.2 - Ardósia roxa com clivagem ardosiana penetrativa. Exposição nas proximidades da Barragem de Santa Maria.....	13
Figura 2.3 - Quartzito médio a grosso estratificado que representa a principal litofácies da Formação Ribeirão Piçarrão exposta no Distrito Federal.....	13
Figura 2.4 - Classes de solos ocorrentes na região de estudo segundo o Mapa de Solos do Distrito Federal, na escala de 1:100.000 (Embrapa, 1978).....	16
Figura 2.5 - A: Compartimentos geomorfológicos na região central do DF de acordo com o Subproduto 3.1 do ZEE-DF (Fonte: GDF, 2010). B: Curvas de nível elaboradas a partir de MDE do ALOS (Fonte: ASF Vertex).....	17
Figura 2.6 - A: Declividade e classes de relevo (Fonte: CPRM-LADEIRA NETO, 2010) da área. B: Elevação da região centro-oeste do DF, elaborada a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12,5 metros (Fonte: ASF Vertex, Cena de Satélite ALOS Sensor PALSAR).....	18
Figura 2.7 - Classificação climática de Köppen-Geiger na região (Fonte: ALVARES et al., 2013). É possível observar também que a área de estudo está entre as isoietas de 1500 mm e 1400 mm (Fonte: Atlas Pluviométrico do Brasil-CPRM, 2014).	19
Figura 2.8 - Temperatura média (°C) e precipitação acumulada (mm) no DF de acordo com os dados da Estação Convencional Brasília (Fonte: INMET).	19
Figura 2.9 - Série histórica da disposição de resíduos sólidos no Lixão da Estrutural (Fonte: Franco, 1996).	20
Figura 2.10 - Arranjo mais atual da pluma de contaminação (Fonte: Modificado de SEMA (2021))....	21
Figura 3.1 - Integração e interpretação geotécnica das seções SPTs 1 a 22 e SPTs 22 a 54.	26
Figura 3.2 - Perfis N_{SPT} das seções SPTs 54 a 92 e SPTs 92 a 111.....	27
Figura 3.3 - Modelagem dos quatro últimos perfis segundo os valores de índice de resistência a penetração, N_{SPT}	29
Figura 3.4 - Amostras do perfil de solo nas proximidades da região entre as SPTs 44 e 45 (Apêndice 2, SPT01-10572), com representantes de cada extrato, desde o aterro até o Horizonte C2. Adicionalmente, exemplares da rocha alterada, a ardósia roxa da Formação Ribeirão do Torto em diferentes lugares do Distrito Federal.....	31
Figura 3.5 - Materiais geotécnicos das duas primeiras seções interpretados de acordo com os valores N_{SPT} e descrição táctil-visual.	35
Figura 3.6 - Interpretação dos perfis 3 e 4 segundo integração dos materiais geotécnicos e índices SPT.	36
Figura 3.7 - Perfis de materiais geotécnicos para as quatro últimas seções, derivados do agrupamento dos índices de resistência a penetração (N_{SPT}) e as descrições físicas dos materiais.	37
Figura 3.8 - Interpretação pedo-geológica para as duas primeiras seções.....	44
Figura 3.9 - Seções com informações geológicas (litologia e falhas normais) e pedológicas dos trechos de SPTs 54 a 92 e SPTs 92 a 111.....	45
Figura 3.10 - Quatro últimos trechos apresentados segundo interpretação pedo-geológicas.....	46

Figura 3.11 - Perfis integrados para os dois primeiros trechos.	48
Figura 3.12 - Seções SPTs 54 a 92 e 92 a 111 reunindo todas as informações integradas e interpretadas: N _{SPT} , materiais geotécnicos e informações pedo-geológicas.....	49
Figura 3.13 - Quatro últimas seções completas, exibindo as informações pedológicas, geológicas e geotécnicas.	50
Figura 3.14 - Comparação de dois perfis N _{SPT} com os perfis de eletrorresistividade obtidos na mesma área.	52
Figura 3.15 - Comparação da informação geofísica com a interpretação geológica.....	53
Figura 4.1 - Localização do Lixão da Estrutural no Distrito Federal, com foco para a área adjacente a sul do lixão e a série histórica da disposição de resíduos sólidos (Franco, 1996).	56
Figura 4.2 - Fluxograma síntese das etapas da demarcação de aptidão para fundações, zoneamento em planta.	57
Figura 4.3 - Profundidade do impenetrável à percussão para a área adjacente ao Lixão da Estrutural. ...	60
Figura 4.4 - Orientação para fundação para a área adjacente ao Lixão da Estrutural, até a profundidade de 2 metros, com a representação do nível d'água.....	62
Figura 4.5 - Indicação da fundação para a região adjacente ao Lixão da Estrutural, em profundidades de 3 e 4 metros, incluindo o nível da água representado.....	63
Figura 4.6 - Representação das fundações para a área próxima ao Lixão da Estrutural, a profundidades de 5 e 6 metros, com a inclusão do nível da água na representação.	64
Figura 5.1 - A: Calhas interpretadas por Martins (2000) e reinterpretadas por Xavier (2010), comparadas com parte do segundo perfil geológico elaborado e apresentado no Capítulo 3. B: Registros dos cortes/trincheiras das obras do metrô de Águas Claras (MARTINS, 2000).	69
Figura 5.2 - A: SPT01-10572, realizada nas proximidades de uma entrada do Lixão. B: Local de realização das sondagens SPT01 e 02-10573, em área sem contaminação, na Colônia Agrícola 26 de Setembro.....	69
Figura 5.3 - Distribuição espacial das sondagens SPT (CODHAB e novas SPTs) deste trabalho e das sondagens secundárias, de acordo com a geologia (CAMPOS et al., 2001) e geomorfologia (Fonte: GDF, 2010) na região.....	71
Figura 5.4 - A: Proposta de Martins et al. (2004) para a Evolução Geomorfológica do DF. B: Geologia do DF, com destaque para os filitos do Grupo Canastra e para as unidades do Grupo Paranoá, que constituem o Domo de Brasília (CAMPOS et al.,2001). C: Compartimentação Geomorfológica do Domo de Brasília (Fonte: GDF, 2010). D: Visão panorâmica do relevo do DF, destacando o Domo de Brasília.	73
Figura 5.5 - Lineamentos estruturais regionais e intersecção das estruturas (horst e graben) em planta.	74
Figura 5.6 - A: Localização do protótipo da edificação do projeto da CODHAB, no local da SPT 104. B: Registro do protótipo constituído de 4 pavimentos de apartamentos e um pavimento superior de área funcional.	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Quadro que apresenta os níveis de compactação e coesão dos solos argilosos, relacionados à sua deformabilidade e resistência, considerando-se sua aplicação em fundações.....	23
Tabela 4.1 - Frequências da profundidade do impenetrável e do nível d'água das sondagens adjacentes ao Lixão da Estrutural.	61
Tabela 4.2 - Frequência da orientação de cada tipo de fundação para a área do Lixão da Estrutural, até a profundidade de 6 metros.	61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A região do Lixão da Estrutural constitui uma área de deposição de resíduos sólidos desde os anos 1960, após a transferência da capital do Brasil para o Distrito Federal. Com o passar dos anos e grande crescimento populacional da região, esta área foi consolidada como o principal destino dos resíduos sólidos domésticos de Brasília e das cidades satélites (MARQUES, 2018a; CIDADES INTELIGENTES, 2018). Este processo iniciou de forma não planejada, sendo que o único critério utilizado para a escolha do local foi sua proximidade com os principais centros produtores de lixo à época.

A antiga área do lixão está fortemente vinculada à área urbana denominada de Cidade Estrutural, além de estar situada em posição adjacente a uma Unidade de Conservação de Proteção Integral (Parque Nacional de Brasília) e estar localizada em um divisor de águas contendo as cabeceiras de três cursos d'água (córregos do Acampamento e Cabeceira do Valo e Ribeirão Bananal). Atualmente a área funciona como uma Unidade de Recebimento de Entulhos (URE) e recebe restos de obras civis, podas de árvores de áreas urbanas e menor parcela de resíduos inertes (MACHADO E EUFRÁSIO, 2019).

No início do ano de 2018, na intenção de interromper o descarte não controlado de lixo, o Governo do Distrito Federal transferiu o destino dos resíduos para o Aterro Sanitário Oeste em Samambaia (MARQUES, 2018b). Contudo, mesmo após a mudança do local e das condições de deposição dos resíduos, permanecem os passivos ambientais provenientes de décadas de acumulação de resíduos na região.

Os resíduos depositados diretamente sobre o solo, sem impermeabilização da base e qualquer sistema de coleta de efluentes possibilitam a contínua geração e livre circulação de efluentes, contaminando os solos, as águas subterrâneas por meio de uma pluma de contaminação (KJELDSEN et al., 2002) e da atmosfera, com a produção de gases de efeito estufa.

Por isso, na segunda metade da década de 1990 a área foi objeto de atenção e estudos, em que o objetivo geral foi entender a dinâmica e caracterizar a pluma de contaminação por chorume, e propor modelos previsionais de sua migração (ARAÚJO, 1996; FRANCO, 1996; ABREU, 2001; CARNEIRO, 2002; CAMPOS, 2007; CAVALCANTI, 2013).

Dessa maneira, a caracterização da pluma de contaminação de chorume desta região está atualmente bem consolidada, principalmente depois do projeto de estudo contratado pela Secretaria do Meio Ambiente do Distrito Federal (SEMA, 2021). Contudo, o impacto direto do chorume na qualidade do solo, que representa a zona vadosa, foi estudado em menor proporção.

Em termos de estudo da qualidade de solo em regiões de descarte de resíduos e adjacências, o aspecto químico (GALKO, 2015; NTA & ODIONG, 2017; CHOUDHURY *et al.*, 2021) é levado em consideração com maior frequência em comparação ao aspecto físico ou mecânico, que quando estudado, é mais comum apenas envolvendo a análise laboratorial (GANGATHULASI *et al.*, 2009; REDDY *et al.*, 2015; EMEKA *et al.*, 2019; NTA *et al.*, 2021).

Nesse sentido, esta pesquisa, representada por um estudo de caso está se desenvolvendo em torno de um projeto da Companhia de Desenvolvimento Habitacional de Brasília (CODHAB), que consiste na construção de edificações para abrigar a população da ocupação irregular de Santa Luzia, situada na vizinhança da cidade Estrutural. Pelo protótipo e pela investigação geotécnica (por meio de sondagens tipo *Standard Penetration Test* - SPT) já realizados, o modelo de edificação possuiria 5 pavimentos e se estenderia horizontalmente por mais de 3 quilômetros, contornando o lixão na porção sudoeste e sudeste, passando sobre um local que já existiu disposição direta de resíduos.

Portanto, a partir da integração de dados geotécnicos (sondagens tipo SPT) com dados geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, pedológicos e geomorfológicos esta pesquisa apresenta um diagnóstico da condição física dos solos/saprolitos na região desde a superfície até a profundidades consideradas impenetráveis (pela avaliação das sondagens SPT).

1.2 Justificativa do Trabalho

O presente estudo é justificado pela necessidade de investigação da existência de possíveis problemas geotécnicos em áreas contaminadas causados devido a presença de chorume em contato com rocha e solo/saprolito, demandando estudo e planejamento para eventuais ocupações. Dessa maneira, o estudo de caso se desenvolverá em torno do projeto da CODHAB para a construção predial nas adjacências do Lixão da Estrutural, que deverá ser reavaliado, uma vez que as viabilidades técnicas e econômicas são afetadas e comprometidas em virtude do contexto.

De acordo com os valores de índices SPT (N_{SPT}) já obtidos nessa área, no contexto de previsão de capacidade de carga, é esperado que as fundações das edificações devem ser profundas. Isso é justificado pelo fato de os índices SPTs apresentarem baixos valores a grandes profundidades (maiores que 15 metros) e o nível do impenetrável ser profundo (na maior parte dos casos maiores que 25 metros).

Este quadro ressalta a hipótese de que os menores índices SPT seriam resultantes da influência do contato do solo e saprolito com a pluma de contaminação. Além disso, ainda haveria a possibilidade de haver problemas estruturais nas fundações devido ao contato direto com o chorume e conseqüente ataque químico das ferragens e do concreto pelos percolados (que de forma geral apresentam elevado poder de corrosão).

Portanto, a pesquisa busca contribuir com a análise de viabilidade de execução de um projeto de urbanização dessa magnitude, para atendimento de uma demanda social em área localizada próxima a um aterro de resíduos sólidos. O custo elevado das fundações em um local com baixo valor imobiliário também deve ser considerado para análise de viabilidade de realização do projeto nessa região.

O estudo se justifica ainda, pois seus resultados podem ser aplicados em outras áreas no país em que problemas vinculados a expansões urbanas em áreas adjacentes a lixões são observados.

1.3 Localização

Estendendo-se por uma área de 215 hectares, o Lixão da Estrutural está localizado no centro-oeste do Distrito Federal, na Região Administrativa da Estrutural (RA XXV SCIA), entre a rodovia Estrada Parque Ceilândia (DF-095) a sul e o Parque Nacional de Brasília a nordeste (Figura 1.1).

Além de estar localizado em área contígua a uma unidade de conservação federal e estar próxima da área urbana da cidade Estrutural, o lixão ocupa o divisor de águas entre o Córrego Cabeceira do Valo a oeste e o Córrego do Acampamento a leste.

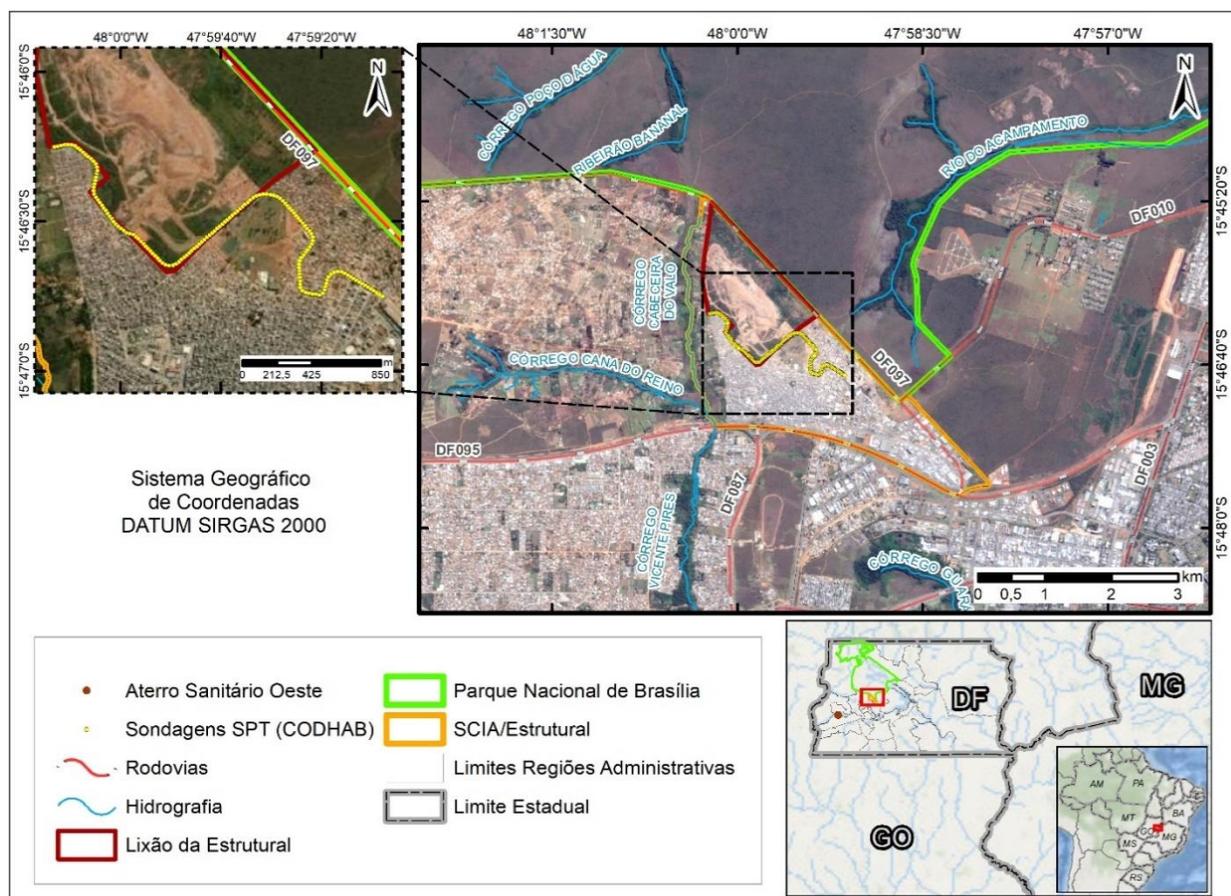


Figura 1.1 - Localização do Lixão da Estrutural no Distrito Federal, com foco para as áreas adjacentes.

1.4 Objetivos

Este projeto de pesquisa aplicada tem como objetivo apresentar um diagnóstico da condição geotécnica das áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural, com relação ao contexto geológico, geomorfológico, pedológico e as variações dos índices SPT em profundidade. Em seguida, propor uma explicação para as possíveis variações dos índices SPT nos solos/saprolitos no contexto da área contaminada. O intuito final da pesquisa é obter respostas denexo causal entre a contaminação e as variações laterais e verticais de N_{SPT} nas áreas pesquisadas.

Vinculados ao objetivo principal, as metas específicas compreendem:

- Apresentar uma síntese do contexto do meio físico da área, com descrição geológica, pedológica, geomorfológica e hidrogeológica, com intuito de facilitar o entendimento do comportamento geotécnico local;
- Obter dados geotécnicos em áreas comprovadamente com elevada contaminação e em áreas sem contaminação ou contaminação muito baixa, e em mesmo contexto pedo-geológico, de forma a avaliar as propriedades físicas/mecânicas de acordo com a concentração de chorume;
- Investigar a correspondência dos índices SPT com valores de eletrorresistividade nos locais de coexistência de ambos os dados;
- Zonar a área adjacente ao Lixão da Estrutural de acordo com os índices SPT a diferentes profundidades e propor alternativas de uso/ocupação, assim como alternativas para os tipos de estruturas de fundações.

1.5 Material e Métodos

Nesse trabalho, os dados cartográficos utilizados e gerados se encontram no sistema de referência SIRGAS 2000 *Brazil Polyconic* (área entre as zonas 22 e 23 Sul), sendo processados no *software* de SIG *ArcMap* 10.8. Foram utilizados como base de orientação aos trabalhos de campo e produtos cartográficos desenvolvidos, os mais diversos dados disponíveis em formato *shapefile* no Geoportal DF (*link* para acesso: <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>) e na Base cartográfica contínua do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:250.000 (*link* para acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2021/).

As imagens que subsidiaram a análise do relevo são provenientes do modelo digital de elevação (MDE) adquiridas a partir do satélite ALOS-Sensor Palsar (resolução espacial de 12,5 metros). Tais imagens propiciaram a análise das variações de elevação (hipsometria) e declividade para a área de estudo. O acesso aos dados do satélite ALOS pode ser realizado através do *link*: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>.

Sintetizando as etapas do trabalho de forma sequencial e interdependente a Figura 1.2 apresenta por meio de um fluxograma a estrutura do projeto.

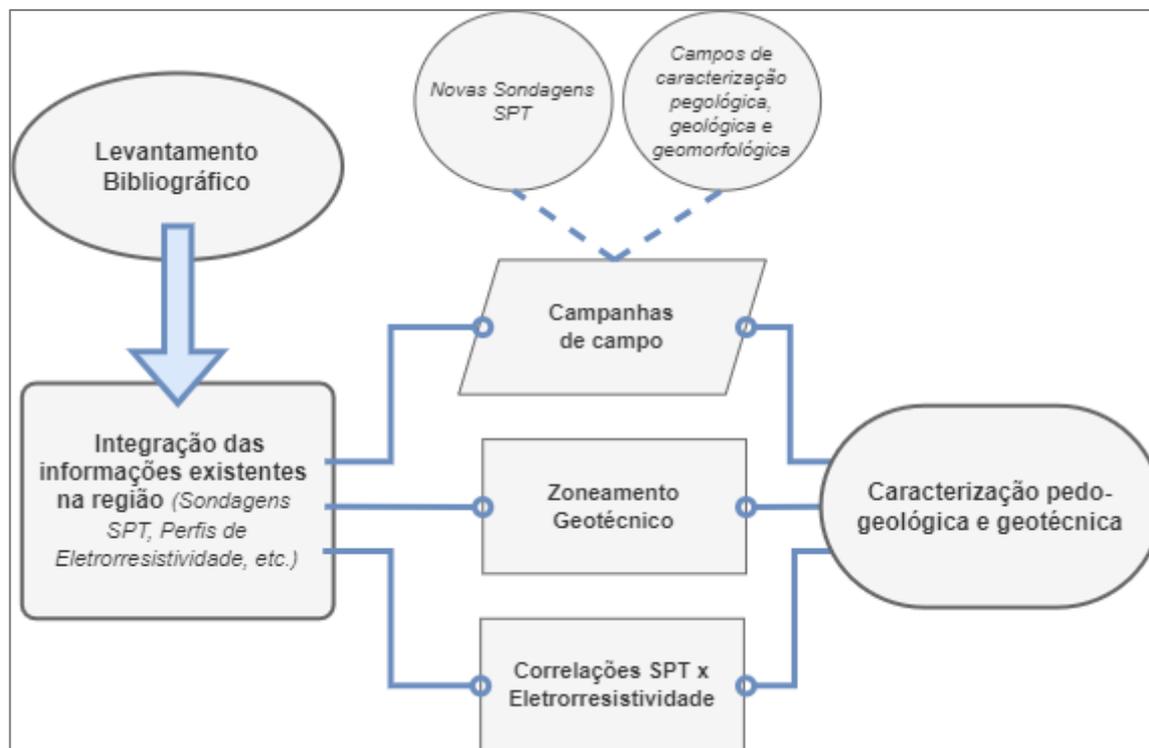


Figura 1.2 - Fluxograma metodológico de desenvolvimento da pesquisa.

A primeira ação desta pesquisa foi a elaboração do referencial teórico baseado na literatura disponível sobre mecânica de solos, geofísica aplicada a pedologia, investigações geotécnicas, mapeamentos geotécnicos, interação de chorume com estruturas de obras civis e o levantamento dos estudos disponíveis na área do Lixão da Estrutural.

Para a avaliação dos aspectos geotécnicos e pedo-geológicos no contexto de áreas contaminadas, foram utilizados dados e métodos de estudos aplicados à geologia, pedologia, sistemas de informações geográficas (SIG), geotecnia, geofísica e hidrogeologia.

Estudos geofísicos realizados na área terão integração e associação dos dados obtidos por Cavalcanti (2013) e SEMA DF (2021) aos dados geotécnicos. Os parâmetros hidrogeológicos a serem alinhados com os dados geotécnicos serão consultados no diagnóstico da SEMA DF (2021).

1.5.1 Zoneamento Geotécnico

Mediante interpolação de algumas informações (profundidade do impenetrável, nível d'água e índices SPT de 1 a 6 metros) dos 156 pontos de sondagens tipo SPT do projeto da CODHAB, foi realizada a caracterização e o zoneamento para aptidão de fundação na área adjacente ao Lixão da Estrutural.

Esse procedimento de interpolação ocorreu com auxílio do *software* ArcMap 10.8, pelo emprego do modelo de krigagem exponencial, um modelo muito utilizado na literatura de ciências do solo (PESCIM *et al.*, 2010; THIESEN, 2016). Em relação aos modelos circular e esférico, o modelo exponencial apresenta vantagem por resultar em maior suavização e refletir de maneira razoável os contornos do tipo de superfície analisada (THIESEN, 2016).

Como os pontos de SPT estão dispostos de maneira alinhada, nos locais onde estariam as instalações do projeto, e não dispersos de maneira a configurar uma malha, foi especificada uma distância fixa (40 metros) como um raio dentro do qual os pontos de amostra de entrada foram usados para realizar a interpolação.

O zoneamento da profundidade do impenetrável e da profundidade da zona saturada do aquífero foram obtidos com base na localização espacial dos furos de sondagem SPT e profundidade do impenetrável e a profundidade do nível final de água.

Para o zoneamento sobre o tipo de fundação a ser aplicada (superficial ou profunda), foram empregados a maior parte dos critérios de Thiesen (2016), que basicamente levam em consideração a viabilidade econômica, os limites e as profundidades para fundações rasas da fundação de Rebello (2011). Portanto, os critérios adotados para a geração desse produto foram:

- Limite máximo de seis metros* de profundidade para assentamento de fundação superficial, a fim de admitir a viabilidade mesmo com uma margem maior e observar os índices SPT e níveis da zona saturada em maiores profundidades (*A despeito de Rebello (2011) considerar o assentamento de fundações rasas até 2 metros de profundidade para garantir a viabilidade econômica, Thiesen (2016) adotou 4 metros como parâmetro, a fim de contemplar a escavação de até 2 metros de subsolo);
- Índice SPT (N_{SPT}) ≥ 5 na profundidade analisada e sotoposta a ela, evitando assentamento de fundação superficial sobre solo mole ou fofo, assim como considerado por Thiesen (2016);
- As regiões que estão fora desses critérios anteriormente citados foram consideradas para fundações profundas. Para cada profundidade também foi analisada a informação da presença do nível de água, uma vez que é importante na avaliação do tipo de fundação (THIESEN, 2016).

Foram gerados no total seis zoneamentos para o assentamento da fundação superficial nos primeiros seis metros de profundidade do solo, por meio da interpolação dos valores do N_{SPT} de cada sondagem para cada uma das profundidades analisadas, e o resultado foi compartimentado em duas zonas: $N_{SPT} \geq 5$, com a orientação para fundação superficial e $N_{SPT} < 5$, com a orientação para fundação profunda (THIESEN, 2016).

Também com auxílio do *software ArcMap 10.8* foram elaborados mapas de isovalores por meio da interpolação dos índices SPT (N_{SPT}), compreendendo basicamente um zoneamento das classes/grupos de índices SPT a diferentes profundidades.

Perfis de zonas de índices SPT foram confeccionados com o emprego do *software Inkscape 1.3.2*, e comparando diretamente aos perfis de eletrorresistividade e suas interpretações já disponíveis.

Por fim, como alternativas para uso e ocupação da área, foram propostos alguns padrões de estruturas para fundações de edificações viáveis de acordo o zoneamento geotécnico produzido para a área e conforme as especificações da ABNT - NBR 6122:1996.

1.5.2 Campanhas de Campo

Foram realizadas duas campanhas de campo na área de estudo: realização de novas sondagens tipo SPT e de caracterização do meio físico.

O primeiro período constitui-se de duas fases, ocorridas em outubro de 2022, sendo a primeira delas a de definição dos locais exatos a serem sondados e a segunda de acompanhamento da realização das novas sondagens. As sondagens foram realizadas por funcionários da HR Fundações, empresa do Distrito Federal contratada para realização dos ensaios.

O segundo foi compreendido por visitas esporádicas a diversos pontos nas cercanias da região. Tais visitas ocorreram ao longo do ano de 2023, de acordo com a disponibilidade dos integrantes da equipe da pesquisa.

Novos Ensaios SPT

Os novos ensaios tipo SPT foram executados em dois locais, um com contaminação comprovada de chorume e outro sem qualquer contaminação, conforme as especificações da ABNT - NBR 6484 de 2001 e 2020. O custeio desses ensaios foi por meio de recursos do Programa de Apoio à Pós-graduação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PROAP-CAPES) disponibilizados em edital aos alunos da pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

O ensaio consiste na perfuração e cravação dinâmica no solo de um amostrador padrão utilizando um martelo padronizado (65 kg) e uma altura de queda livre padronizada (75 cm) (Figura 1.3). A cravação ocorre de metro em metro, podendo ser manual ou mecanizada. Os resultados são: a determinação do tipo de solo, nível do lençol freático e um índice de resistência. A apresentação dos resultados consiste no número de golpes (queda do peso) necessários para cravação de segmentos de 15 cm dos primeiros 45 cm do metro analisado. O índice de resistência à penetração (N_{SPT}) representado pela soma do número de golpes para a penetração dos últimos 30 cm, segundo e terceiro terço de penetração, para cada metro de profundidade.

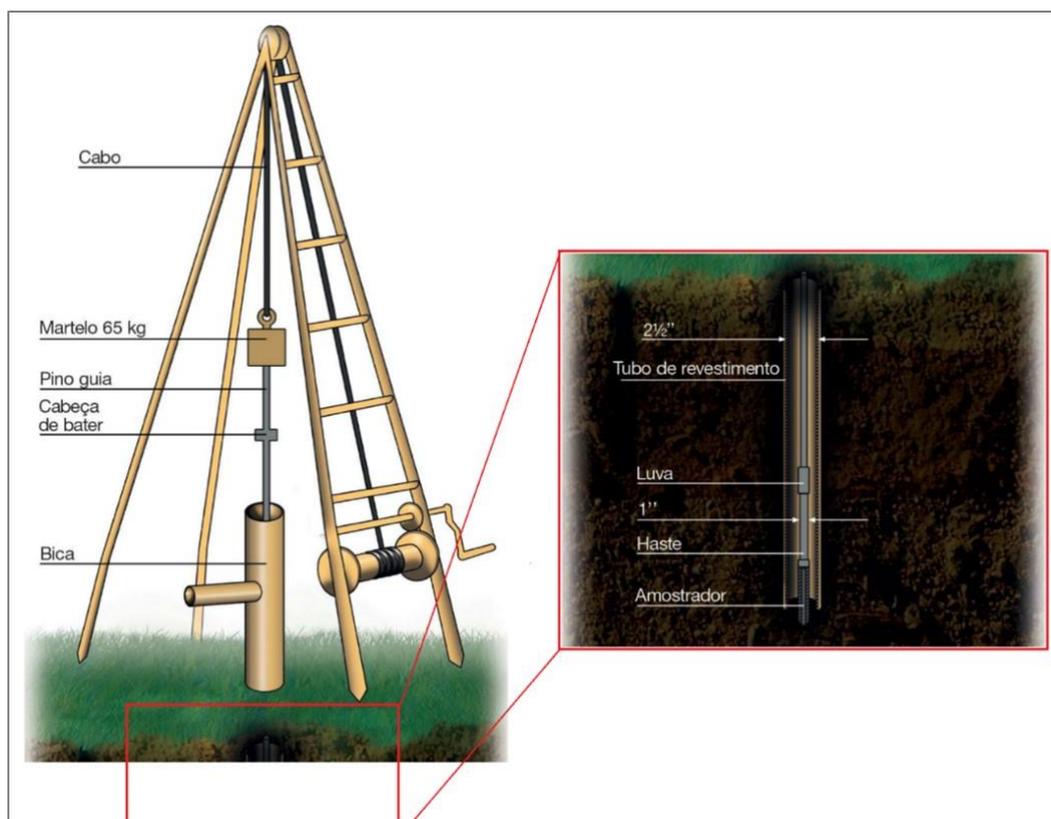


Figura 1.3 - Equipamento para ensaio de sondagem SPT manual (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012).

Conforme os critérios da ABNT - NBR 6484 de 2001 e 2020, a cravação é cessada e é considerada como impenetrável quando: em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30; um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação; não se observar avanço do amostrador padrão durante a aplicação de 5 golpes sucessivos do martelo.

De acordo com as informações dos ensaios, por meio de perfis geotécnicos são exibidos os resultados acerca das características dos horizontes do solo (textura/granulometria, coloração, dureza/compactação), nível do lençol freático no início e fim do ensaio, profundidade do impenetrável, e resistência do solo pelo número de golpes padronizados N_{SPT} .

Caracterização do Meio Físico

As campanhas de campo de caracterização do meio físico ocorreram mediante visitas a outros locais em que houve sondagens tipo SPT. Alguns desses dados secundários estão publicados em ambiente *online* e outros foram disponibilizados por empresas de sondagens do Distrito Federal.

Os locais foco de visita foram aqueles próximos a região do Lixão da Estrutural e com contextos pedo-geológicos similares ou de análise comparativa pertinente. A observação e descrição de aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos abarcaram a sistematização de visita a cada um dos locais com logs de SPTs disponíveis (Figura 1.4).

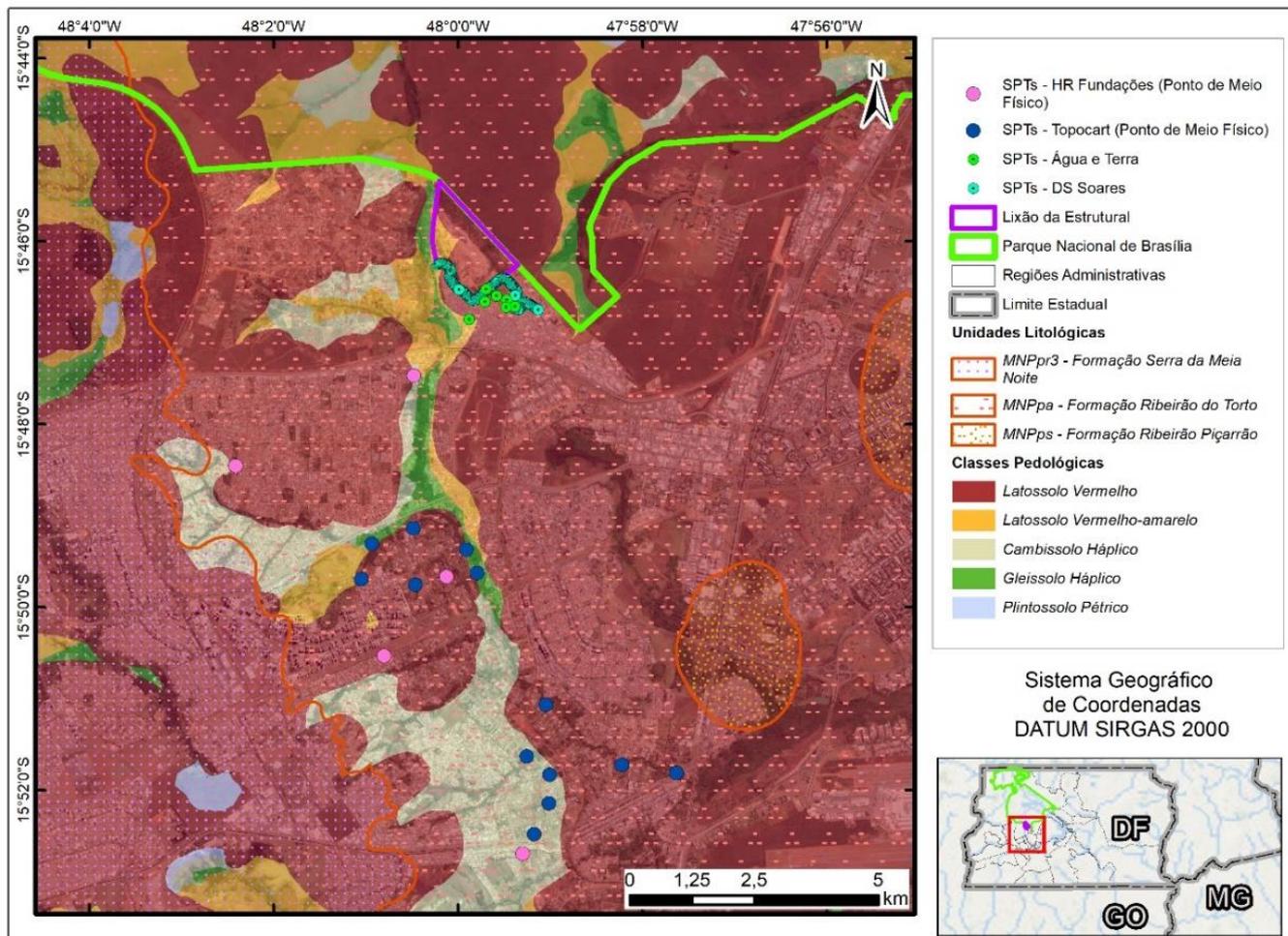


Figura 1.4 - Contexto geológico e pedológico da região de estudo, com a indicação dos locais visitados para a caracterização do meio físico. Fonte: CAMPOS *et al.* (2001) e Embrapa (1978).

Na Figura 1.4 observam-se os locais visitados para a caracterização do meio físico, em pontos que tiveram sondagens SPT realizadas por diversas empresas, sendo elas: Água e Terra Consultoria (no ano de 2006), Topocart (em 2010), HR Fundações (entre 2022 e 2023), além das SPTs principais da pesquisa (contratadas pela CODHAB), realizadas pela empresa DS Soares (no ano de 2018).

1.5.3 Comparação SPT x Eletrorresistividade

Os estudos geofísicos já realizados na área tiveram integração total aos dados que foram obtidos no presente projeto, como os de Cavalcanti (2013) e SEMA DF (2021), que foram adquiridos nos mesmos locais da maior parte das sondagens SPT já realizadas pela CODHAB (Figura 1.5). Já os dados/parâmetros hidrogeológicos a serem integrados com os dados geotécnicos foram consultados no diagnóstico da SEMA DF (2021), que além de possuir dados geofísicos, apresentou dados e modelos hidrodinâmicos e hidroquímicos oriundos de medições em uma bateria de 26 poços de monitoramento.

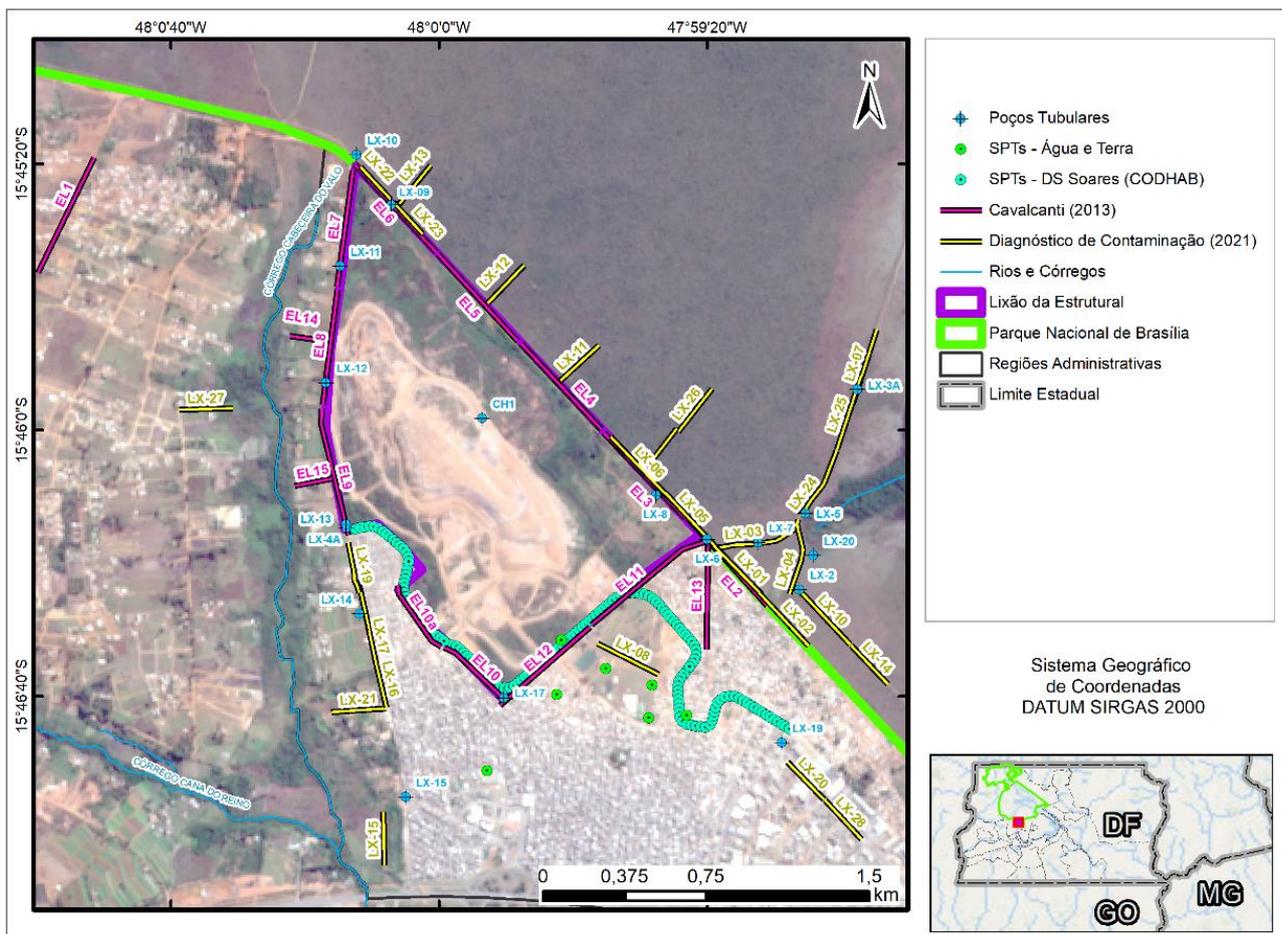


Figura 1.5 - Estudos geofísicos e sondagens SPT já realizados na região do Lixão da Estrutural.

Os perfis de zonas de índices SPT foram comparados aos perfis de eletroresistividade (arranjo elétrico dipolo-dipolo) e suas interpretações já disponíveis. Uma associação entre resistividade elétrica e índices SPT nesse contexto de áreas contaminadas foi definida com intuito de tentar ampliar as possibilidades de investigação através do método indireto, diminuindo a necessidade de grande quantidade de sondagens.

A execução de um projeto de engenharia ou alguns estudos ambientais exige a determinação das propriedades geotécnicas dos solos. Contudo, essas propriedades podem também ser determinadas em laboratório usando amostras indeformadas ou deformadas de solos. Tal abordagem de análise torna a atividade onerosa, uma vez que a extração de uma amostra de solo intacta é difícil. Além disso, existem grandes variações nas propriedades temporais e espaciais do solo e sua avaliação precisa requer amostragem de alta densidade (ISLAM *et al.*, 2020).

Portanto, a aplicação conjunta de investigações geofísicas, métodos não invasivos e indiretos, e investigações geotécnicas, métodos invasivos e diretos, para interpretar as feições em subsuperfície tem sido bastante aceita. Entretanto, a correlação estatística entre os valores obtidos pelos métodos geofísicos e as sondagens têm se desenvolvido recentemente e ainda não foram testados em áreas contaminadas.

As relações lineares obtidas são específicas de cada local, assim, se fazem necessários estudos complementares para o estabelecimento mais robusto das correlações, com sua validação e determinação das limitações (GONÇALVES *et al.*, 2021). A detecção de boas correlações entre resistividade elétrica e valores de N_{SPT} a partir de solos tem sido atingida em alguns estudos (TAN *et al.*, 2018; MOHAMMED *et al.*, 2019; ISLAM *et al.*, 2020; GONÇALVES *et al.*, 2021), com altos valores de coeficiente de correlação (R^2 por volta de 0,9). Portanto, neste trabalho as correlações ocorreram de maneira mais direta e pragmática, avaliando a correspondência e interdependência gráfica/visual entre os dados, a fim de simplificar a análise e otimizar o tempo.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho será estruturado e organizado na forma de seis capítulos sequenciais e complementares, sendo a parte inicial representada pelo capítulo introdutório, contendo a apresentação do problema, sua justificativa, os objetivos da pesquisa, métodos empregados e a localização da área de pesquisa.

O capítulo seguinte compreende uma síntese sobre o meio físico, que se faz necessária para o entendimento da questão em estudo, contextualizando o arcabouço geológico, pedológico, geomorfológico e climático.

O terceiro capítulo envolve a análise dos principais dados, nele são apresentados os resultados primários com análise vertical das variações das propriedades geotécnicas da área estudada. Devido a seu conteúdo e estruturação, esse é o mais complexo do trabalho, onde os itens foram separados em resultados e interpretações.

O capítulo quatro será apresentado na forma de um artigo científico, situação comum no programa de pós-graduação, e será submetido à revista Geotecnia (Sociedade Portuguesa de Geotecnia). Esse artigo foi formatado conforme os padrões gerais da revista para a qual será submetido, com a adaptação para a numeração sequencial das figuras e itens da dissertação e inserção das referências bibliográficas específicas ao final. Nesta sessão serão apresentados resultados das variações laterais dos índices SPT com objetivos de zoneamento de tipos de fundações (rasas ou profundas).

Integrando os dados dos capítulos anteriores, o capítulo 5 discute e avalia os resultados primários e secundários com o propósito da validação da hipótese como resultado final. Por fim, último capítulo conclui o trabalho indicando sinopticamente os resultados de maneira direta, correlacionando os diferentes aspectos e apresentando sugestões para a realização de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO

2.1 Geologia

A região de estudo está inserida na porção oriental da Faixa de Dobramentos Brasília, mais especificamente na zona externa central. Em termos locais é representada por rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico, de idade mesoproterozoica do Grupo Paranoá, depositadas em condições plataformais. Detalhes sobre o contexto do Grupo Paranoá podem ser obtidos em Campos *et al.* (2013) e Seraine *et al.* (2020).

O Grupo Paranoá está representado na área por duas formações distintas: predominantemente pela Formação Ribeirão do Torto e em menor proporção pela Formação Ribeirão Piçarrão (Figura 2.1).

A primeira delas é constituída basicamente por ardósias homogêneas de coloração cinza esverdeada quando não alteradas e quando estão intemperizadas apresentam colorações roxas (Figura 2.2). Clivagens ardosianas são as manifestações de duas foliações penetrativas no pacote (CAMPOS *et al.*, 2013).

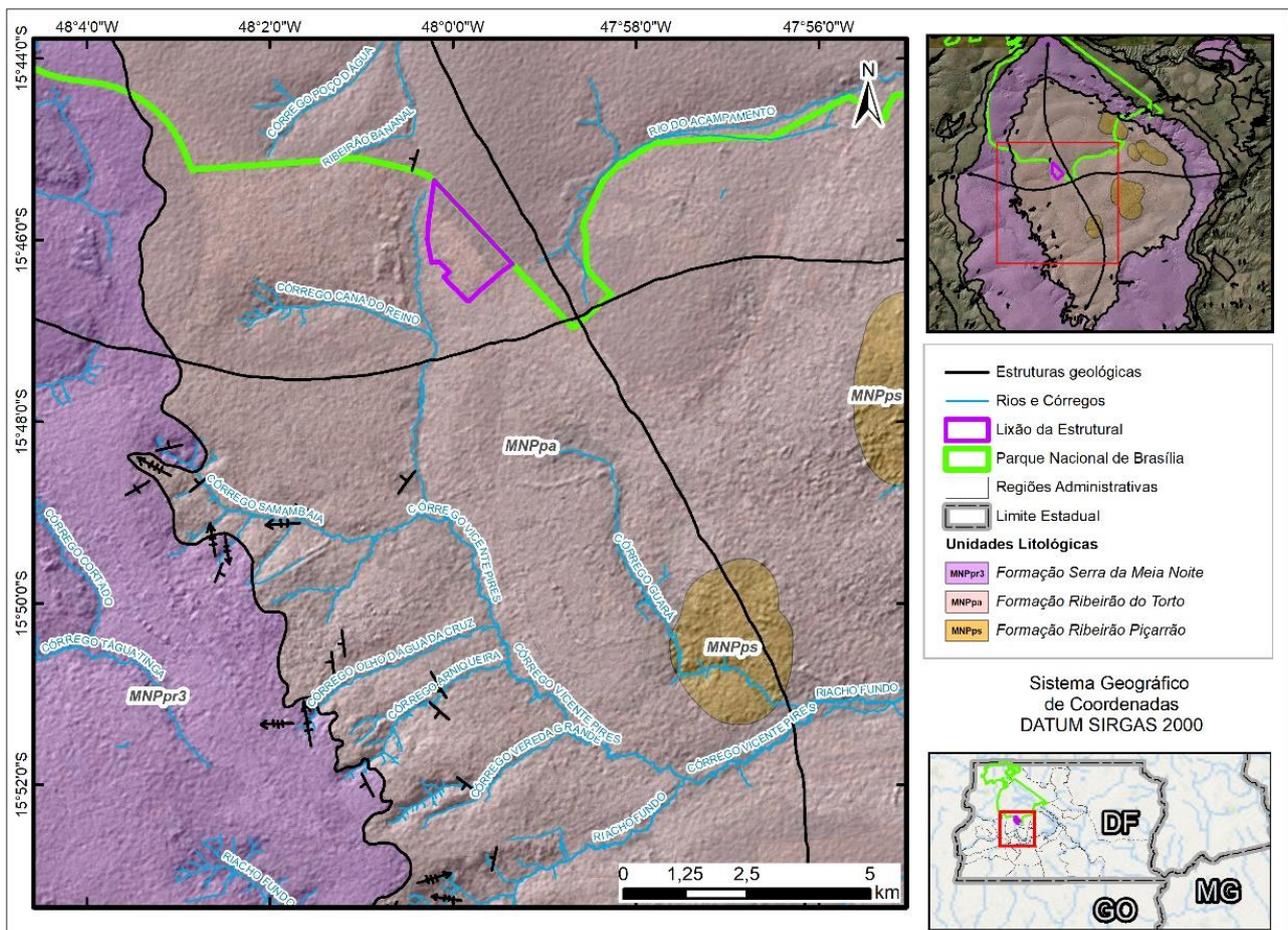


Figura 2.1 - Unidades litológicas ocorrentes na área de estudo, centro-oeste do Distrito Federal (Fonte: CAMPOS *et al.*, 2001).



Figura 2.2 - Ardósia roxa com clivagem ardosiana penetrativa. Exposição nas proximidades da Barragem de Santa Maria.

A Formação Ribeirão Piçarrão, internamente apresenta uma maior heterogeneidade, sendo subdividida em cinco litofácies (CAMPOS *et al.*, 2013). O sublitotipo presente na região é representado por quartzitos médios a grossos intercalados por metassiltitos argilosos, que representam as fácies típicas do topo dessa unidade (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Quartzito médio a grosso estratificado que representa a principal litofácies da Formação Ribeirão Piçarrão exposta no Distrito Federal.

A posição inferior da Formação Ribeirão Piçarrão com relação à Formação Ribeirão do Torto e o padrão de dobramentos desses dois pacotes faz com que a primeira unidade seja exposta basicamente devido a erosão do pacote superior.

Vale também destacar que na região de ocorrência dessas rochas no DF, diversos autores (MARTINS, 2000; MARTINS *et al.*, 2004; XAVIER, 2010; CAMPOS *et al.*, 2016) apontam locais com estruturas de falhas normais com pequenos rejeitos atribuídas a reativação tectônica, associadas a saprólitos e latossolos, ou seja, indícios de movimentação em materiais recentes.

Essas reativações são evidenciadas por anisotropias/zonas de fraqueza geradas na orogênese brasileira, nas fases finais. Elas foram formadas em um regime dúctil-rúptil, denominada por Xavier (2010) de Tectônica Formadora, e sua reativação ocorre em um contexto de estabilidade crustal a partir do limite Neógeno-Paleógeno, denominado pela autora como Tectônica Modificadora.

Para a compreensão dos movimentos neotectônicos, é essencial entender os controles estruturais em nível regional, permitindo a identificação dos sistemas de tensores locais para análises mais detalhadas. A neotectônica no Brasil é afetada por esforços compressoriais originados tanto da dorsal Meso-Atlântica quanto da zona de subducção da Placa de Nazca, que formou a Cadeia Andina. Esses esforços atuam na litosfera continental dentro da Placa Sul-americana, resultando em um arranjo compressivo (XAVIER, 2010).

E nesse contexto de esforços, em uma matriz já rica em anisotropias e zonas de fraqueza preexistentes, certas direções preferenciais serão mais propensas a processos neotectônicos. As reativações das estruturas podem ser agrupadas em três tendências: confinamento; transcorrência; abertura conjugada com transcorrência (XAVIER, 2010).

2.2 Solos

Segundo o Mapa de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal elaborado na escala 1:100.000 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 1978) e considerando-se a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Embrapa, 2018), ocorrem na área de estudo e adjacências três classes de solos: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, e Gleissolo Háptico (Figura 2.4).

Os latossolos presentes na área da pesquisa apresentam textura muito argilosa e estruturação grumosa na maior parte do perfil. Na sequência de horizontes que compõem o perfil completo, a grande espessura dos horizontes saprolíticos se destacam, sendo que este conjunto classificado em C1 e C2 pode alcançar mais de 20 metros de espessura total. O conhecimento dos perfis completos de latossolos foi auxiliado a partir da descrição das perfurações para instalação de poços de monitoramento na região

Os gleissolos ocorrem apenas nas áreas úmidas nas áreas de cabeceiras dos cursos d'água que nascem nas adjacências do antigo lixão. São classificados como Gleissolo Háptico e localmente Gleissolo Melânico, com textura muito argilosa e com estrutura granular nos

horizontes superficiais. O Horizonte Bg, passa por um horizonte rico em plintita antes de se alcançar o horizonte saprolítico.

Importante ressaltar que em algumas perfurações realizadas na região, horizontes arenosos foram interceptados em profundidade tanto em área de presença de latossolo, quando de gleissolo. Este dado permitiu inferir a presença do topo da Formação Ribeirão Piçarrão na região do Lixão da Estrutural.

Vale também destacar que os solos do DF, de maneira geral, possuem elevada porosidade e agentes cimentantes ligando os grãos, e por meio de processos de laterização e lixiviação, as partículas menores são transportadas para os horizontes inferiores dos solos. Solos com essas características mais fortemente manifestadas são denominados de colapsíveis, possuem uma estrutura instável. A alteração do grau de saturação permite mudança no comportamento de tensão-deformação, ocasionando desmoronamento brusco e subsidência devido à ausência dos cimentantes (SILVA, 2006).

Esse processo de laterização, atua na formação de horizontes lateríticos silto-argilosos e de coloração avermelhadas, chamados de “argila porosa” (SILVA, 2006). E sua ocorrência está associada as regiões mais altas, de chapada, com destaque para as áreas de bordas. Portanto, apesar de Silva (2006) em seu trabalho apontar que a presença do contaminante (o chorume), exerce uma maior dispersão dos agentes cimentantes e causa um rompimento da estrutura, a região de estudo não possui a ocorrência desses horizontes por estar abaixo do nível de elevação em que eles geralmente ocorrem, além de estarem em região de solo não natural e alterado, de área ocupada.

2.3 Relevo

Em termos geomorfológicos regionais, identificam-se na área de estudo dois compartimentos de relevo principais: o plano intermediário e o rebordo (Figura 2.5). O compartimento do plano intermediário apresenta cotas entre 950 e 1100 metros, padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, predomínio de latossolos, declividades inferiores a 12% e predominância de processos pedogenéticos sobre erosão e transporte no balanço morfodinâmico (GDF, 2010).

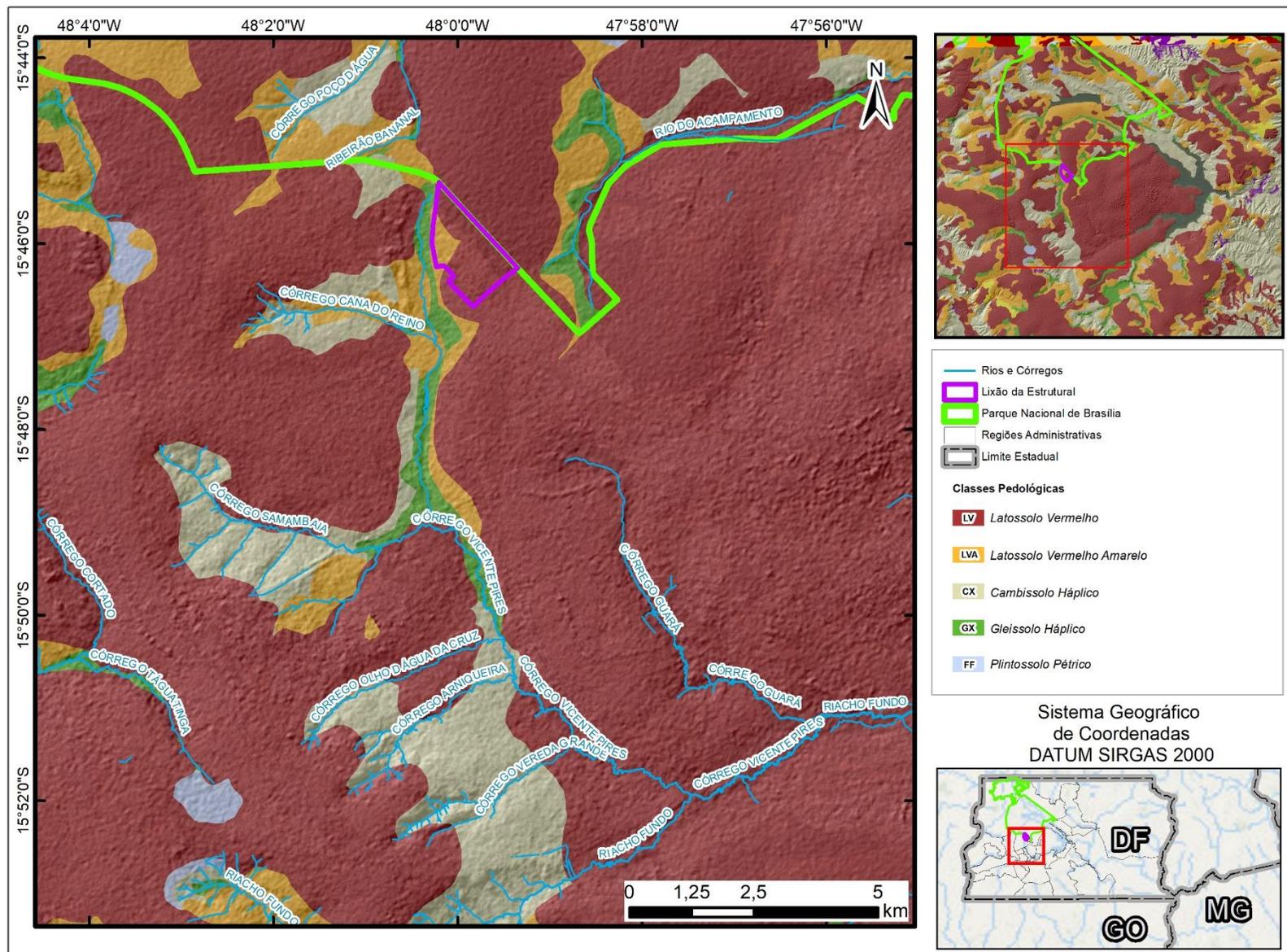


Figura 2.4 - Classes de solos ocorrentes na região de estudo segundo o Mapa de Solos do Distrito Federal, na escala de 1:100.000 (Embrapa, 1978).

O compartimento de rebordo possui cotas entre 1050 e 1100 metros, um padrão de relevo ondulado, moderada densidade de drenagem, maior presença de cambissolos com latossolos subordinados. Suas declividades estão entre 10 e 20% e nele há equilíbrio dos processos morfodinâmicos, ou seja, a erosão e a pedogênese são equivalentes no balanço morfodinâmico (GDF, 2010).

A Figura 2.6 exibe os padrões de relevo e a hipsometria regional da área de estudo. Pelas descrições dos compartimentos geomorfológicos apresentadas no Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF) é possível observar a congruência das informações com os dados provenientes de outras fontes, tanto para as classes de relevo, como para o intervalo de elevação.

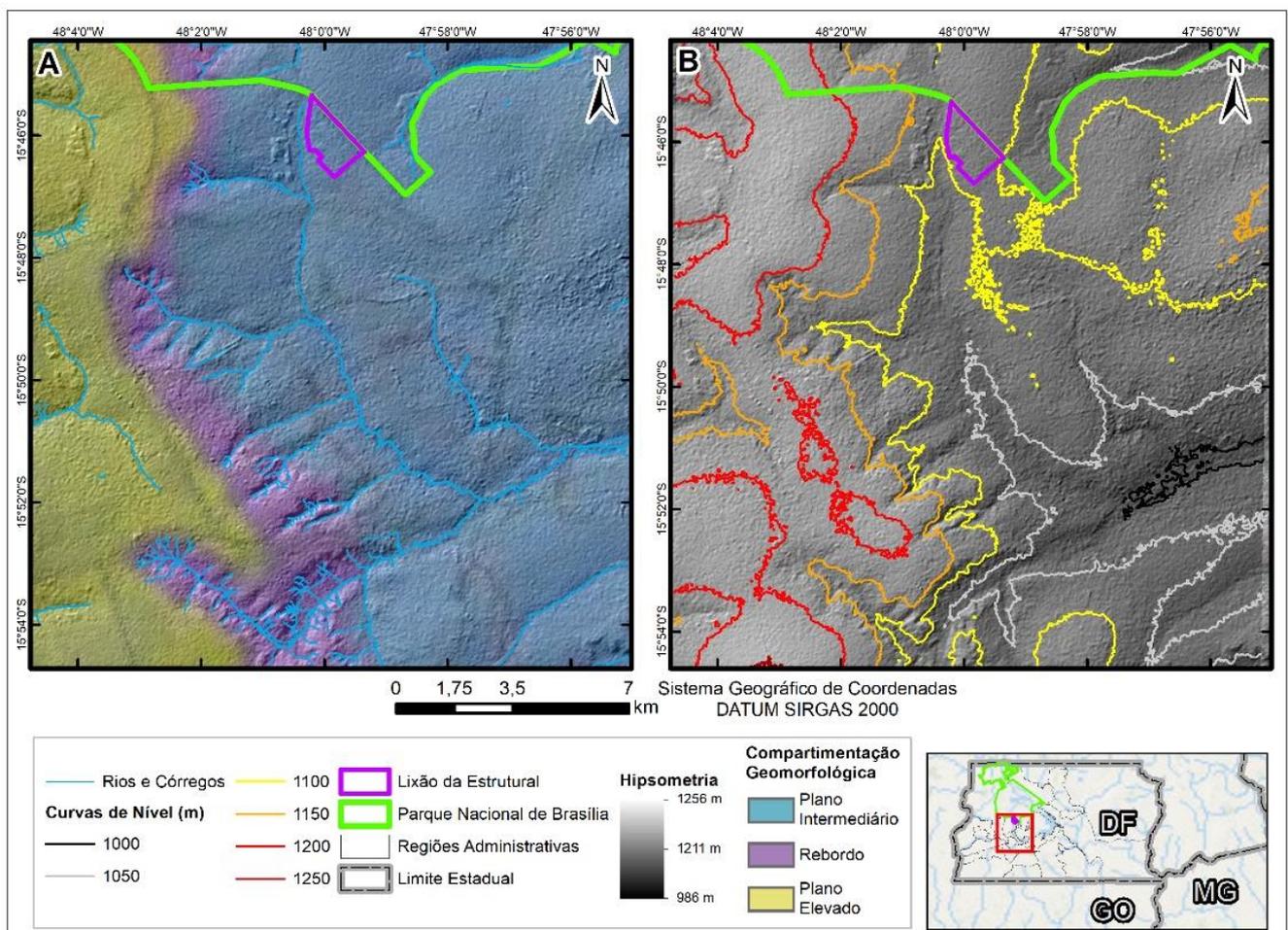


Figura 2.5 -A: Compartimentos geomorfológicos na região central do DF de acordo com o Subproduto 3.1 do ZEE-DF (Fonte: GDF, 2010). **B:** Curvas de nível elaboradas a partir de MDE do ALOS (Fonte: ASF Vertex).

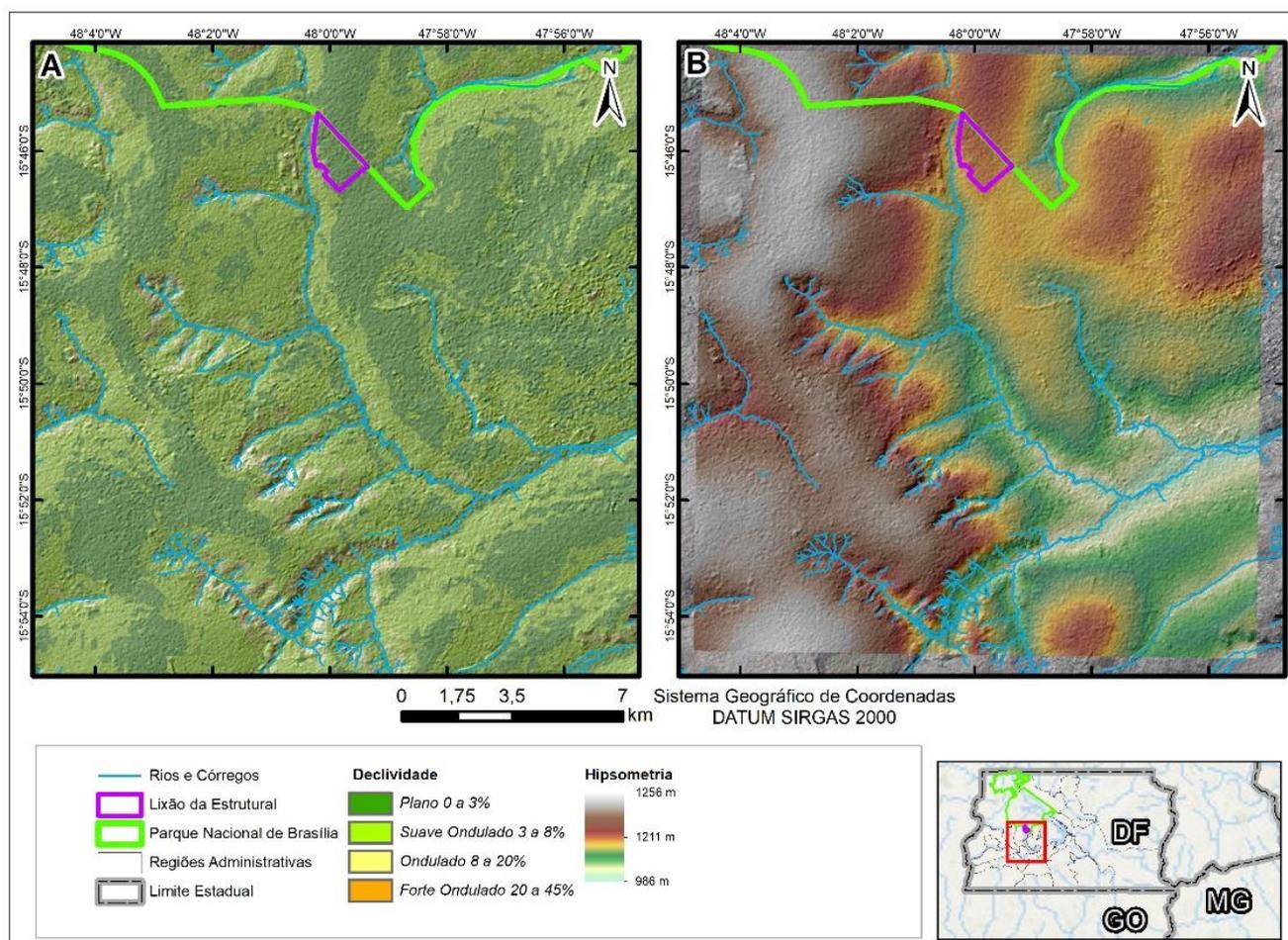


Figura 2.6 - A: Declividade e classes de relevo (Fonte: CPRM-LADEIRA NETO, 2010) da área. **B:** Elevação da região centro-oeste do DF, elaborada a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12,5 metros (Fonte: ASF Vertex, Cena de Satélite ALOS Sensor PALSAR).

2.4 Clima

O clima da região apresenta algumas pequenas variações de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger segundo Alvares *et al.* (2013) (Figura 2.7), compreendendo as classes de Tropical de Savana (Aw), subtropical úmido (Cwa) e subtropical de altitude (Cwb). Tais classes de clima, de maneira geral, apresentam os invernos secos e os verões chuvosos, ou seja, é marcadamente sazonal. A temperatura média anual é de 21,9°C, segundo os dados da Estação Convencional Brasília, e a precipitação anual acumulada é de 1443 mm (entre 1999 e 2019) (Figura 2.8).

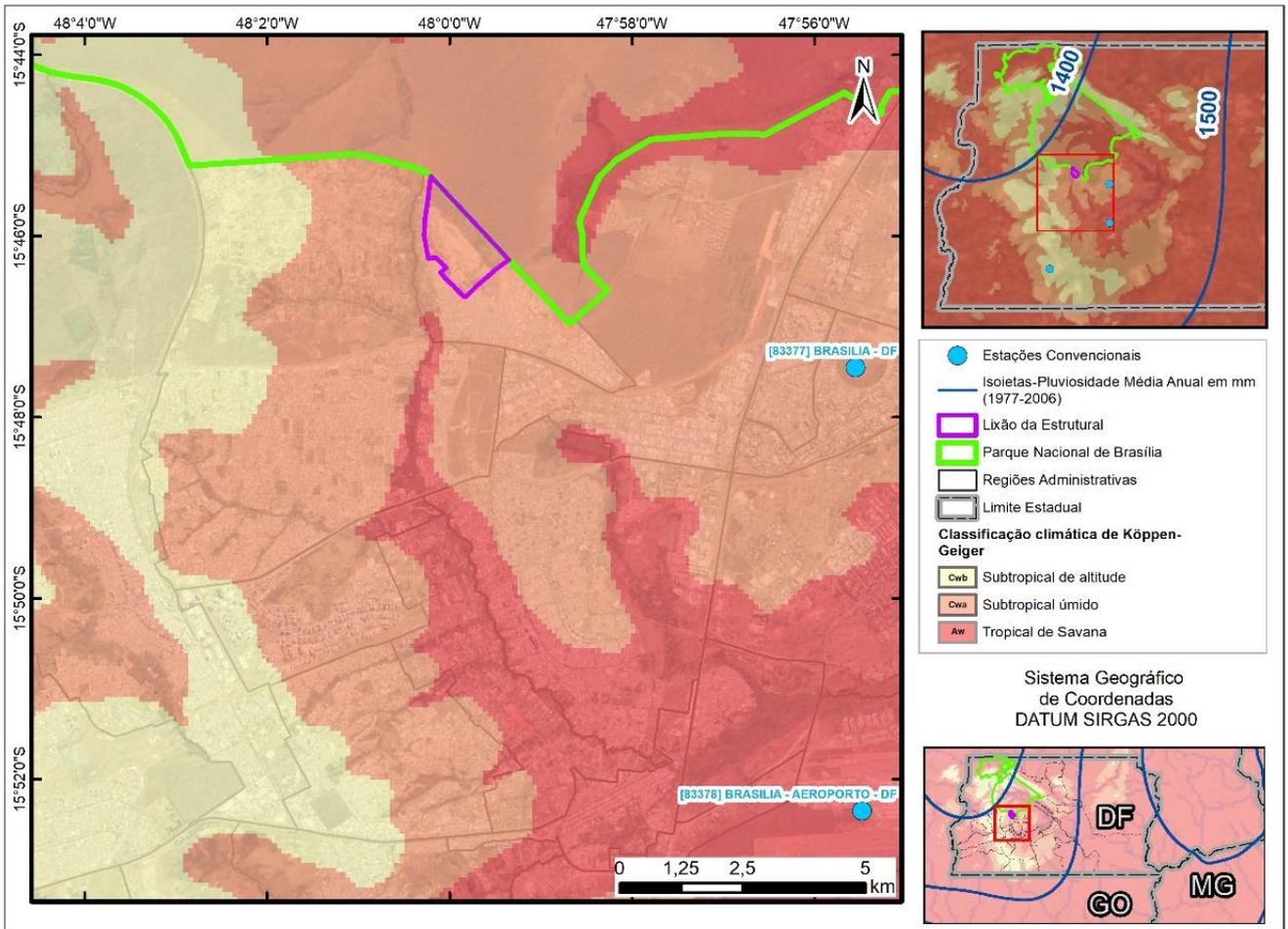


Figura 2.7 - Classificação climática de Köppen-Geiger na região (Fonte: ALVARES et al., 2013). É possível observar também que a área de estudo está entre as isoietas de 1500 mm e 1400 mm (Fonte: Atlas Pluviométrico do Brasil-CPRM, 2014).

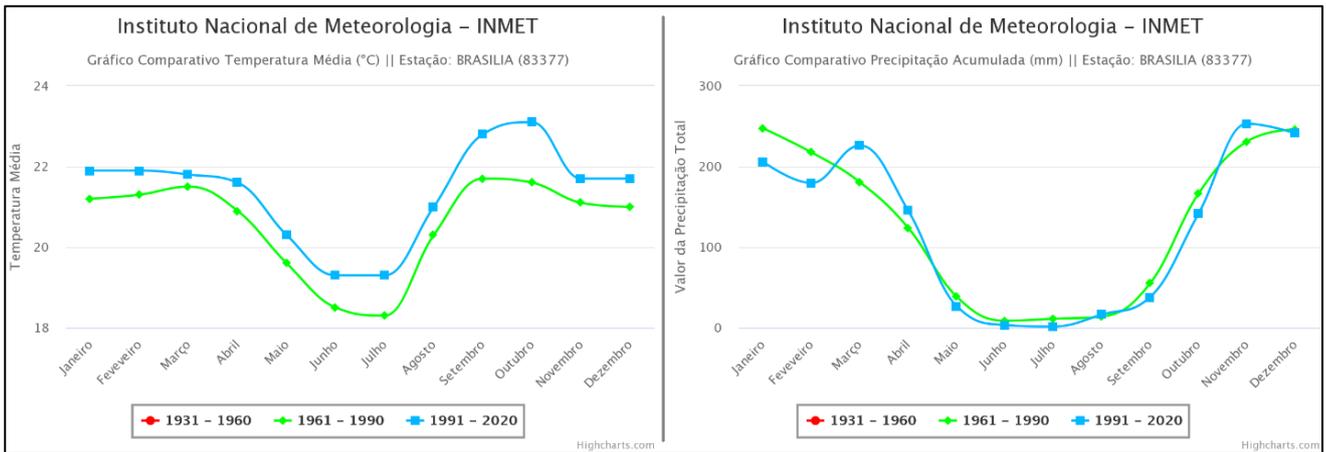


Figura 2.8 - Temperatura média (°C) e precipitação acumulada (mm) no DF de acordo com os dados da Estação Convencional Brasília (Fonte: INMET).

2.5 Histórico de Ocupação do Lixão e Extensão atual da Pluma de Contaminação

Baseado em informações publicadas e análise de fotografias aéreas, Franco (1996) foi capaz de entender a configuração da disposição de resíduos, e apresentar a série histórica de ocupação. A conformação é constituída de três partes: norte, central e sul.

A parte sul seria a mais antiga, com uma porção estando fora dos limites do aterro. Ela contém o lixo aterrado desde o princípio das suas atividades até o ano de 1978. Atualmente, essa área encontra-se habitada devido a invasões. Entre os anos de 1978 e 1986 a deposição do lixo ocorreu na porção sul e de 1987 a 2012 na central. A parte norte foi sendo coberta pelo depósito de lixo de 1995 em diante (Figura 2.9). Posteriormente houve a verticalização da acumulação de resíduos nas porções central e norte do lixão.

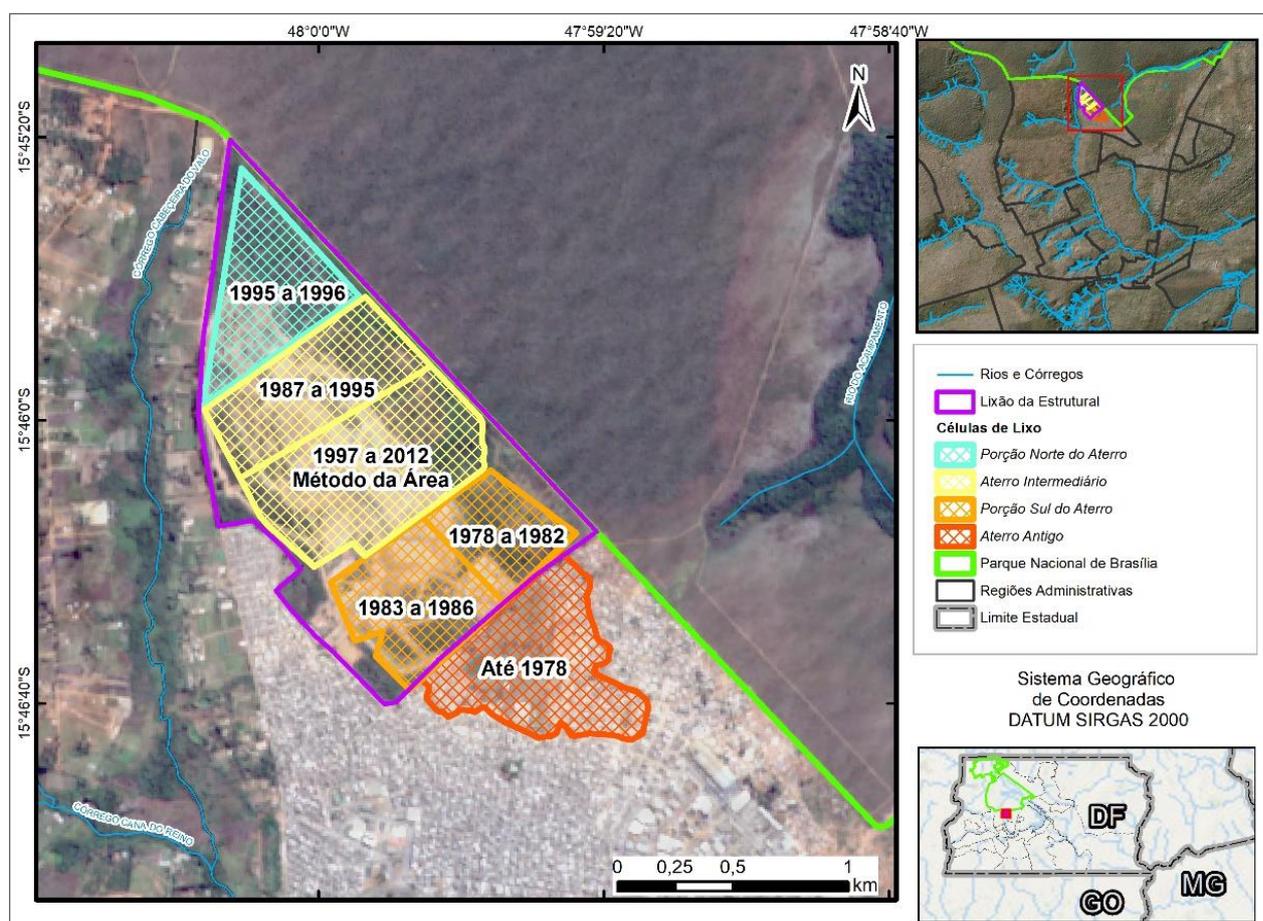


Figura 2.9 - Série histórica da disposição de resíduos sólidos no Lixão da Estrutural (Fonte: Franco, 1996).

A despeito de a pluma de contaminação já ter sido bastante estudada e possuir alguns diversos modelos conceituais e numéricos, é no Diagnóstico de Contaminação (SEMA, 2021) mais recente que estão as informações mais atuais e integradas sobre o assunto. Nesse estudo, a distribuição da pluma foi representada conforme a distribuição da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos percolados líquidos amostrados nos poços tubulares da região. Esse parâmetro indica a concentração e densidade do contaminante, de acordo com todas as espécies iônicas dissolvidas.

Representada na Figura 2.10, a pluma de contaminação é compartimentada em intervalos de concentração/conductividade elétrica, em que as áreas destacadas em tons de rosa são representantes da zona de produção e de concentração mais elevada, associadas aos aterros norte e intermediário, os mais recentes. As faixas nas cores bege representam a zona de distribuição, de concentração mais moderada. Já as faixas nos tons de amarelo e verde representam as zonas de mistura (com a recarga natural) e dispersão (SEMA, 2021).

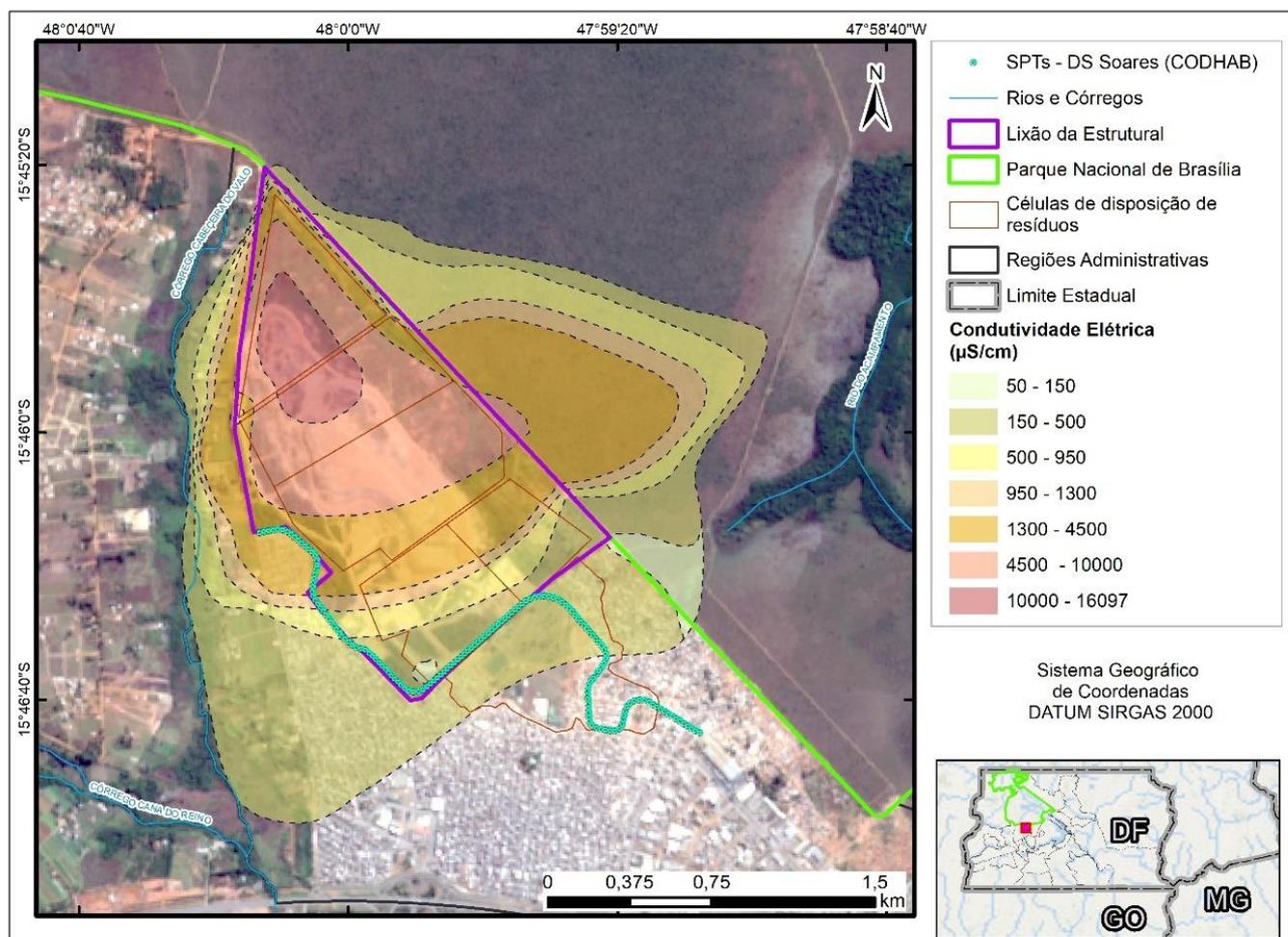


Figura 2.10 - Arranjo mais atual da pluma de contaminação (Fonte: Modificado de SEMA (2021)).

Quanto ao fluxo dessa pluma de contaminação e da água subterrânea, pode-se observar cinco divisões/direções. Na porção leste, a partir da zona intermediária de acumulação de resíduos para leste e para N45E a partir do lixo antigo acumulado, em direção à zona de cabeceira do Córrego do Acampamento. Já no quadrante oeste, a partir da zona norte do lixão há fluxo no sentido oeste; a partir da porção central e sul do aterro há fluxo no sentido S45W, e no extremo sul do maciço o fluxo é para S20-30W, migrando sob a área urbana. Todo esse fluxo em direção ao Córrego Cabeceira do Valo (SEMA, 2021).

CAPÍTULO 3

ANÁLISE GEOTÉCNICA DE ÁREAS ADJACENTES AO ATERRO

3.1 Introdução e Referencial Teórico

Segundo as especificações da ABNT - NBR 6484:2001 e ABNT - NBR 6484:2020, os tipos de sondagem SPT se resumem em dois: o convencional ou a “seco” (conforme breve descrição no item 1.5.2) e o com “lavagem”, que ocorre com circulação de água.

Pela descrição das NBRs 6484, o procedimento de sondagem SPT segue um conjunto de passos bem definidos para garantir a eficácia e a precisão dos resultados. Inicialmente, para o processo de perfuração é utilizado o trado-concha ou a cavadeira manual até atingir uma profundidade de 1 metro. Em seguida, o primeiro segmento do tubo de revestimento é instalado até essa profundidade, equipado com uma sapata cortante.

Durante as operações subsequentes de perfuração, intercaladas com ensaios e amostragens, um trado helicoidal é utilizado até atingir o nível do lençol freático. É importante observar que não é permitido cravar o trado dinamicamente com golpes de martelo ou por impulsão da composição de perfuração.

Se o avanço da perfuração com o trado helicoidal for inferior a 50 mm após 10 minutos de operação, ou no caso de solo não aderente ao trado, o método de perfuração por circulação de água, também conhecido como lavagem, é adotado.

Na perfuração por circulação de água, o trépano de lavagem é empregado como ferramenta de escavação. O material escavado é removido através da circulação de água, realizada pela bomba d'água motorizada, enquanto a composição de perfuração (conjunto de equipamentos e materiais: hastes, trados e brocas) é elevada cerca de 30 cm acima do fundo do furo e depois cai, acompanhada de movimentos de rotação alternados pelo operador.

Conforme a profundidade do furo se aproxima da cota de ensaio e amostragem, recomenda-se diminuir progressivamente a altura da elevação da composição de perfuração. Quando atingir essa cota, a composição de perfuração deve ser suspensa a uma altura de 0,20 m do fundo do furo, mantendo-se a circulação de água pelo tempo necessário para remover todos os detritos da perfuração do interior do furo.

Portanto, com base na síntese do processo de perfuração e pela leitura do trabalho de Araújo *et al.* (2018), admite-se que as sondagens SPT com lavagem são utilizadas em diversos casos, especialmente quando as condições do solo são desfavoráveis para a utilização do trado helicoidal. Para sondagens que possam atingir profundidades significativas, a lavagem pode ser preferível para garantir a limpeza do furo e a remoção eficiente dos detritos durante todo o processo de perfuração. As 156 sondagens SPT que fundamentam esse trabalho foram realizadas com lavagem.

Tentativamente presume-se que este método foi adotado por se tratar de sondagens com grande avanço devido ao contexto de contaminação e de maciços afetados pelo chorume.

3.2 Perfis Geotécnicos, Materiais Geotécnicos e Geológicos

Mesmo com uma disposição sequencial e equidistante (de 20 em 20 metros), as 156 sondagens SPT são apresentadas em perfis individuais, de maneira restrita, e quando avaliadas isoladamente não possibilitam o entendimento completo do contexto geral do subsolo na área.

Por meio da integração desses dados em um perfil integrado foi possibilitada a compreensão mais completa, com uma análise e interpretação ampla do substrato da região. Mediante do *software* de edição de imagens e vetores, o *Inkscape* 1.3.2, foram plotadas as principais informações dos perfis metro a metro.

Inicialmente, cada valor de índice de resistência a penetração (N_{SPT}) foi associado a uma classe de designação para o material, conforme os estados de compactidade e de consistência. Essa designação para os intervalos de valores N_{SPT} foi feita de acordo com o estabelecido pela ABNT, na NBR 6484:2001, mais simplificada que a sua segunda edição de 2020. A Tabela 3.1 representa as designações de acordo com os índices SPT.

Tabela 3.1 - Quadro que apresenta os níveis de compactação e coesão dos solos argilosos, relacionados à sua deformabilidade e resistência, considerando-se sua aplicação em fundações.

Solo	Índice de resistência a penetração - N	Designação
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito Mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

Em seguida, para cada sondagem, as classes de designação foram plotadas por meio de cores diferentes metro a metro. Em um perfil considerando o distanciamento real das sondagens, em conformidade com o exagero vertical pretendido, cada sondagem foi posicionada e ajustada.

Devido às diferentes direções de alinhamento em que os dados foram obtidos, as seções foram divididas por trechos, totalizando oito, de tamanhos e direções distintas. Ademais, por estarem em sequência e serem equidistantes, as seções apresentam as distâncias horizontais de maneira progressiva de uma seção para outra, para fins de mensuração e posicionamento.

Em seguida, após os ajustes e configurações das seções, desenvolveu-se uma modelagem sobre a distribuição espacial em profundidade das classes de resistência do terreno considerando também sua distribuição lateral e a disposição de aterro de resíduos sólidos (material exógeno ou tecnogênico).

A primeira seção (SPTs 1 a 22 - Figura 3.1) revela que até aproximadamente 8 metros de profundidade há continuidade da designação *Muito Mole* e *Mole* em subsuperfície, até por volta dos 400 metros de extensão do perfil. Enquanto a classe *Média* apresenta descontinuidades e heterogeneidades nas profundidades intermediárias do perfil, entre 8 e 16 metros, com presença de várias faixas de outras classes em seu interior e, variação de espessuras. A espessura mais delgada ocorre no topo entre os 70 e 170 metros da extensão horizontal e a espessura maior, da superfície até 23 metros de profundidade, acontece a partir de 390 metros da extensão do perfil.

Ainda na primeira seção (SPTs 1 a 22 - Figura 3.1), a designação *Rija* também apresenta um padrão descontínuo e heterogêneo, com estratos de outras classes entremeadas e alteração de espessura ao longo do perfil. A espessura média se adelgaça em duas regiões, entre 150 e 170 metros e a partir dos 390 metros da extensão horizontal do perfil. Já a classe *Dura* do primeiro trecho apresenta maior homogeneidade, sendo distribuída ao longo dos níveis mais profundos do perfil até o nível do impenetrável, contudo, sua espessura também apresenta variações, em dois locais, entre 50 e 70 metros e entre 150 e 170 metros do eixo horizontal.

De maneira geral, o segundo trecho (SPTs 22 a 54 - Figura 3.1) é heterogêneo e descontínuo, desde a superfície até as maiores profundidades. Os locais com designação *Muito Mole* se concentram nas porções superficiais, até por volta de 10 metros de profundidade, mas de maneira dispersa. Os estratos classificados como *Mole* são contínuos desde 545 metros até 845 metros da extensão horizontal, com espessura média desde a superfície até por volta de 10 metros de profundidade. Outro local de maior ocorrência dessa mesma classe no perfil se dá por volta de 890 metros indo até o final, com aproximadamente a mesma espessura. A distribuição de outras classes em variados locais dentro dessas duas zonas transcorre de forma heterogênea.

Da superfície do terreno até por volta de 25 metros de profundidade e entre 420 e 575 metros do eixo horizontal, ocorre uma grande zona da classe *Média* do segundo perfil (SPTs 22 a 54 - Figura 3.1) com diversos estratos das outras classes imersas, mas de forma subordinada. Essa mesma zona se estende de 575 até 885 metros, de maneira contínua, mas com outras faixas de designação contrastantes presentes ao longo desse estrato. O quarto final do perfil (a partir dos 845 metros) é composto por 3 estratos, sendo dois os mais profundos bem desenvolvidos verticalmente, como vales, e o estrato superficial mais desenvolvido horizontalmente.

A classe *Rija* presente no segundo perfil (SPTs 22 a 54 - Figura 3.1) é a mais descontínua, tanto horizontal como verticalmente. Também é a classe que mais se faz presente com estratos individuais nas outras zonas, além de ter espessura variável. Suas regiões mais marcantes são no primeiro e último quarto do perfil, sendo a primeira composta por fragmentos horizontalizados distribuídos ao longo da superfície até por volta de 25 metros de profundidade em meio a uma grande zona da classe *Média*. Já a segunda região é marcada por três vales, o primeiro com uma

separação do estrato da classe *Rija* e os outros dois com diminuição abrupta da espessura do horizonte.

Por fim, fechando o segundo perfil (SPTs 22 a 54 - Figura 3.1), a classe *Dura* desenvolve-se horizontalmente de maneira uniforme, com pouca variação de espessura, mas com algumas variações de altitude em níveis, caracterizando típicos degraus.

A terceira seção (SPTs 54 a 92 - Figura 3.2), apresenta um padrão homogêneo predominando sobre um pequeno trecho de padrão heterogêneo. A classe *Muito Mole* tem ocorrência restrita e dispersa, enquanto a classe *Mole* tem ocorrência ampla e contínua. Essa classe está presente desde a superfície até por volta de 10 metros de profundidade e a partir dos 1120 metros até o fim do perfil, o maior estrato de designação *Mole* coexiste com fragmentos de outras classes.

Ao passo que suas zonas com designação de classe *Média* (SPTs 54 a 92 - Figura 3.2), apesar de contínuas, ocorrem com uma grande variação de espessura e variação de elevação em relação ao nível basal. Entre 1150 e 1270 metros do eixo horizontal verifica-se uma região mais desenvolvida verticalmente, entre 3 e 27 metros, com grande presença de estratos horizontalizados de outras classes, principalmente da designação *Rija*.

A classe *Rija* (SPTs 54 a 92 - Figura 3.2) que por sua vez apresenta padrão semelhante ao da classe anteriormente citada, onde há ampla variação da elevação do nível do horizonte aliada à grande variação de espessura. Na região entre 1040 e 1150 metros da extensão horizontal do perfil há o maior desenvolvimento vertical do horizonte, de 10 a 30 metros de profundidade, e com grande porção de quase 10 metros de espessura da classe *Média* ocupando a região inferior. No trecho entre 1150 e 1270 metros citado anteriormente, manifestam-se diversos fragmentos da classe *Rija* dispersos na matriz classificada como *Média*. De 1270 metros em diante há um padrão de variação de nível e espessura, configurando vales e cumes.

De forma similar aos perfis anteriores, a classe *Dura* da terceira seção (SPTs 54 a 92 - Figura 3.2) tem como características primordiais que, horizontalmente, o desenvolvimento ocorre de maneira uniforme, com pouca variação na espessura, embora apresente algumas variações de nível em patamares distintos.

Manifestando-se de maneira dispersa, mas com fragmentos bem desenvolvidos horizontalmente, a classe *Muito Mole* do quarto perfil (SPTs 92 a 111 - Figura 3.2) ocorre na superfície apenas em um trecho restrito, entre 1870 e 1910 metros. Já o fragmento *Mole* ocorre de maneira contínua, mas com variação de espessura e presença de pequenos fragmentos das outras designações.

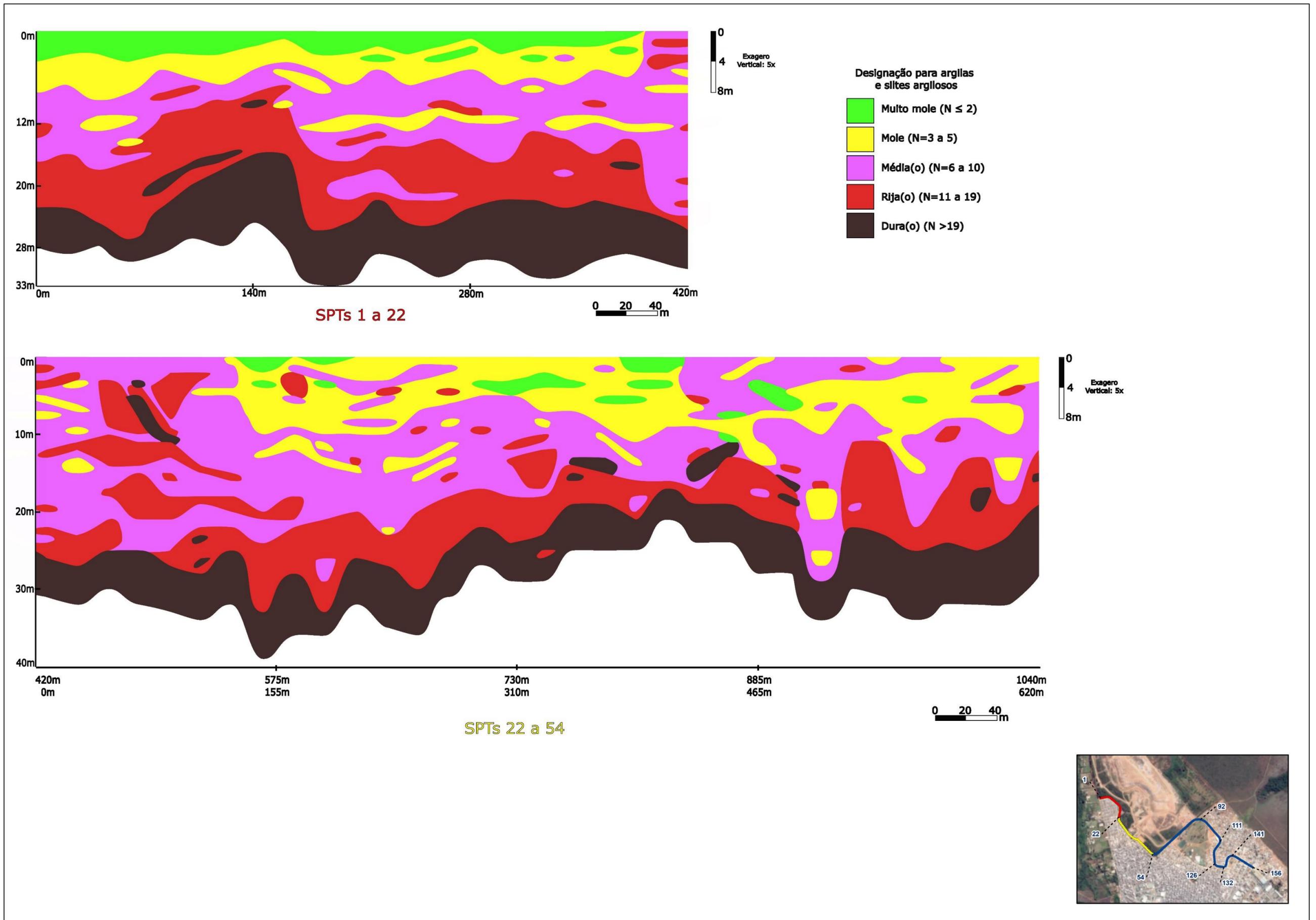


Figura 3.1 - Integração e interpretação geotécnica das seções SPTs 1 a 22 e SPTs 22 a 54.

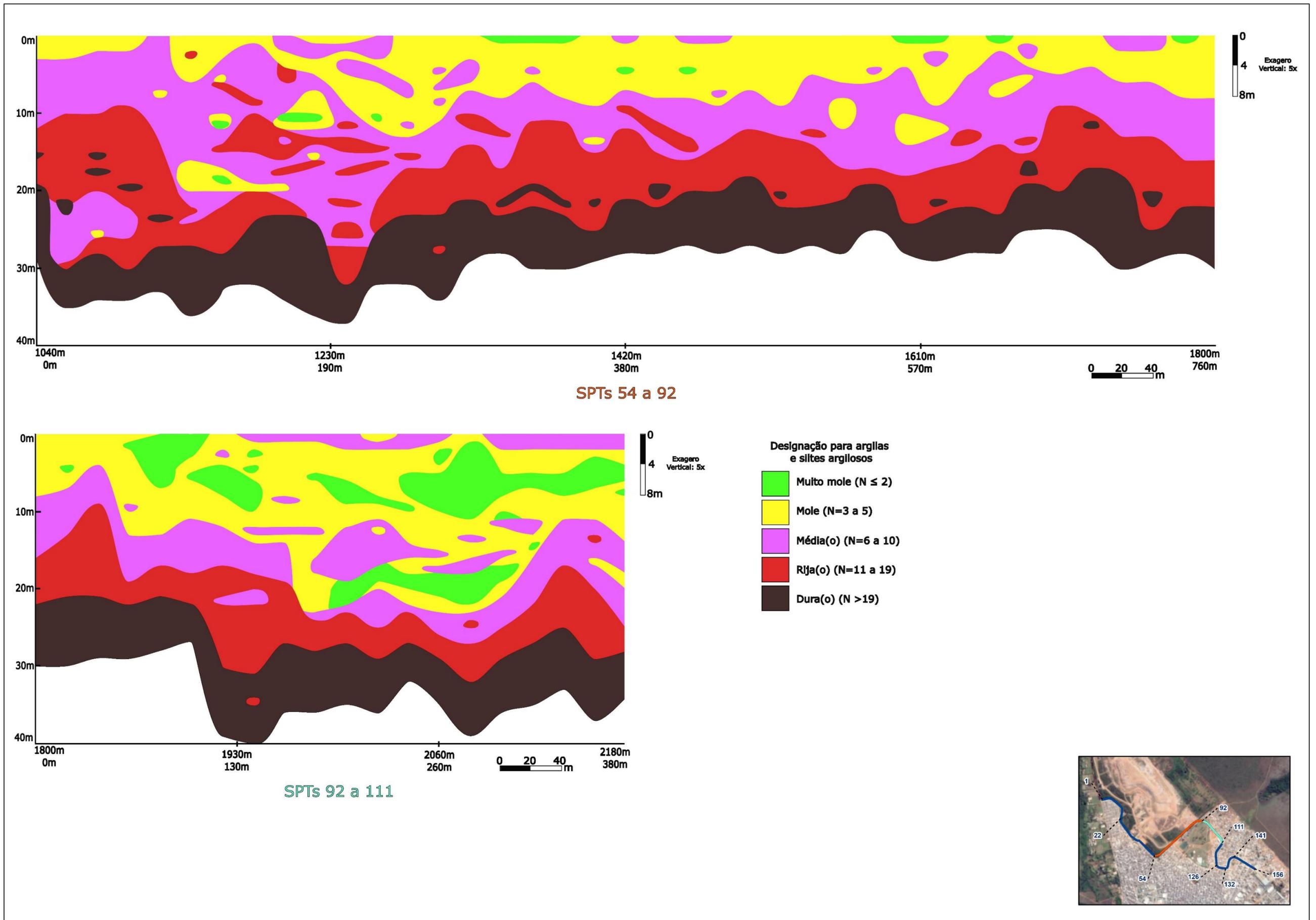


Figura 3.2 - Perfis N_{SPT} das seções SPTs 54 a 92 e SPTs 92 a 111.

A classe *Média* (SPTs 92 a 111 - Figura 3.2) é a mais heterogênea em termos de espessura, distribuição e continuidade. Essa classe apresenta fragmentos na superfície e na porção intermediária. Os maiores fragmentos da porção intermediária individualmente são contínuos, porém possuem variação abrupta de nível. Em contrapartida, as regiões constituídas pelas classes *Rija* e *Dura* são contínuas e homogêneas, contudo também apresentam variação abrupta de nível.

As quatro seções restantes SPTs 111 a 126, SPTs 126 a 132, SPTs 132 a 141 e SPTs 141 a 156 (Figura 3.3) apresentam padrões muito semelhantes entre si, com horizontes mais contínuos e homogêneos. O estrato de designação *Muito Mole* dos quatro perfis ocorre por volta de 3 até 10 metros de profundidade, entre um horizonte superficial de classe *Mole* e outra a partir de 10 metros de profundidade da classe *Média*.

Na superfície dos quatro perfis, com espessura média de aproximadamente 2 metros, ocorrem horizontes contínuos de designação *Média* (Figura 3.3). Por volta dos 15 metros de profundidade até aproximadamente 20 metros ocorrem horizontes mais lineares nos perfis SPTs 126 a 132 e SPTs 132 a 141. Já nas seções SPTs 111 a 126 e SPTs 141 a 156 os estratos de classe *Média* da porção intermediária exibem morfologia bem marcada de vales e cumes.

Por fim, os horizontes de classificação *Rija* apresentam a mesma estruturação de cumes proeminentes e vales, sobre o último estrato dos perfis, o de designação *Dura*, que acompanham essa conformação de maneira um pouco mais suave (Figura 3.3).

Estas interpretações geotécnicas apresentadas revelam coerências com o esperado pelo contexto pedo-geológico e geomorfológico, em termos de desenvolvimento da pedogênese, mas também demonstram amplas heterogeneidades em diferentes profundidades.

Dada a complexidade do dado em questão, torna-se essencial empreender análises complementares para fornecer uma compreensão mais abrangente e holística. Portanto, a derivação destes perfis em perfis de materiais geotécnicos, ou seja, baseados basicamente na descrição geológica dos horizontes (táctil-visual) dos perfis e na distribuição de aterro, representa a próxima etapa deste processo.

Na superfície do primeiro trecho (SPTs 1 a 22 - Figura 3.5), dada a descrição dos materiais até por volta dos 8 metros de profundidade, interpretou-se como um horizonte de solo, incluindo os horizontes A e sucessão de Bw de um Latossolo. Segundo a descrição do material (Apêndice 1), há predominância de argila arenosa-siltosa, com cor variando de amarelada, a marrom e até rosa amarelada. Portanto, as maiores e mais contínuos horizontes de classes *Muito Mole* e *Mole* foram englobadas neste mesmo estrato, com algumas partes basais de designação *Média*, pelo padrão mais comum de linearidade e horizontalidade de um perfil regolítico de um solo enquadrado no grande grupo dos latossolos.

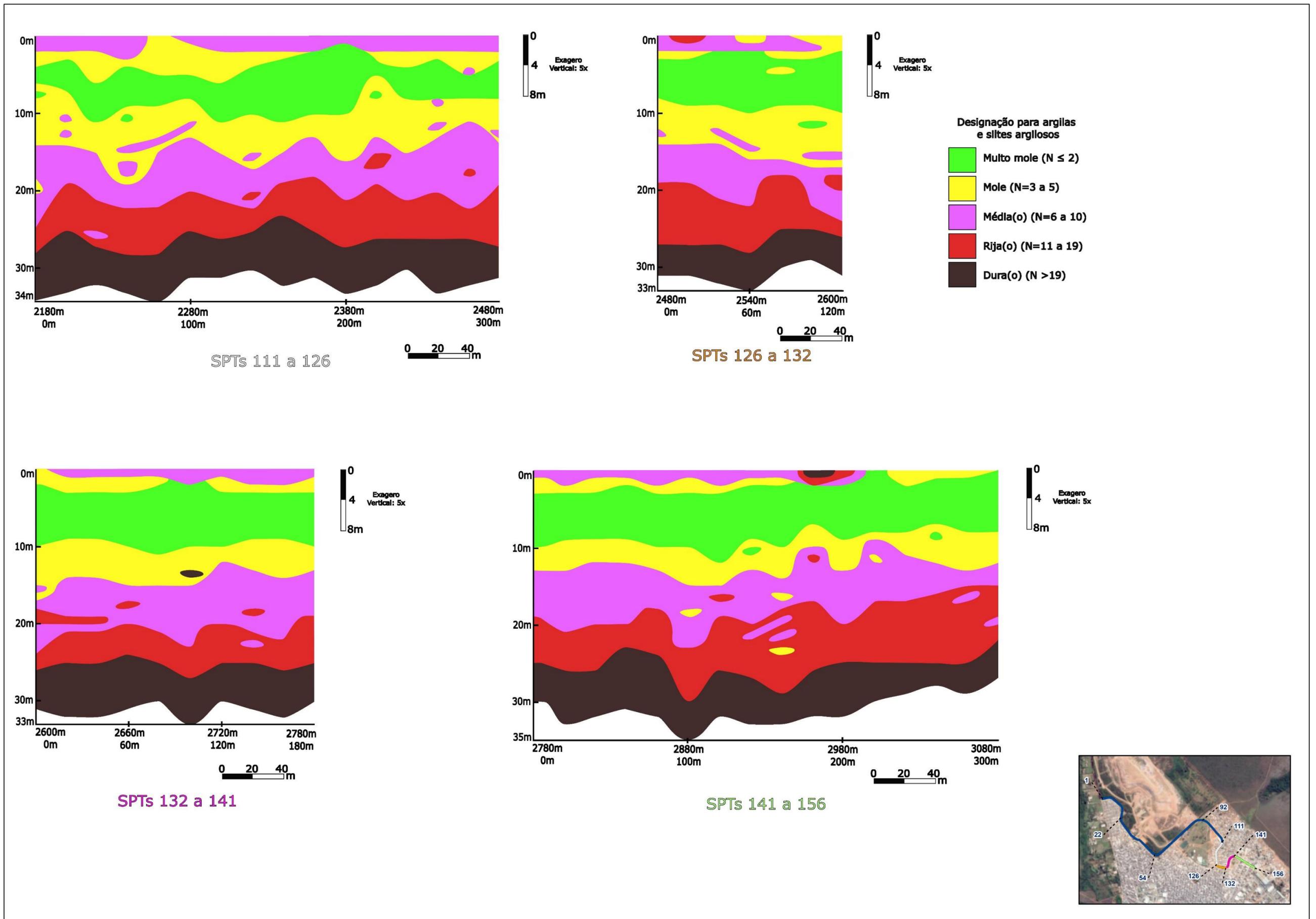


Figura 3.3 - Modelagem dos quatro últimos perfis segundo os valores de índice de resistência a penetração, N_{SPT} .

Também na parte superior deste mesmo perfil, ocorre uma região de aterro entre as SPTs 21 e 22, até por volta de 4 metros de profundidade. A descrição deste material é de uma argila plástica, pouco arenosa, com cor variegada e compactada. E a sua designação seria *Média a Rija*, algo esperado para um material exógeno em superfície, possivelmente representado por aterro com caráter de bota-fora.

Abaixo dos materiais anteriormente descritos, ocorre um nível bastante heterogêneo em espessura e distribuição de classes. De acordo com os dados do Apêndice 1, predominam argilas siltosas de cor marrom avermelhada e de designação *Média a Mole*. Contudo, coexistem argilas arenosas, a pouco siltosas com pedregulhos finos, de cor marrom vermelha e classificadas de *Média a Mole*. Todavia, também ocorrem um terceiro tipo de descrição, definido por argila siltosa, com cor amarela avermelhada, de *Média a Rija*. Portanto, por toda variação e heterogeneidade, este extrato é interpretado como algo equivalente a um primeiro horizonte de alteração do material rochoso (Figura 3.4), definido como horizonte C1 (SPTs 1 a 22 - Figura 3.5).

No penúltimo estrato do perfil (SPTs 1 a 22 - Figura 3.5) a interpretação seria de um material rochoso que tem as suas características químicas e mineralógicas mais preservadas em relação ao horizonte sobreposto, sendo então denominado Horizonte C2. Ele também apresenta uma variedade de materiais conforme a descrição táctil-visual (Apêndice 1). Argilas arenosas de cor amarela avermelhada e designação *Rija a Média* predominam. Em menor proporção ocorrem argilas siltosas, a um pouco arenosas, de cor vermelha e classes variando de *Média a Rija*. Por fim, também são relatados siltes argilosos, com pedregulhos finos, de cor amarelo avermelhado e e caráter *Rijo*.

Em última análise, o nível basal é descrito predominantemente como areia silto-argilosa, de cor rosa, roxa ou cinza variegada, compacta a muito compacta (Apêndice 1). Em menor proporção, também é caracterizado como areia siltosa, cor vermelha amarelada variegada, compacta a muito compacta. Dessa forma, este estrato é considerado como o material representante da rocha alterada (Figura 3.4), sendo o mais homogêneo e contínuo (Figura 3.5), tendo apenas designação *Dura* ($N \geq 19$).

A segunda seção mostra uma distribuição de aterro heterogêneo por toda sua extensão, entre as SPTs 22 e 54 (Figura 3.5). Além de apresentar a espessura variada, entre 4 e 15 metros de profundidade, todas as designações são englobadas na região do aterro, de *Muito Mole a Dura*. Trata-se de um material descrito (Apêndice 1) como argila plástica pouco arenosa, com cor variegada e de compactação fofa variando até compactada. Dessa forma, provavelmente este aterro é constituído de materiais diversos, com resíduos domésticos, produtos de bota-fora, entulhos de obras, resíduos de varrição e podas etc.

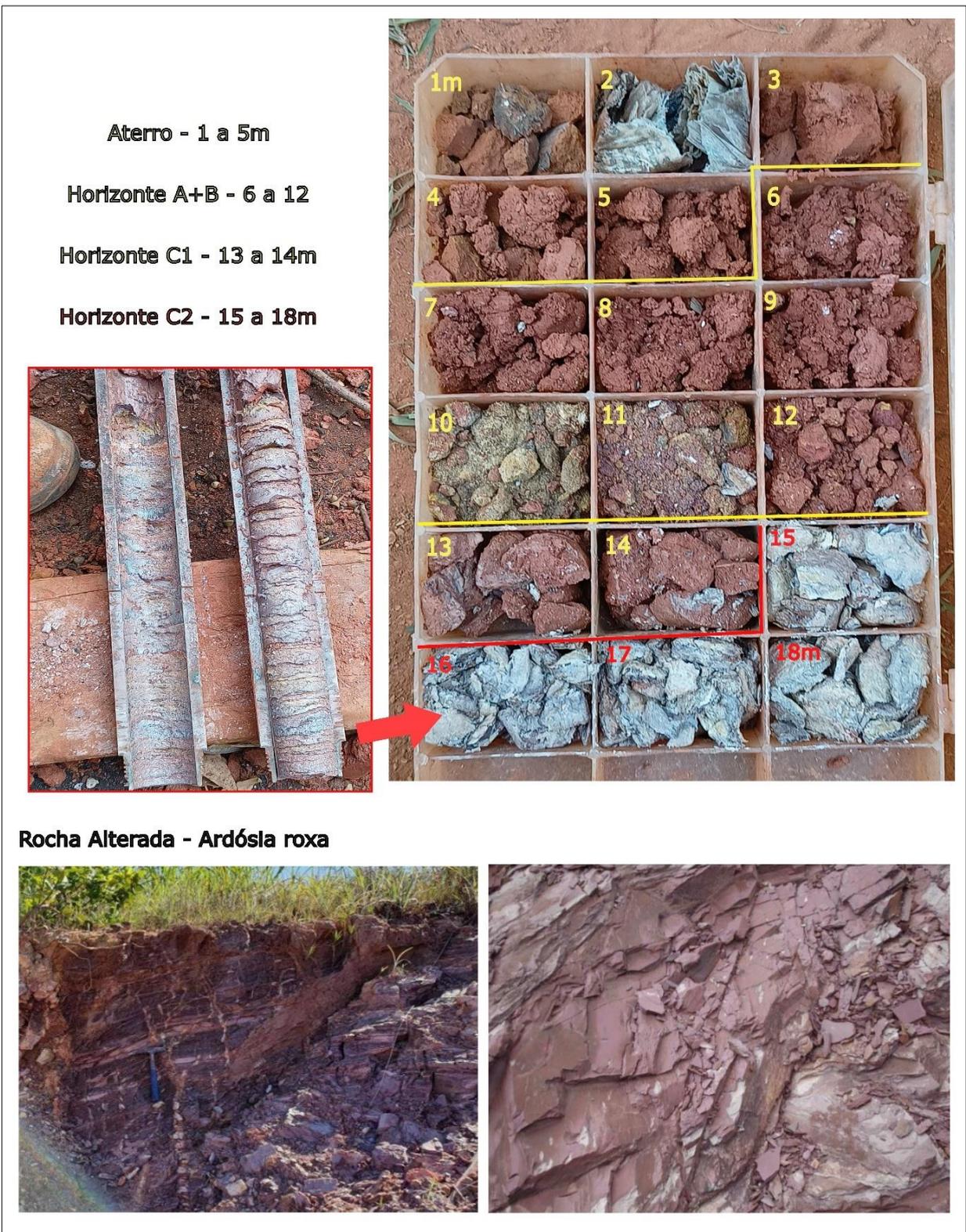


Figura 3.4 - Amostras do perfil de solo nas proximidades da região entre as SPTs 44 e 45 (Apêndice 2, SPT01-10572), com representantes de cada extrato, desde o aterro até o Horizonte C2. Adicionalmente, exemplares da rocha alterada, a ardósia roxa da Formação Ribeirão do Torto em diferentes lugares do Distrito Federal.

O horizonte sotoposto ao aterro (SPTs 22 a 54 - Figura 3.5) é interpretada como o regolito representado por horizontes A e Bs latossólicos (Bws). Sua constituição de classes e espessuras são variáveis, apresentando descontinuidade ao longo do perfil, inferida em razão da presença do aterro entre 770 e 810 metros do eixo horizontal, entre 5 e 10 metros de profundidade. Para este horizonte, segundo a descrição do material (Apêndice 1), ocorrem argilas areno-siltosas de cores marrons avermelhadas e argilas siltosas vermelhas, pouco plásticas, de designação *Mole* até *Rija*.

Ainda com o padrão heterogêneo, os dados do Apêndice 1 exibem para o nível interpretado como horizonte C1 (SPTs 22 a 54 - Figura 3.5) quatro descrições distintas: argilas areno-siltosas de cores marrons avermelhadas, pouco plásticas, de designação *Mole* até *Rija*; argilas siltosas de cor vermelha, pouco plásticas, de designação *Mole* até *Média*; areia argilosa vermelha, pouco a medianamente compacta; areia silto-argilosa branca, medianamente compacta. Assim, o fato de incorporar regiões com classes classificadas como *Mole* até regiões consideradas da classe *Dura* corrobora a gama de descrições deste estrato.

Englobando o maior número de descrições distintas (Apêndice 1), o Horizonte C2 (SPTs 22 a 54 - Figura 3.5) é composto por: areia siltosa com pedregulhos finos, cor amarela avermelhada e compacta; argila siltosa com pedregulhos finos de cor vermelha, média; argila areno-siltosa, com pedregulhos, cor amarela avermelhada, *Média* a *Rija*; argilas arenosa-siltosas de cores marrons avermelhadas, pouco plásticas, de designação *Mole* até *Rija*; silte argiloso roxo, mole a médio; argila areno-siltosa de cor marrom avermelhada, pouco plásticas, de designação *Mole* até *Média*. Em função das classes e locais que foram englobados neste mesmo horizonte; pela diferença de espessura e pelas diferenças abruptas de nível do mesmo extrato, há compatibilidade com as variações descritas pela análise táctil-visual.

Apesar das diversas descrições (Apêndice 1) para o último estrato deste perfil (SPTs 22 a 54 - Figura 3.5), a diferença entre elas é pequena: silte arenoso amarelo rosado, compacto a muito compacto; silte areno-argiloso amarelo rosado, medianamente compacto a muito compacto; areia silto-argilosa rosa amarelada, medianamente compacta a muito compacta; silte argilo-arenoso roxo e rosa, duro; silte argilo-pouco arenoso, cor amarelo rosado, duro. Portanto, o padrão mais homogêneo deste nível permite enquadrá-lo como material de rocha alterada (Figura 3.4), uma vez que, engloba praticamente só a classificação *Dura*.

O aterro exibido na terceira seção estende-se por todo o comprimento horizontalmente e verticalmente acontecendo até pelo menos 4 metros de profundidade, mantendo-se em torno de 5 metros de profundidade na maior parte da seção. Vale destacar que por 150 metros (entre 1270 e 1120 metros) de extensão apresenta 15 metros de profundidade, assumindo um caráter bimodal de distribuição (SPTs 54 a 92 - Figura 3.6). Por se tratar de um material descrito com variação, sendo argiloso ou argiloso a pouco arenoso, cor marrom ou variegada e de compactação fofa a pouco

compactada, abrange designações desde *Muito Mole* até *Rija* e abarca os mais diversos tipos de materiais em sua constituição.

Devido a presença de aterro, entre 1110 e 1280 metros do eixo horizontal e entre 8 e 15 metros de profundidade, compreende-se que há uma grande interrupção na continuidade do horizonte regolítico mais raso (horizontes A e Bws) (SPTs 54 a 92 - Figura 3.6).

As regiões compreendidas por esse nível apresentam apenas classes de designação *Mole* e *Média*, interpretação legitimada pela descrição dos seis tipos de materiais encontrados nesse horizonte: argila areno-pouco siltosa marrom avermelhada, das classes *Mole* a *Média*; argila arenosa, pouco plástica, *Mole* a *Média*, cor variegada; areia argilo-pouco siltosa, fofa a medianamente compacta, cor amarela avermelhado; argila areno-pouco siltosa, pouco plástica, *Mole* a *Média*, cor variegada; areia argilosa, pouco compacta a medianamente compacta e de cor amarelada; areia com pedregulhos, pouco compacta a medianamente compacta, cor vermelha (Apêndice 1).

As classes e locais interpretados como pertencentes ao horizonte C1 (SPTs 54 a 92 - Figura 3.6) são ratificadas quando relacionadas às seguintes descrições: argila arenosa cor marrom avermelhado, pouco plástica, *Mole* a *Média*; argila com pedregulhos médios, *Média*, cor amarelada; argila areno-pouco siltosa, pouco plástica, *Mole* a *Média*, cor variegada; areia argilosa com pedregulhos, pouco a medianamente compacta, cor vermelha; areia micácea, medianamente compacta, cor variegada; areia argilosa, pouco a medianamente compacta, cor amarela; argila siltosa, *Média* a *Rija*, cor vermelha; argila siltosa com pedregulhos finos, micáceo, *Rija* a *Dura*, cor rosa e cinza; argila areno pouco-siltosa, *Rija*, cor marrom avermelhada; argila siltosa pouco arenosa, *Rija*, cor vermelha.

Apesar do grande número de descrições, as poucas diferenças entre elas ainda permitem agrupar no horizonte C2, configurando um estrato mais homogêneo de classes com grandes variações de espessuras e nível do horizonte, com alguns locais abruptos (SPTs 54 a 92 - Figura 3.6). Para este conjunto de seções, os dados do Apêndice 1 mostram as seguintes descrições: argila areno-pouco siltosa, *Mole* a *Rija*, cor marrom avermelhada; argila arenosa, média a *Rija*, cor vermelha; silte argiloso, *Rijo* a *Duro*, cor vermelha; argila arenosa, pouco plástica, *Mole* a *Média*, cor variegada; argila siltosa, *Rija* e *Dura*, cor vermelha; areia silto-argilosa vermelha, compacta; areia siltosa amarela avermelhada, compacta a muito compacta; areia argilosa com pedregulhos finos de quartzo, medianamente compacta a compacta, cor vermelha; areia silto argilosa com pedregulhos finos a médios, pouco micáceo, medianamente compacta a compacta, cor rosa e cinza; argila siltosa, *Rija* a *Dura*, cor marrom avermelhada; argila siltosa pouco arenosa, *Rija*, cor vermelha; areia siltosa compacta a muito compacta, cor rosa; areia argilosa com pedregulhos pouco compacta a medianamente compacta, cor vermelha; areia silto-argilosa micácea,

medianamente compacta a muito compacta, cor rosa e roxa; areia micácea, medianamente compacta cor variegada; areia silto-argilosa micácea medianamente compacta a muito compacta, cor roxa; silte argiloso, *Rijo*, com cor variegada.

Mesmo com as variações abruptas de nível e variações de espessura, o último horizonte deste perfil apresenta características que ainda permitem enquadrar os materiais das diversas descrições como rocha alterada, mas principalmente pela homogeneidade em relação as classes de designação serem de valores N altos (SPTs 54 a 92 - Figura 3.6). As descrições contidas no Apêndice 1 para esses locais são: silte arenoso, compacto a muito compacto, cor amarelo avermelhado; areia silto-argilosa micácea, compacta a muito compacta, cor rosa variegada; areia silto-argilosa micácea, medianamente compacta a muito compacta, cor roxa; areia siltosa, compacta a muito compacta, cor rosa; argila siltosa com pedregulhos finos, micáceo, *Rija* a *Dura*, cor rosa e cinza; silte arenoso, compacto a muito compacto, cor amarelo avermelhado; areia silto-argilosa com pedregulhos finos a médios, pouco micáceo, medianamente compacta a compacta, cor rosa e cinza; areia silto-argilosa, compacta, cor vermelha; silte argiloso, *Rijo* a *Duro*, cor amarelo avermelhado; silte argilo-pouco arenoso, *Duro*, cor amarelo rosado.

Na superfície da quarta seção há uma descontinuidade no estrato de aterro, entre 1870 e 1910 metros da extensão horizontal. A parcela menor é homogênea, possui a espessura média de 3 metros e praticamente só a classe de designação *Mole*. Por outro lado, a maior parcela de aterro é heterogênea, em termos de espessura possui variação entre 4 e 5 metros de profundidade e abarca classes de *Muito Mole* até *Média* (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6). De acordo com os dados do Apêndice 1, os materiais desse horizonte são descritos como: argiloso, pouco plástico, pouco compacto, de cor marrom; ou argiloso, pouco arenoso, fofo e cor marrom.

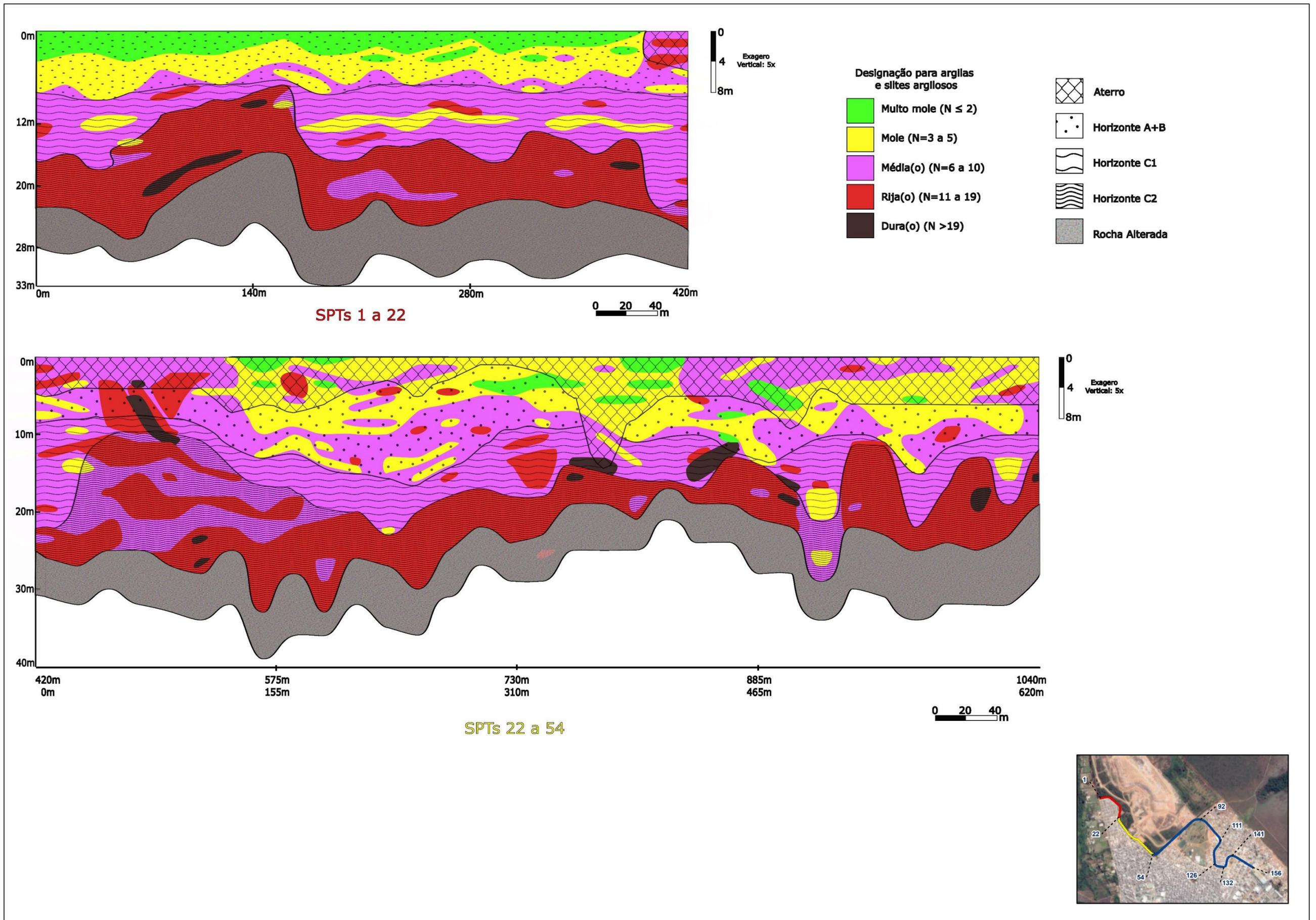


Figura 3.5 - Materiais geotécnicos das duas primeiras seções interpretados de acordo com os valores N_{SPT} e descrição táctil-visual.

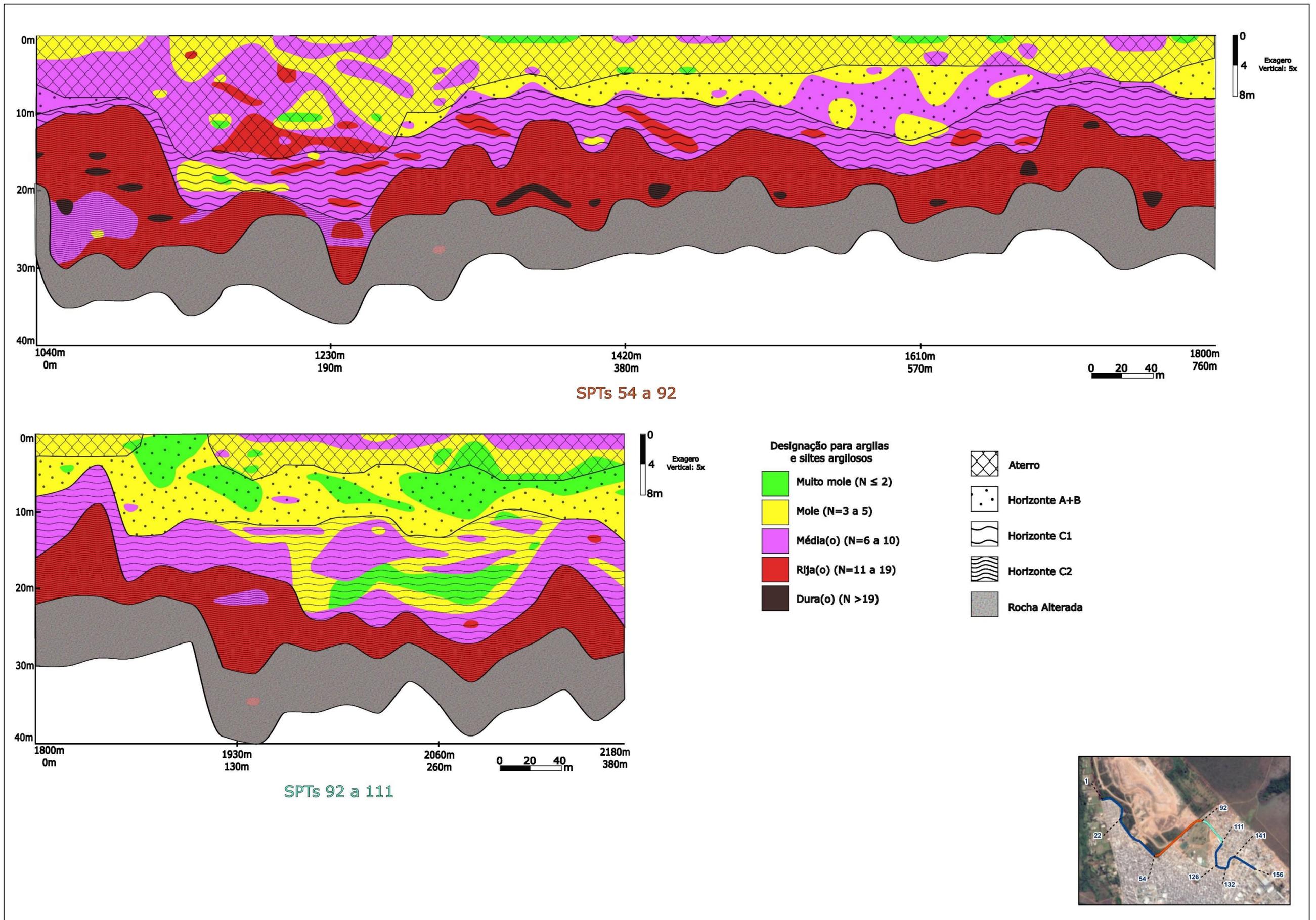


Figura 3.6 - Interpretação dos perfis 3 e 4 segundo integração dos materiais geotécnicos e índices SPT.

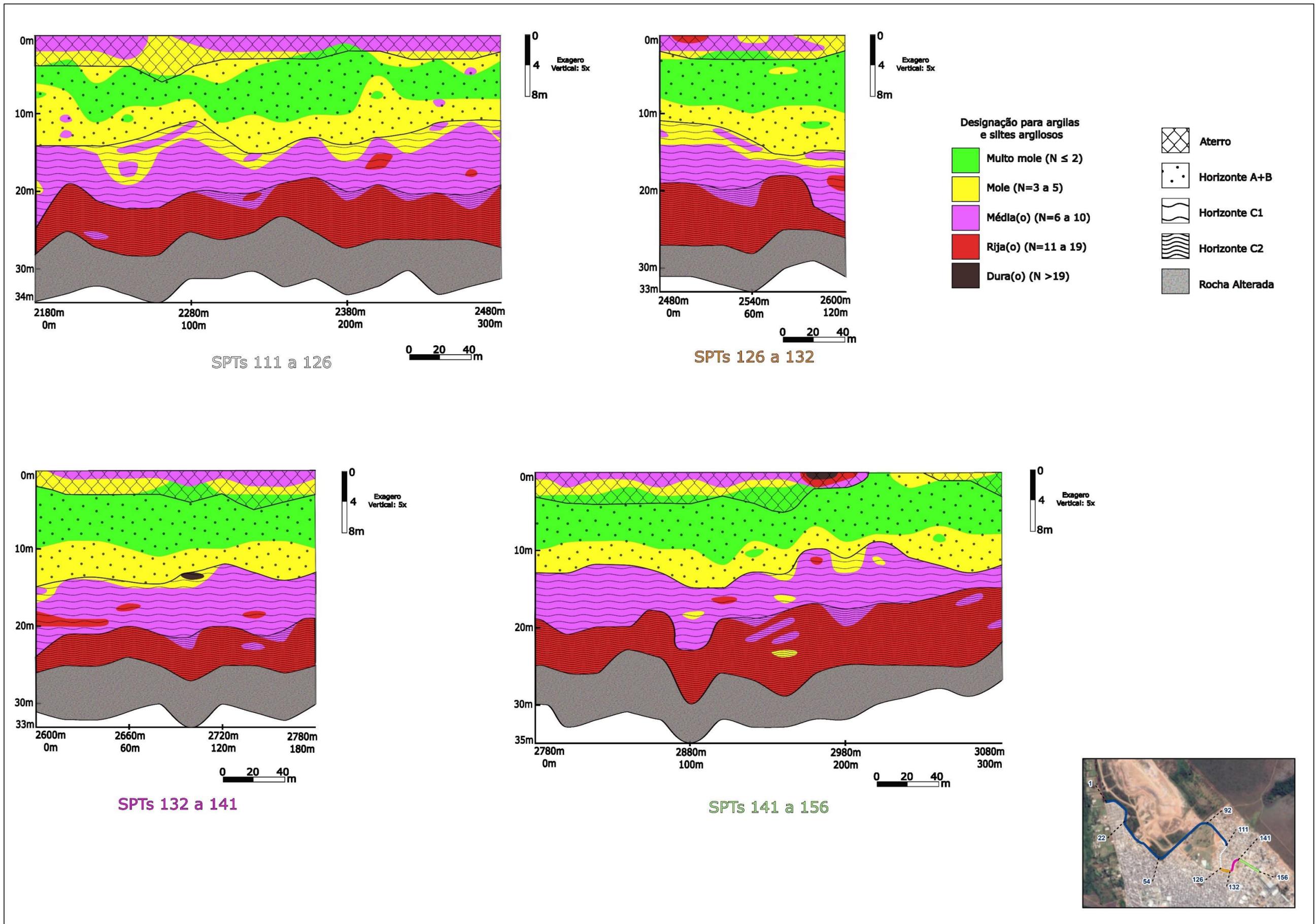


Figura 3.7 - Perfis de materiais geotécnicos para as quatro últimas seções, derivados do agrupamento dos índices de resistência a penetração (N_{SPT}) e as descrições físicas dos materiais.

O Apêndice 1 exibe múltiplas descrições para os locais interpretados como representantes dos horizontes A + Bws na seção 4 (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6): argila arenosa marrom avermelhada, *Muito Mole* a *Mole*; argila silto-pouco arenosa, pouco plástica, *Muito Mole* a *Mole*, cor vermelha; argila siltosa, *Mole* a *Média*, cor amarelo avermelhado; argila areno-siltosa, pouco plástica, *Muito Mole* a *Média*, cor vermelha; argila siltosa, pouco plástica, *Mole* a *Média*, cor rosa amarelada; areia argilosa, fofa a medianamente compacta, cor marrom avermelhado; areia argilosa com pedregulhos finos a médios, pouco compacta, cor vermelha; argila arenosa, pouco plástica, *Muito Mole* a *Mole*, cor marrom.

Em termos de classes de designação, há o predomínio da classe *Mole* e em menor proporção a *Muito Mole*, com alguns poucos locais de classe *Média*. Portanto, corroboram com a descrição táctil-visual moderadamente heterogênea. Quanto a espessura, ocorre variação de 1 metro até 14 metros, mas muito em função da presença do aterro. Vale o destaque para a variação abrupta de 10 metros de nível entre 1840 e 1860 metros do eixo horizontal (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6).

Representada pelo horizonte C1, o horizonte mais heterogêneo da quarta seção, apresenta grande variação de espessura (6 a 15 metros) e de classes, de *Muito Mole* até *Rija*. A região de espessura mais delgada é justamente na faixa entre 1840 e 1860 metros do eixo horizontal do perfil, onde a variação abrupta de nível se manifesta de maneira mais evidente (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6).

Na região entre 1960 e 2120 metros da extensão horizontal do perfil, e entre as profundidades de 10 e 22 metros, ocorre a zona mais heterogênea de classes, em que uma matriz de classe *Mole* apresenta grandes fragmentos de classe *Média* e uma grande parcela de designação *Muito Mole* (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6). Tal variação sustenta a interpretação em conformidade com as descrições para esses locais (Apêndice 1): argila arenosa, pouco plástica *Mole* a *Média*, cor marrom avermelhada; areia argilosa com pedregulhos finos a médios, pouco compacta, cor vermelha; argila com pedregulhos médios, *Média*, cor vermelho amarelado; areia argilosa, fofa a medianamente compacta, cor marrom avermelhado; argila silto-arenosa, *Mole* a *Rija*, cor rosa; silte argiloso rosa, *Duro*.

Homogêneo em termos de classes, o estrato interpretado como o horizonte C2 apresenta apenas a classe *Rija* com única faixa de classificação *Média*. Contudo, sua espessura e nível variam bastante. A espessura menor é de aproximadamente 3 metros, enquanto a espessura maior é por volta de 14 metros. A variação abrupta de nível na faixa entre 1840 e 1860 metros é associada a uma grande variação de espessura, de 13 metros para 3 metros (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6). As descrições encontradas nesses locais resumem-se em: areia argilosa com pedregulhos finos a médios, pouco compacta, cor vermelha; argila com pedregulhos médio, *Média*, cor vermelho amarelado; silte argiloso, *Rijo*, cor variegada; silte argiloso, *Rijo* a *Duro*, cor amarelo rosado; silte

argiloso rosa, *Médio a Duro*; argila siltosa, pouco plástica, *Mole a Média*, cor rosa amarelada; argila silto-arenosa, *Mole a Rija*, cor rosa; silte argiloso, *Mole a Rijo*, cor rosa; silte argilo-pouco arenoso, *Rijo a Duro*, cor rosa amarelada.

As similaridades entre as descrições do último estrato do regolito, de material residual, corroboram com a interpretação para esse horizonte homogêneo denominado rocha alterada. A seguir, se encontram as descrições para esse horizonte por meio da análise tátil-visual, segundo dados do Apêndice 1: silte argiloso, *Rijo* cor variegada; silte arenoso, compacto a muito compacto, cor amarelo avermelhado; silte argiloso amarelo rosado, *Rijo a Duro*; silte argilo-pouco arenoso, *Rijo a Duro*, cor rosa amarelada. As variações abruptas de nível marcam as faixas entre 1900 e 1920 metros, e entre 1940 e 1960 metros do eixo horizontal do perfil. Sua espessura média de 8 metros é mantida mesmo com as variações anteriormente reportadas (SPTs 92 a 111 - Figura 3.6).

Os quatros últimos perfis (Figura 3.7) apresentam padrões gerais bastante similares, de aterros mais delgados e espessuras, profundidades e designação de classes similares para cada um dos estratos. Tal circunstância é influenciada pelo fato desses perfis apresentarem as menores extensões horizontais, localizarem em sucessões e serem muito próximos entre si, e devido a sua orientação.

O estrato de aterro em cada um dos perfis apresenta espessura média de pouco mais de 4 metros e englobam pelo menos as classes de designação *Média*, *Mole* e um pouco da classe *Muito Mole*. No perfil 126 a 132, há uma ocorrência muito localizada da classe *Rija*. Já na seção 141 a 156 acontecem dois fatos específicos: uma associação da classe *Rija* com a *Dura* em uma área de aproximadamente 30 metros de extensão e 2 metros de profundidade, além da ausência de aterro entre 2990 e 3030 metros do eixo horizontal (Figura 3.7).

O material do aterro das seções 111 a 126 e 126 a 132 é descrito como “argiloso, fofo, cor marrom” ou “argiloso, pouco arenoso, fofo, cor variegada”. Enquanto o material do aterro dos perfis 132 a 141 e 141 a 156 é descrito como “silte argiloso, pouco compacto, cor variegado” ou “argiloso pouco arenoso, pouco compacto, cor variegada” ou até “argiloso, pouco compacto, cor marrom a marrom avermelhado” (Apêndice 1).

Os estratos interpretados como horizontes A + B mostram espessura média de aproximadamente 10 metros, uma zona contínua de designação *Muito Mole* logo abaixo do aterro e uma zona contínua de classe *Mole* sotoposta a essa. A faixa da classe *Muito Mole* do perfil 111 a 126 apresentam variação de espessura e na seção 141 a 156 ocorre na superfície, em uma área sem aterro (Figura 3.7).

No perfil 111 a 126 também ocorrem pequenas zonas de designação *Média*, corroborando as descrições para esse estrato nesse perfil (Apêndice 1): argila arenosa, *Muito Mole*, cor marrom; argila areno-siltosa, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor marrom avermelhado; argila arenosa,

Muito Mole a Mole, cor marrom avermelhado; argila silto-arenosa, pouco plástica, *Mole a Média*, cor vermelha; argila siltosa, *Mole a Média*, cor amarelo avermelhado.

As características dos materiais descritos para o Perfil SPTs 126 a 132 (argila arenosa, *Muito Mole*, cor marrom; argila areno-siltosa, *Muito Mole a Mole*, cor marrom avermelhado; argila arenosa, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor vermelha; areia silto-argilosa, fofa, cor marrom) estão em concordância com a interpretação do Horizonte A+B para esse perfil.

O Perfil SPTs 132 a 141 apresenta na descrição de seus materiais algumas características que sugerem aumento de resistência devido à proximidade com a interface do saprolito sotoposto. O Apêndice 1 traz quatro tipos de descrições similares: argila pouco plástica, *Muito Mole*, cor vermelha; argila arenosa, *Mole a Rija*, cor amarelo avermelhado; areia silto-argilosa, fofa, cor marrom; argila arenosa, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor vermelha.

Assim como o perfil adjacente, o Perfil SPTs 141 a 156 traz características de resistência um pouco superior em algumas regiões do Horizonte A + B: argila, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor vermelha; argila arenosa, pouco plástica, *Mole a Rija*, cor vermelho amarelado; argila arenosa, *Mole a Rija*, cor amarelo avermelhado.

O horizonte C1 do Perfil SPTs 111 a 126 abarca das classes *Mole a Rija* e mostra heterogeneidades em relação a geometria do horizonte mais contínuo, com variação de espessura e presença de vales e altos (Figura 3.7). Para esse horizonte, há três tipos de descrições bem similares, segundo os dados do Apêndice 1: argila siltosa, *Mole a Média*, cor amarelo avermelhado; argila silto-pouco arenosa, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor vermelha; silte argiloso, *Mole a Rijo*, cor rosa.

Levando em conta as quatro descrições para o horizonte proposto como o horizonte C1 do perfil SPTs 126 a 132 (argila siltosa, *Mole a Média*, cor marrom avermelhado; silte argilo-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo avermelhado; argila siltosa, pouco plástica, *Mole a Rija*, cor vermelha; argila areno-siltosa, *Muito Mole a Mole*, cor marrom avermelhado; argila arenosa, *Muito Mole*, cor marrom), a interpretação é ratificada considerando as duas características principais do horizonte: uma região superior heterogênea, com predominância da classe *Muito Mole* e fragmentos de classificação *Média*; Horizonte homogêneo de classe *Média* na parte inferior, com pequena variação de espessura e presença de local com designação *Rija*.

Para o horizonte C1 do Perfil SPTs 132 a 141, o Apêndice 1 traz as seguintes descrições: areia silto-argilosa, fofa, cor marrom; argila siltosa, *Mole a Média*, cor marrom avermelhado; argila arenosa, pouco plástica, *Muito Mole a Mole*, cor vermelha; argila arenosa, *Mole a Rija*, cor amarelo avermelhado. Portanto, a pequena faixa superior da classe *Mole*, com uma região isolada da classe *Dura* e horizonte homogêneo de designação *Média* com parcelas de *classificação Rija* (Figura 3.7), são coerentes dentro das áreas englobadas na interpretação.

O último perfil (SPTs 141 a 156) mostra horizonte C1 representado por um horizonte heterogênea de classificação *Média*, com variação de espessura e geometria, manifestando-se em vales e altos, na parte superior e inferior do estrato. Além disso, ocorrem regiões de designação *Mole* e *Rija* associadas as regiões de vales e elevados. A seguir, a descrição desse horizonte segundo a análise táctil-visual: argila arenosa, *Mole a Rija*, cor amarelo avermelhado; argila, pouco plástica, *Muito Mole*, cor vermelha; silte argiloso, *Rijo a Duro*, cor vermelho amarelado; argila siltosa, pouco plástica, *Mole a Média*, cor vermelho amarelado; silto argilo-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo rosado.

A região interpretada como horizonte C2 desses últimos quatro perfis mostra os mesmos padrões gerais: horizonte predominantemente designado como *Rija*, com vales e elevados associados a classificação *Média* e variações de espessura (Figura 3.7). Pela descrição (Apêndice 1) da região proposta como representante desse horizonte, valida-se a interpretação: SPTs 111 a 126 - silte argilo-arenoso, *Rijo a Duro*, cor amarelo avermelhado; argila siltosa, pouco plástica, *Mole a Rija*, cor vermelha; silte argiloso, *Mole a Rijo*, cor rosa; silte argilo-pouco arenoso, *Rijo a Duro*, cor rosa amarelada. SPTs 126 a 132 - argila areno-siltosa, *Muito Mole a Mole*, cor marrom avermelhado; argila siltosa, pouco plástica, *Mole a Rija*, cor vermelha; silte argilo-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo avermelhado; argila siltosa, *Mole a Média*, cor marrom avermelhado. SPTs 132 a 141 - silte argiloso, *Rijo a Duro*, cor vermelho amarelado; argila siltosa, *Mole a Média*, cor marrom avermelhado; silte argiloso-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo avermelhado. SPTs 132 a 141 a 156 - argila arenosa, pouco plástica, *Mole a Rija*, cor vermelho amarelado; silte argilo-arenoso, duro, cor amarelo avermelhado; silte argilo-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo rosado; silte argiloso, *Rijo a Duro*, cor vermelho amarelado; argila arenosa *Mole a Rija*, cor amarelo avermelhado.

Em última análise, o estrato de rocha alterada proposto, também apresenta o mesmo padrão para os quatro perfis (Figura 3.7) e pequenas diferenças descritivas (Apêndice 1): SPTs 111 a 126 - silte argilo-pouco arenoso, *Rijo a Duro*, cor rosa amarelada; silte argiloso, *Mole a Rijo*, cor rosa; silte argiloso, *Mole a Rijo*, cor amarelo avermelhado; silte argilo-arenoso, *Rijo a Duro*, cor amarelo avermelhado. SPTs 126 a 132 - silte argilo-arenoso, *Rijo a Duro*, cor amarelo avermelhado. SPTs 132 a 141 - silte argilo-arenoso, *Médio a Duro*, cor amarelo avermelhado. SPTs 141 a 156 - Silte argilo-arenoso, *Duro*, cor amarelo avermelhado.

As descrições e a compartimentação dos horizontes corroboram com os horizontes previstos nesses perfis de materiais geotécnicos, contudo evidenciaram padrões (principalmente nos horizontes basais) que seriam mais bem compreendidos por meio da integração com informações geológicas.

As informações geológicas que melhor representariam os padrões únicos dos horizontes inferiores, seriam os elementos estruturais. Desse modo, os perfis de materiais geotécnicos foram reinterpretados com a adição de anisotropias ou descontinuidades nos horizontes com variação abrupta de nível e/ou espessura em alguns locais, reconfigurando esse conjunto para perfis pedo-geológicos. Essas rupturas ou descontinuidades representadas são interpretadas como falhas normais, que assumiram diversas configurações quando plotadas.

Uma geometria de calhas ou vales preenchidos (presentes em afloramentos da obra do metrô) apontadas por alguns autores, com causas são atribuídas à reativação tectônica (MARTINS, 2000; MARTINS *et al.*, 2004; XAVIER, 2010; CAMPOS *et al.*, 2016), são exposições de mesmo contexto de meio físico da área de estudo, justificando a associação lógica e interpretação similar.

Segundo Fossen (2012), falhas normais separadas que mergulham uma em direção à outra criando um bloco rebaixado, são denominados de graben e as falhas normais com mergulhos em direções opostas criando blocos soerguido denominados de horst. Portanto, nesses perfis as regiões de ruptura abruptas que formaram vales, assumirão a configuração de grabens, enquanto os blocos elevados serão chamados de horsts.

Essas falhas normais interpretadas para os perfis ocorrem com tamanhos diferentes e por vezes associadas diretamente a outras. De acordo com Fossen (2012), as falhas maiores presentes em áreas com falhamento são chamadas de falhas mestras e podem estar relacionadas a falhas secundárias, as quais são classificadas como sintéticas ou antitéticas. Enquanto uma falha sintética mergulha na mesma direção da falha mestra, uma falha antitética mergulha em direção oposta à esta estrutura.

No perfil SPTs 1 a 22 (Figura 3.8) é possível se observar a ocorrência de dois horsts e dois grabens, evidenciados pelos dois últimos horizontes, horizonte C2 e rocha alterada. O primeiro bloco que está elevado, com 110 metros de largura aparente, ocorre entre 50 e 160 metros do eixo horizontal do perfil. Sua espessura e altura variam devido a um rebaixamento relacionado a uma falha antitética associada a uma falha principal. Portanto, apesar de estar elevado e poder ser chamado de horst, tecnicamente esse bloco também seria um hemigraben, ou um graben assimétrico em conformidade com a definição de Fossen (2012). O graben acontece entre 160 e 210 metros, adjacente ao bloco horst/hemigraben anteriormente citado, já o outro horst manifesta-se entre 310 e 390 metros da extensão horizontal do perfil. Por fim, um último graben a partir dos 390 metros, que marca o afundamento do horizonte C1 e se estende para a próxima seção até os 440 metros.

Na segunda seção (SPTs 22 a 54 - Figura 3.8) são apresentadas diversas associações de falhas principais com falhas secundárias, configurando um arranjo complexo de grabens, horsts e hemigrabens. Entre 440 e 540 metros um horst mais expressivo se manifesta marcado por meio do

horizonte C2 e pelo estrato de rocha alterada. Adjacente ao horst, há um grande hemigraben manifesto mediante um rolamento, arrasto reverso, proporcionado por profundas falhas secundárias, tanto antitéticas como sintéticas, até por volta dos 885 metros do eixo horizontal do perfil. No terço final do perfil, entre 900 e 940 metros, há um pequeno graben muito bem evidenciado pelo horizonte C2 e adjacente a ele um horst até 980 metros. Por fim, dois grabens associados a dois horsts ocasionados por pequenas falhas secundárias.

Um hemigraben, dois grandes grabens e dois horsts são exibidos na seção SPTs 54 a 92 (Figura 3.9), marcados por falhas mestras, mas com diversas falhas secundárias associadas. O hemigraben ocorre a partir de 1050 metros, marcado pelo abatimento abrupto do horizonte C2 e é limitado até uma grande falha adjacente ao primeiro bloco de graben, que apresenta 240 metros de espessura aparente, entre 1120 e 1360 metros e contém quatro falhas secundárias internas que marcam o afundamento dos horizontes C1 e C2. Entre 1360 e 1520 metros um horst com duas falhas sintéticas e uma antética marca a separação do primeiro graben com o segundo graben, que por sua vez, apresenta duas falhas antitéticas e se estende até os 1670 metros do perfil. Um último horst, marcado pelo soerguimento do horizonte C2, é limitado até os 1720 metros do eixo horizontal.

Associados a um hemigraben, ocorrem dois grabens e um horst no perfil SPTs 92 a 111 (Figura 3.9). A partir de 1840 metros, por meio de uma grande falha que ocasiona o rebaixamento abrupto no horizonte C1, um graben assimétrico representa o principal bloco do perfil. Interno a esse bloco, um graben entre 1900 e 1980 metros define um abatimento de aproximadamente 10 metros de profundidade do horizonte de rocha alterada. Adjacente a ele, um horst até 2040 metros, e unido a ele um outro graben se estende até 2140 metros, cada um com uma falha secundária interna.

Centralizado na seção SPTs 111 a 126 (Figura 3.10), um horst separa o perfil entre 2280 e 2380 metros, com blocos adjacentes repletos de falhas secundárias que mergulham em diferentes direções e configurando blocos assimétricos sem muito deslocamento relativo. Um pequeno horst de 60 metros de largura aparente marca o perfil SPTs 126 a 132 (Figura 3.10) e adjacente a ele ocorre uma falha antitética que contribui em um leve abatimento no horizonte C1 entre 2510 e 2540 metros do eixo horizontal.

Dividindo a seção SPTs 132 a 141 (Figura 3.10) estão um horst e um graben. O horst ocorre entre 2600 e 2680 metros, sem deslocamento significativo, e o graben a partir de 2680 metros até 2720 metros, com uma falha interna secundária e leve assimetria. Um falhamento por volta dos 2760 metros ocasiona um abatimento pequeno, de 3 metros, que pode ser considerado um hemigraben.

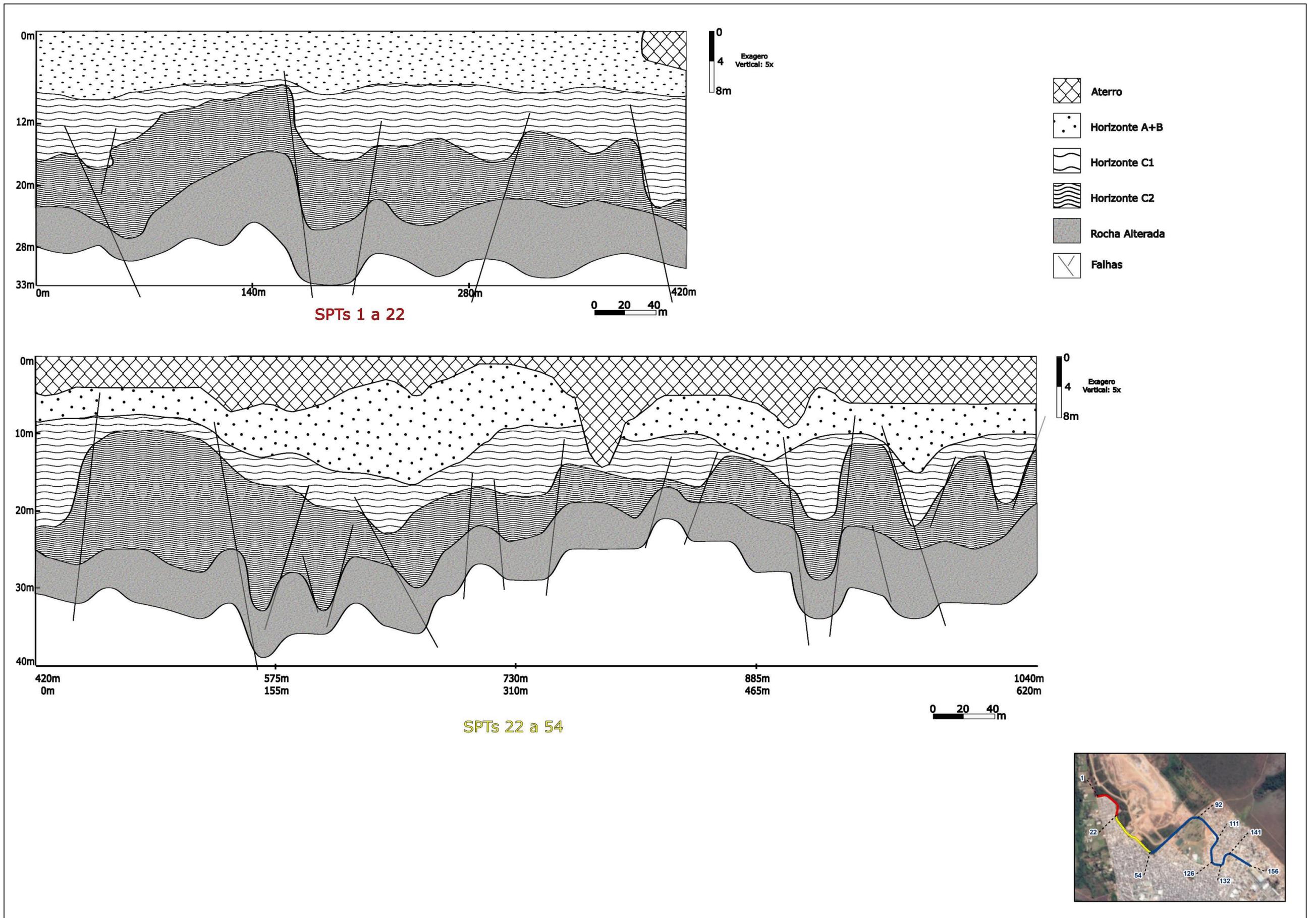


Figura 3.8 - Interpretação pedo-geológica para as duas primeiras seções.

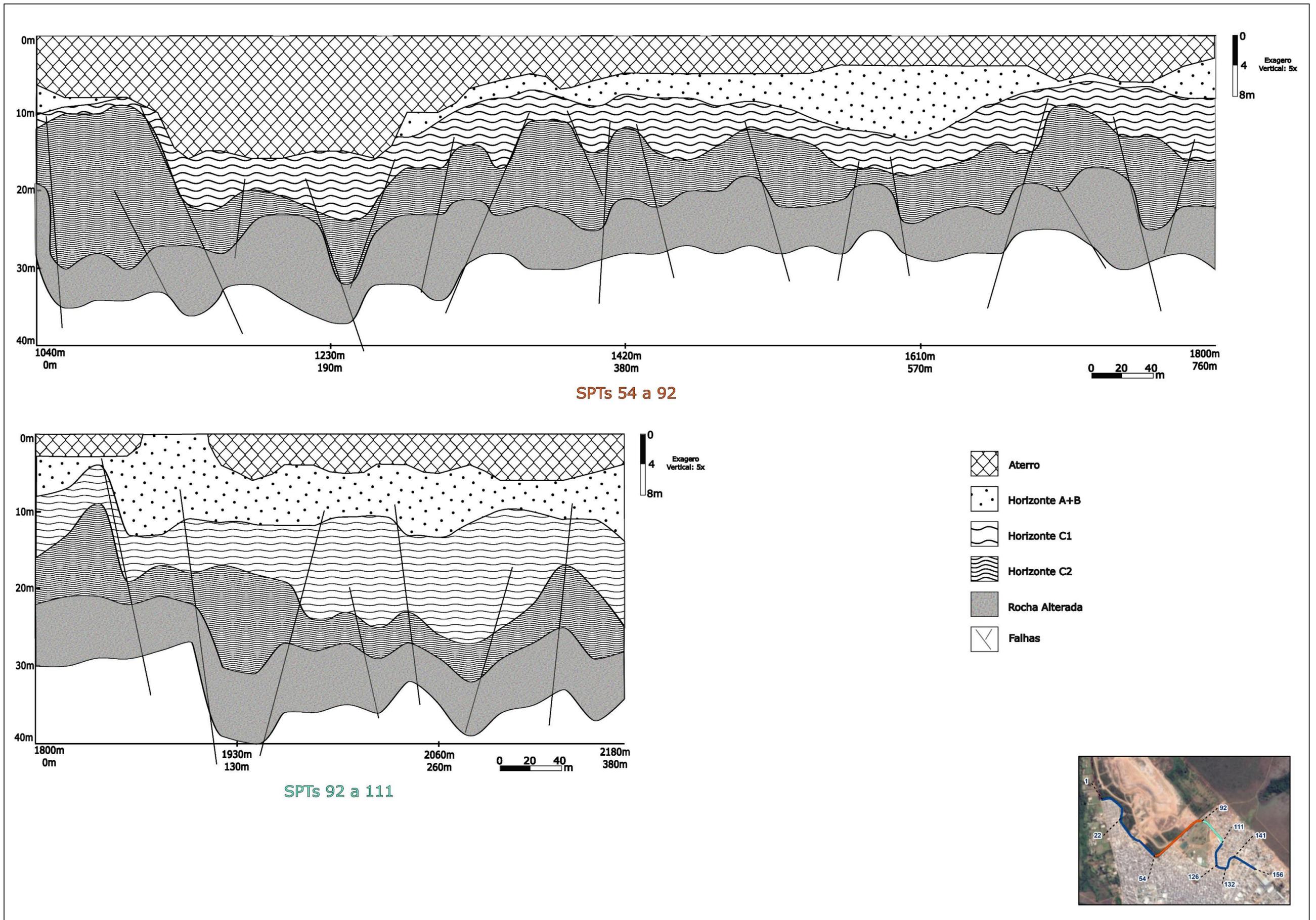


Figura 3.9 - Seções com informações geológicas (litologia e falhas normais) e pedológicas dos trechos de SPTs 54 a 92 e SPTs 92 a 111.

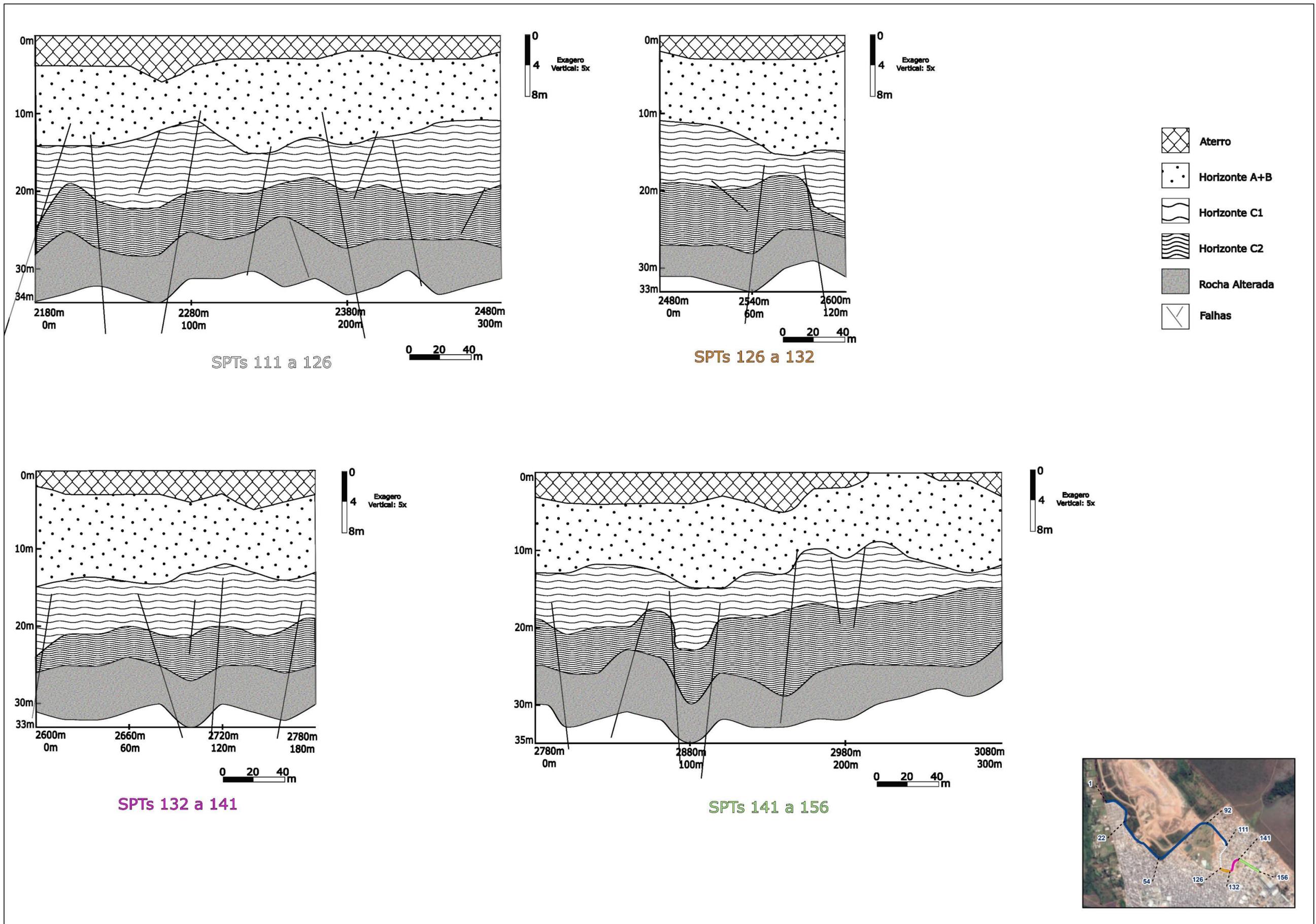


Figura 3.10 - Quatro últimos trechos apresentados segundo interpretação pedo-geológicas.

Por fim, a oitava e última seção (SPTs 141 a 156 - Figura 3.10), apresenta um arranjo complexo, com blocos internos pequenos deslocados dentro de blocos maiores e em níveis diferentes. Um graben presente entre 2790 e 2900 metros, marcado por falhas mestras, mostra deslocamento pequeno de 3 a 5 metros de profundidade. No interior desse graben, ocorrem duas falhas secundárias de tamanho significativo, que configuram um soerguimento do horizonte C1 de aproximadamente 4 metros na zona entre 2850 e 2865 metros. Adjacente a esse soerguimento, um abatimento na área entre 2865 e 2900 metros ocasiona um deslocamento nos horizontes C1 e C2 e início do topo de rocha alterada por estar associado a falha mestra do bloco principal.

Ainda no perfil SPTs 141 a 156, uma falha mestra na área dos 2940 metros do eixo horizontal causou um pequeno afundamento de todo o bloco a oeste dela, enquanto o bloco a leste apresenta pequeno graben marcado nos horizontes C1 e C2 na região dos 2980 metros.

Em última análise, para facilitar a avaliação geral e reunir de maneira sinóptica todos os dados e interpretações possíveis a partir dos perfis originais e os derivados destes, por meio de perfis integrados são sobrepostas todas as informações simultaneamente (Figura 3.11 e Figura 3.12 e Figura 3.13).

Esses perfis combinam:

- Modelagens conceituais da disposição das classes de estados de compacidade e de consistência para os índices de N_{SPT} ;
- Compartimentação dos materiais geotécnicos, representados por aterros, horizontes do solo e de rocha alterada;
- Informações pedológicas e geológicas, mediante estratos regolíticos e líticos, além das estruturas associadas.

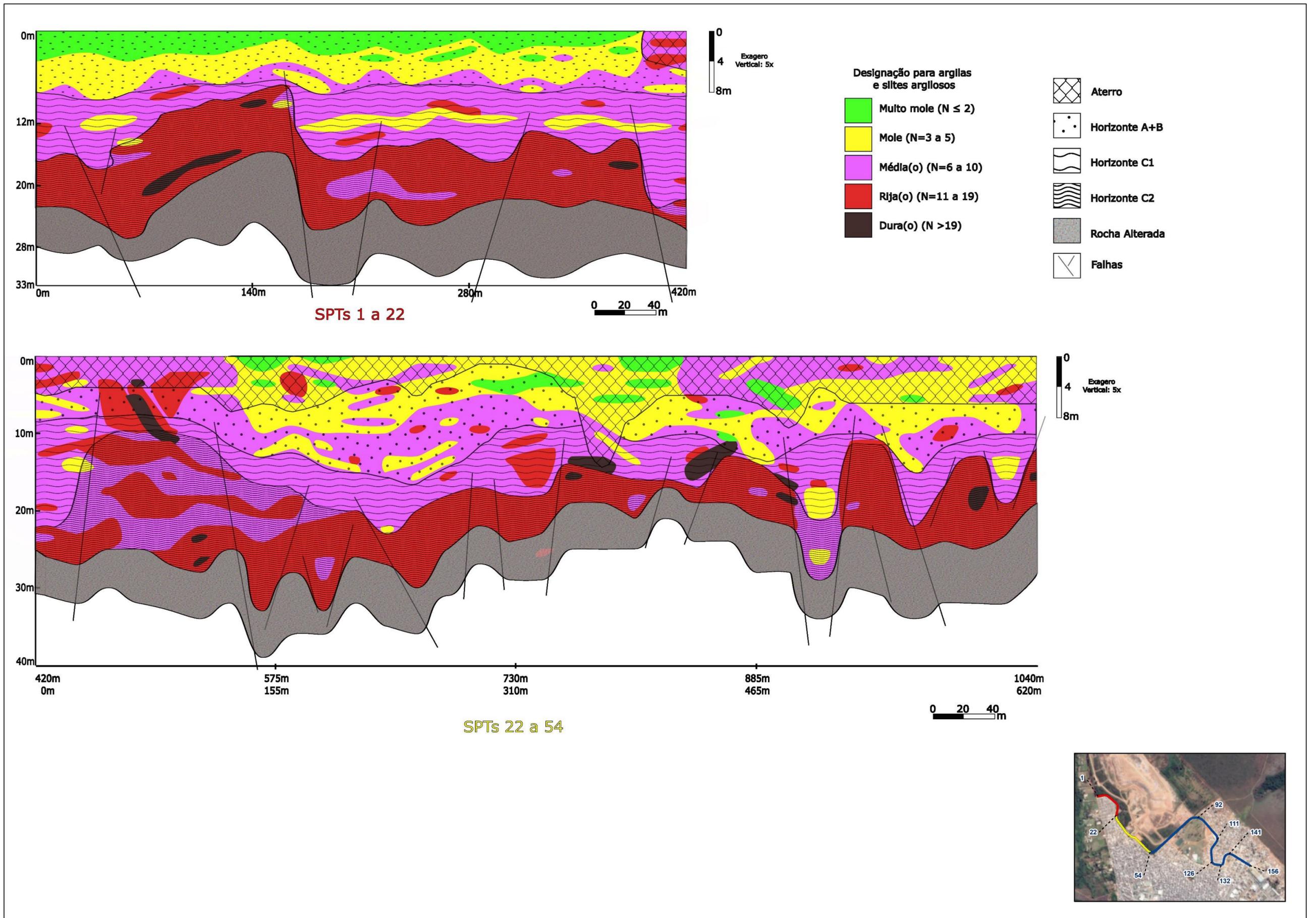


Figura 3.11 - Perfis integrados para os dois primeiros trechos.

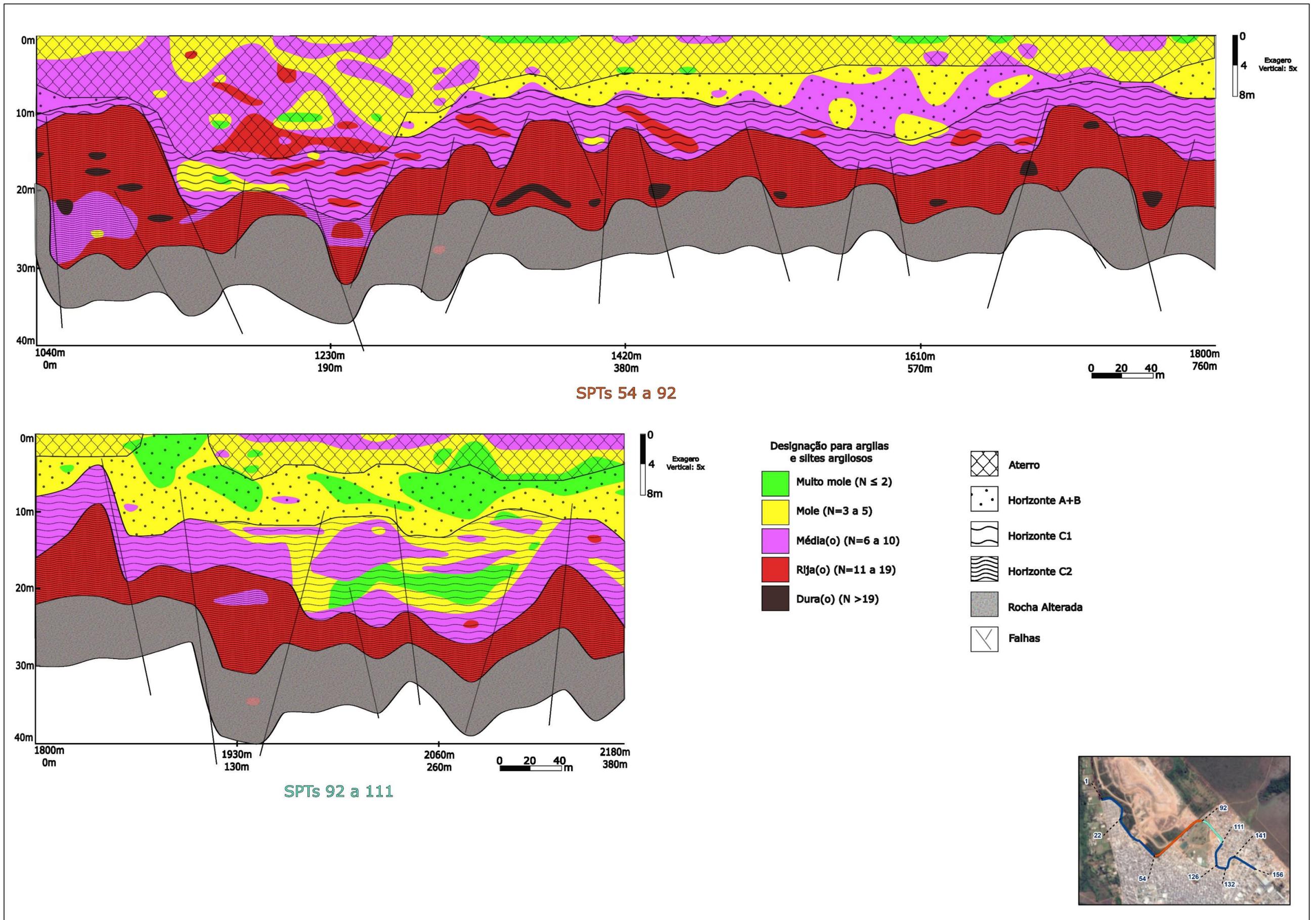


Figura 3.12 - Seções SPTs 54 a 92 e 92 a 111 reunindo todas as informações integradas e interpretadas: N_{SPT} , materiais geotécnicos e informações pedo-geológicas.

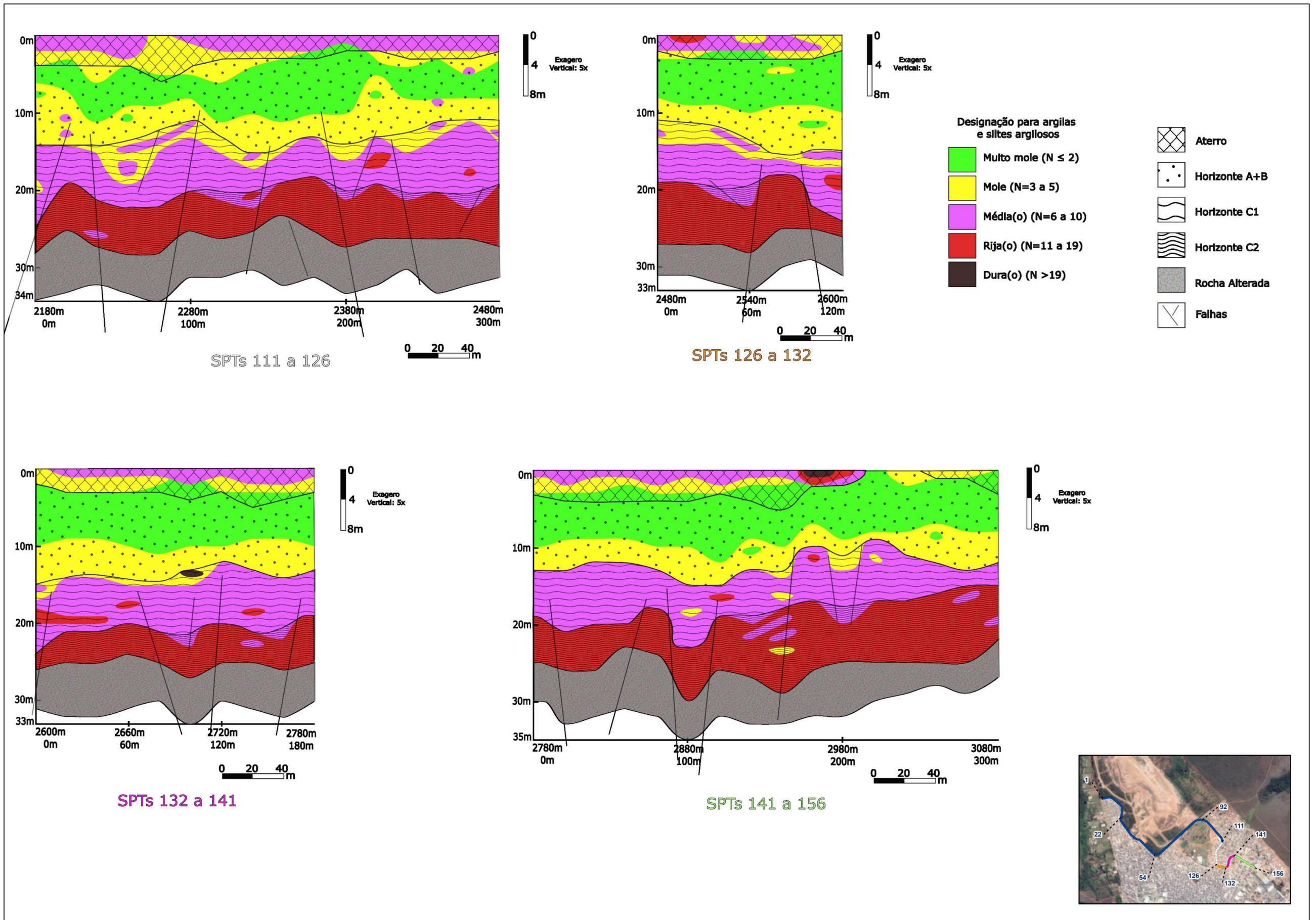


Figura 3. 13 - Quatro últimas seções completas, exibindo as informações pedológicas, geológicas e geotécnicas.

3.3 Comparações com Eletroresistividade

Cavalcanti (2013) adquiriu dados geofísicos, de eletroresistividade, na mesma área de algumas das SPTs realizadas pela CODHAB. O arranjo de eletrodos do seu levantamento foi o dipolo-dipolo. Portanto, os perfis das sondagens 22 a 54 podem ser comparados aos perfis de eletroresistividade EL10 e EL10a de Cavalcanti (2013), enquanto os perfis das sondagens 54 a 92 podem ser comparados aos perfis EL11 e EL12 do mesmo autor.

Na Figura 3.14 observa-se pouca ou nenhuma relação visual/gráfica entre as classes de designação de N_{SPT} com os valores de resistividade. Ainda em uma perspectiva geral, nenhum padrão de interdependência é observável devido aos próprios perfis de classes N_{SPT} serem bastante heterogêneos.

Na Figura 3.15, o vínculo entre a interpretação geológica e o dado de eletroresistividade é mais tangível. Em geral, os locais de grabens estão relacionados a valores de baixa resistividade (com maior concentração de chorume), enquanto os horsts atuam na contenção da pluma de contaminação nas regiões mais superficiais.

Na segunda seção SPTs 22 a 54 (Figura 3.15), o horst mais expressivo (entre 440 e 540 metros) que se manifesta marcado por meio do horizonte C2 e pelo estrato de rocha alterada, sendo associado a uma região de alta resistividade. Em uma área mais alta do hemigraben, por volta dos 690 metros, nota-se resistividade intermediária a alta. Entre 1000 e 1020 metros, um pequeno horst associado a falhas secundárias, marca o topo de uma zona de alta resistividade.

Na terceira seção SPTs 54 a 92 (Figura 3.15), o padrão de grabens relacionados a baixa resistividade e horsts a contenção do chorume é observada muito em função da geometria dos horizontes mais inferiores, rocha alterada e rocha não alterada (abaixo do nível do impenetrável). Entre 1060 e 1210 metros e entre 1270 e 1460 metros ocorrem blocos mais altos de rocha não alterada que estão associados a valores intermediários a altos de resistividade, com uma região de baixa resistividade entre esses blocos, entre 1210 e 1270 metros. A partir de 1460 metros, um alto marcado pelos horizontes C2 e de rocha alterada, está associado a valores intermediários de resistividade.

Em alguns locais são encontradas relações totalmente opostas às citadas anteriormente (Figura 3.15):

- Perfil 22 a 54: entre 845 e 905 metros, nos horizontes basais;
- Perfil 54 a 92: entre 1040 e 1150 metros, horizonte C2; entre 1230 e 1270 metros, horizonte C1, C2 e de rocha alterada; entre 1610 e 1810 metros, de maneira geral; entre 1750 e 1780 metros, horizonte C2 e de rocha alterada.

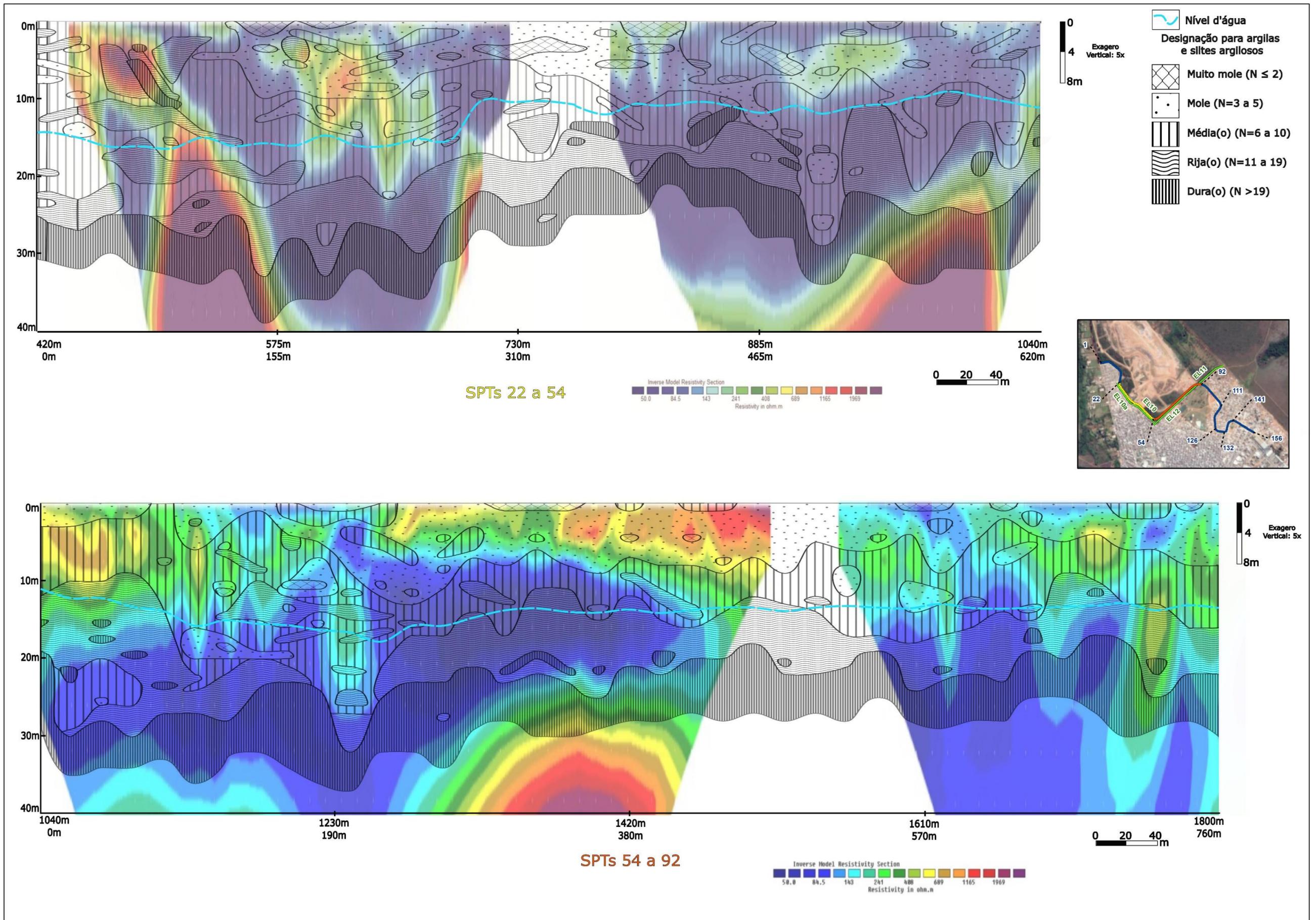


Figura 3.14 - Comparação de dois perfis N_{SPT} com os perfis de eletrorresistividade obtidos na mesma área.

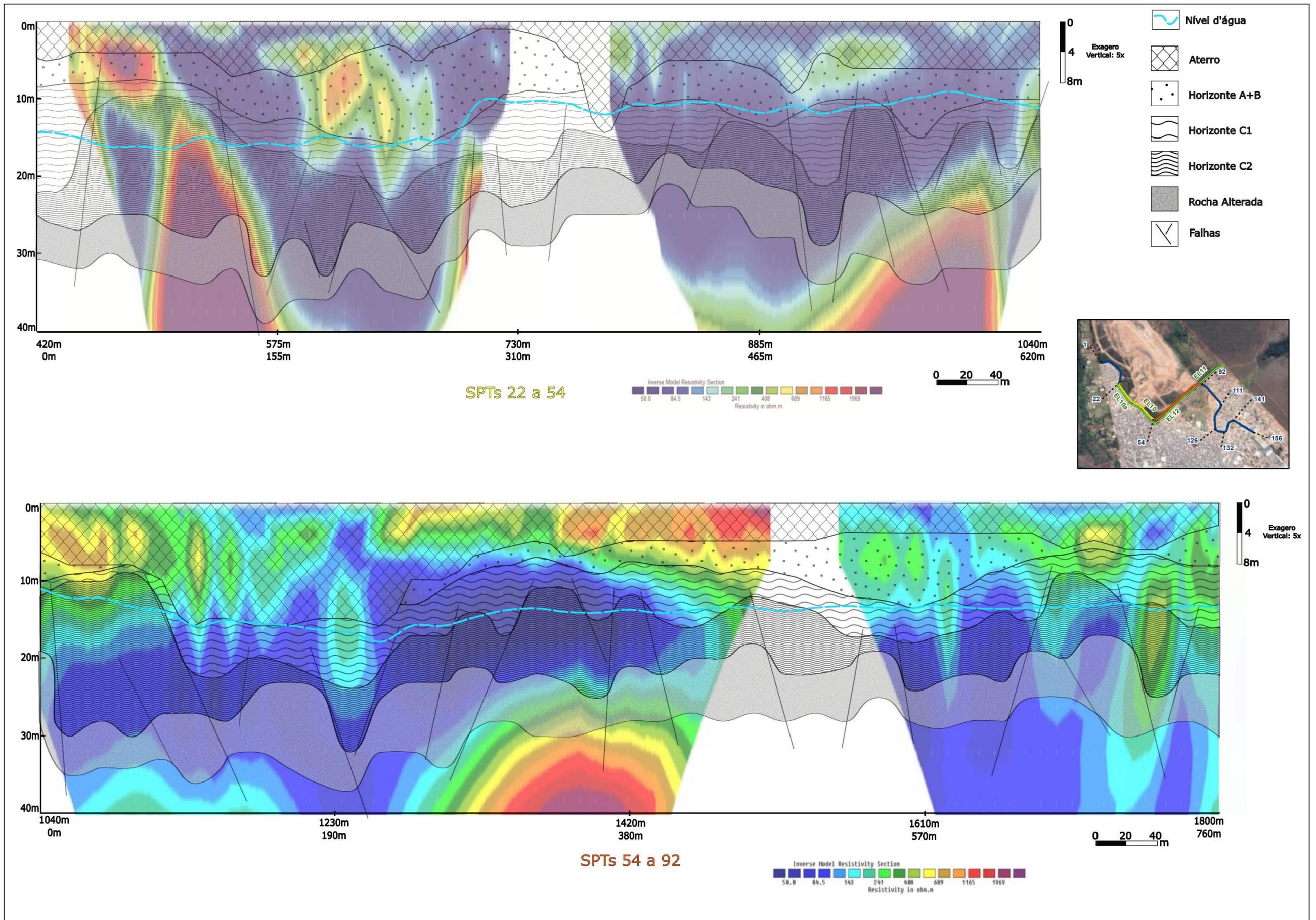


Figura 3.15 - Comparação da informação geofísica com a interpretação geológica.

CAPÍTULO 4

ZONEAMENTO DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES DE OBRAS CIVIS NAS ADJACÊNCIAS DO LIXÃO DA ESTRUTURAL, DISTRITO FEDERAL, BRASIL

Suitability zoning for civil engineering foundations near the Estrutural Landfill, Federal District, Brazil

Ricardo Avelino Costa^{a*}, José Eloi Guimarães Campos^a

^a Instituto de Geociências, Universidade de Brasília - UnB, Brasil.

* Autor correspondente

RESUMO - A região do Aterro Estrutural constitui uma área de deposição de resíduos sólidos desde a década de 1960, sem impermeabilização ou qualquer sistema de coleta de efluentes, possibilitando a geração contínua e a livre circulação de chorume, contaminando principalmente solos e lençóis freáticos. Este trabalho tem como objetivo apresentar um zoneamento da condição geotécnica das áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural, baseado na profundidade do impenetrável à percussão, nível de água e índices SPT em diferentes profundidades. O principal resultado foi o zoneamento para a determinação do tipo de fundação (rasa ou profunda) mais adequada para a região tendo em consideração a presença de aterros heterogêneos e as mudanças dos materiais naturais em profundidade. Tal zoneamento constitui uma orientação de acordo com os dados das sondagens em diferentes profundidades. Essas informações foram obtidas a partir de interpolação em *software* SIG (com aplicação do modelo de krigagem exponencial), amplamente utilizado para estudos pedológicos. As representações alcançadas segundo os critérios adotados indicam que a maior parte das fundações a serem instaladas na região devem ser profundas, corroborando a premissa de que os materiais de aterro com resíduos domésticos, restos de obras, restos de poda de árvores e varrição de ruas resultam em condição geotécnica adversa para a instalação de obras ou outras infraestruturas de grande porte na região. Os resultados ainda chamam atenção para o risco de ataque do chorume às fundações profundas eventualmente instaladas na região.

Palavras-chave - Ensaio de penetração padrão, aspectos geotécnicos, chorume, impenetrável.

ABSTRACT - The Estrutural landfill region constitutes an area of solid waste deposition since the 1960s, without waterproofing or any effluent collection system, enabling the continuous generation and free circulation of leachate, contaminating mainly soils and groundwater. This work aims to present a zoning of the geotechnical condition of the areas adjacent to the Structural Dump, based on the depth of the impenetrable to percussion, water level and SPT indices at different depths. The main result was the zoning to determine the type of foundation (shallow or deep) most suitable for the region, taking into account the presence of heterogeneous landfills and the changes in natural materials in depth. Such zoning constitutes a guideline according to the data from the SPT logging at different depths. This information was obtained from interpolation in GIS software (with application of the exponential kriging model), widely used for pedological studies. The representations reached according to the adopted criteria indicate that most of the foundations to be installed in the region must be deep, corroborating the premise that landfill materials with domestic waste, construction residues, tree pruning and street sweeping result in adverse geotechnical conditions for edification or installation of other large infrastructures in the region. The results also draw attention to the risk of leachate attack on the deep foundations eventually installed in the region.

Keywords - Standard penetration test, geotechnical aspects, leachate, impenetrable.

4.1 Introdução

A região do Lixão da Estrutural constitui uma área de deposição de resíduos sólidos desde os anos 1960, após a transferência da capital para o Distrito Federal. Com o passar dos anos e grande crescimento populacional da região, esta área foi consolidada como o principal destino dos resíduos sólidos domésticos de Brasília e das cidades satélites (MARQUES, 2018a; CIDADES INTELIGENTES, 2018). Este processo iniciou de forma não planejada, sendo que o único critério utilizado para a escolha do local foi sua proximidade com os principais centros produtores de lixo na época.

Localizado no centro-oeste do Distrito Federal, entre a rodovia Estrada Parque Ceilândia (DF-095) e o limite sul do Parque Nacional de Brasília, o antigo lixão estende-se por uma área de 215 hectares, sendo fortemente vinculado à área urbana da cidade Estrutural (Figura 4.1). Atualmente a área funciona como uma Unidade de Recebimento de Entulhos (URE) e recebe restos de obras civis, podas de árvores de áreas urbanas e menor parcela de resíduos inertes (MACHADO e EUFRÁSIO, 2019).

No início do ano de 2018, com a intenção de interromper o descarte não controlado de lixo, o Governo do Distrito Federal transferiu o destino dos resíduos para o Aterro Sanitário Oeste em Samambaia (MARQUES, 2018b). Contudo, mesmo após a mudança do local e das condições de deposição dos resíduos, permanecem os passivos ambientais provenientes de décadas de acumulação de resíduos na região.

Os resíduos depositados diretamente sobre o solo, sem impermeabilização da base e qualquer sistema de coleta de efluentes possibilitam a contínua geração e livre circulação de efluentes, contaminando os solos e as águas subterrâneas. Portanto, na segunda metade da década de 1990 a área passou a ser objeto de atenção e estudo, em que o objetivo geral foi entender a dinâmica e caracterizar a pluma de contaminação de chorume, e propor modelos previsionais de migração.

Dessa maneira, a caracterização da pluma de contaminação de chorume atualmente está consolidada, principalmente depois do projeto de estudo contratado pela Secretaria do Meio Ambiente do Distrito Federal (SEMA DF, 2021). Contudo, o impacto direto do chorume na qualidade do solo, que é, em parte, a zona não saturada do aquífero, é menos estudado. Em termos de qualidade de solo em regiões de descarte de resíduos, o aspecto químico é mais levado em consideração do que o aspecto físico ou mecânico, que carece de maior investigação.

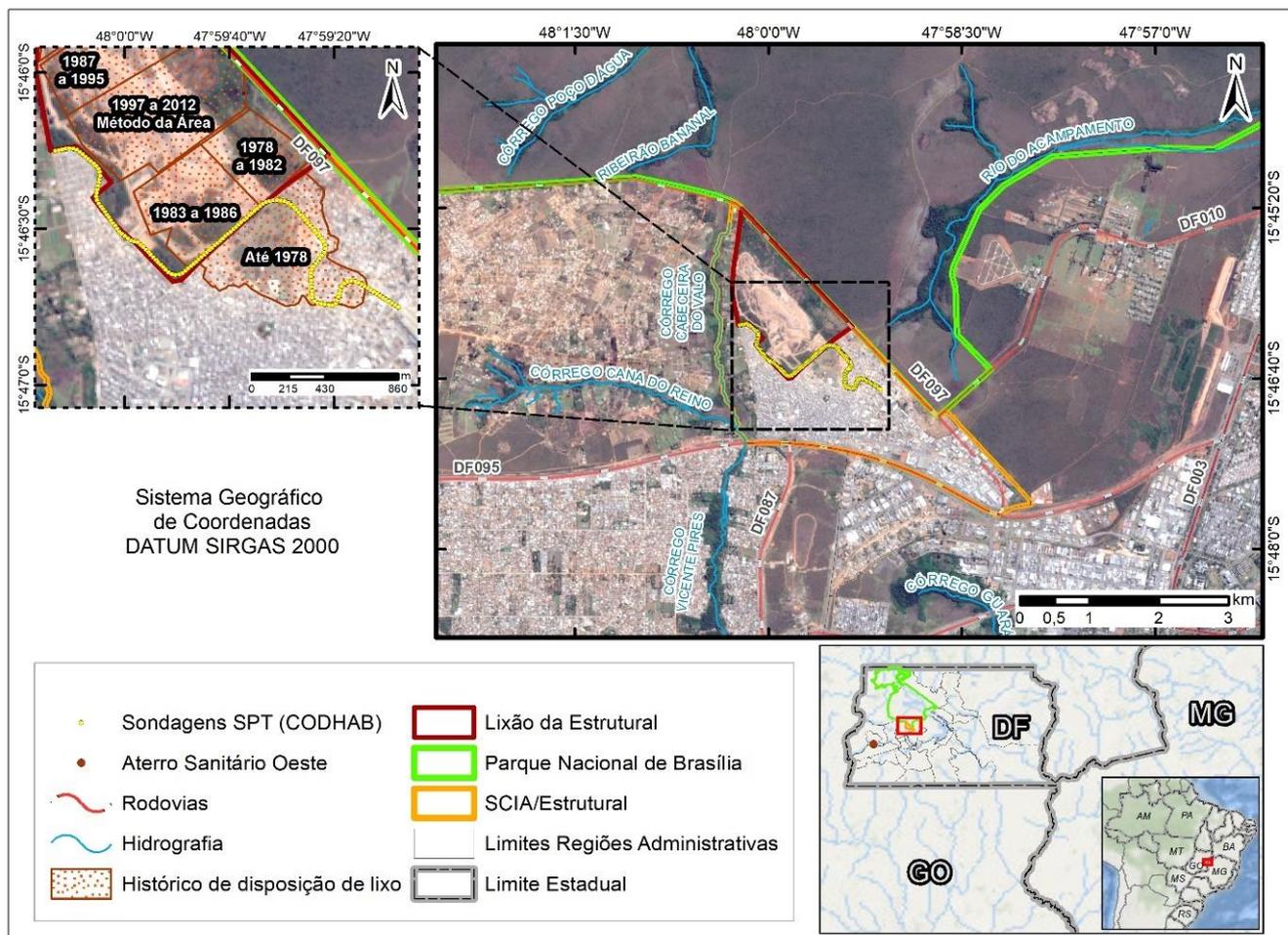


Figura 4.1 - Localização do Lixão da Estrutural no Distrito Federal, com foco para a área adjacente a sul do lixão e a série histórica da disposição de resíduos sólidos (Franco, 1996).

Nesse sentido, o estudo de caso se desenvolverá sobre o projeto da Companhia de Desenvolvimento Habitacional de Brasília (CODHAB) para a construção predial nas adjacências do Lixão da Estrutural, que deverá ser reavaliado por possuir viabilidades técnica e econômica comprometidas. Tal projeto consiste em executar a construção de uma edificação de 4 a 5 pavimentos com 3,23 quilômetros de extensão horizontal contornando o aterro na porção sudoeste e sudeste, passando sobre a parte do aterro antigo, e destiná-la para a moradia das famílias que estão na ocupação irregular da comunidade de Santa Luzia, situada na periferia da cidade Estrutural.

De acordo com as informações dos dados das sondagens SPT realizadas nessa área (Figura 4.1), as fundações das edificações deveriam ser profundas, por apresentarem índices SPTs com baixos valores a profundidades maiores e o nível do impenetrável profundo (a maioria por volta de 30 metros). Além disso, ainda há possibilidade de haver ataque químico do chorume às estruturas das fundações, e ressaltando a hipótese de que os menores índices SPT estariam associados influência do contato com a pluma de contaminação. Portanto, executar um projeto dessa magnitude, nesse contexto de atendimento a demanda social e localização (adjacente a um aterro e com baixo valor agregado), inviabiliza a sua execução nessa região.

Assim, o presente estudo busca por meio de um zoneamento dessa área de acordo com os índices SPT, classificar a aptidão para os tipos fundações (superficiais ou profundas) a diferentes profundidades. A realização desse tipo de avaliação é justificada pela necessidade de aquisição de informações para a comprovação de que áreas contaminadas podem apresentar problemas geotécnicos causados devido ao ataque químico do chorume à rocha/saprolito, ou à própria influência dos resíduos na caracterização geotécnica, demandando estudo e planejamento específicos para eventuais ocupações.

4.2 Metodologia

A Figura 4.2 resume por meio de um fluxograma simplificado a metodologia e as etapas que ocorreram para o zoneamento de aptidão.

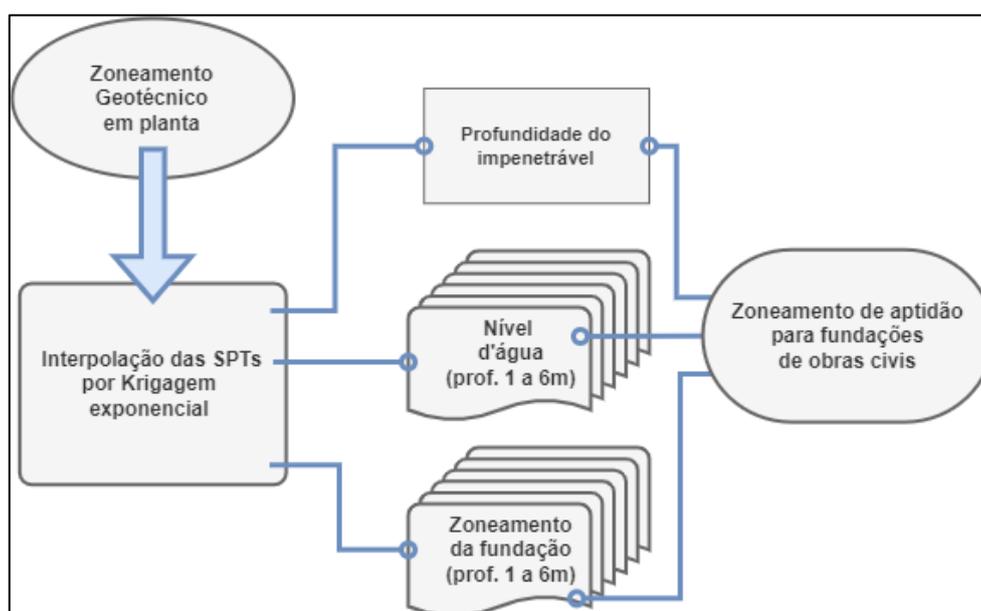


Figura 4.2 - Fluxograma síntese das etapas da demarcação de aptidão para fundações, zoneamento em planta.

Esses ensaios SPT realizados seguiram as normas da ABNT - NBR 6484:2001 e 2020, portanto ocorreram envolvendo a perfuração e cravação dinâmica de um amostrador padrão no solo usando um martelo padronizado (com 65 kg de massa) e uma altura de queda livre definida (de 75 cm). A cravação é feita metro a metro, manual ou mecanicamente, para determinar o tipo de material, a profundidade do nível do lençol freático e o índice de resistência N_{SPT} para as diferentes profundidades investigadas. Os resultados são apresentados pelo número de golpes necessários para cravar segmentos de 15 cm nos primeiros 45 cm de cada metro analisado, além do índice de resistência N_{SPT} , obtido pela soma dos golpes nos últimos 30 cm de cada metro.

Segundo a NBR 6484:2001, a cravação é encerrada e considerada impenetrável se: um dos segmentos de 15 cm requer mais de 30 golpes, se um total de 50 golpes é atingido, ou se não há avanço após 5 golpes consecutivos.

De acordo com a mesma norma, as sondagens SPT são de dois tipos: convencional (a seco) e com lavagem (com circulação de água). O procedimento segue etapas definidas, começando com a perfuração usando trado-concha ou cavadeira manual até 1 metro de profundidade. Depois, um tubo de revestimento é instalado equipado com sapata cortante. Se o avanço da perfuração for inadequado, ou se o solo não aderir ao trado, adota-se a perfuração por circulação de água.

Nesse método, um trépano de lavagem é usado, removendo material através da circulação de água. A composição de perfuração é elevada e depois é solta, com movimentos de rotação. A altura da elevação é reduzida à medida que a profundidade aumenta. No final, a composição de perfuração é suspensa a 0,20 m do fundo do furo para limpar os detritos. Sondagens SPT com lavagem são preferidas em solos desfavoráveis ao trado helicoidal, especialmente para profundidades significativas e onde a limpeza do furo é essencial. As 156 sondagens SPT deste estudo foram feitas com lavagem, devido ao contexto de contaminação e maciço afetado pelo chorume.

Mediante a interpolação de algumas informações (profundidade do impenetrável, nível d'água e índices SPT de 1 a 6 metros) dos 156 pontos de sondagens tipo SPT do projeto da CODHAB, foi realizada a caracterização e os zoneamentos para aptidão de fundação na área adjacente ao Lixão da Estrutural.

A análise espacial estuda como os dados estão distribuídos no espaço e é aplicável em várias áreas de estudo, se concentrando em entender as propriedades e relações dos fenômenos, considerando sua localização e padrão no espaço (INPE, 2004).

Para realizar essa análise, os dados precisam ser georreferenciados, ou seja, acompanhados de coordenadas geográficas. (FERNANDES, 2014). As interpolações são técnicas matemáticas usadas para estimar valores em locais onde não há dados amostrados, com base nos valores disponíveis em locais conhecidos.

A krigagem é uma técnica baseada em procedimentos geoestatísticos que considera a autocorrelação espacial das variáveis regionais, enquanto os métodos determinísticos não avaliam esta correlação. O método permite estimar valores desconhecidos de variáveis em locais próximos, considerando sua dependência espacial. Inicialmente desenvolvida para mapeamento geológico, sua aplicação expandiu-se para diversas áreas, como mapeamento de solos e hidrologia. A krigagem atribui pesos às amostras com base em análises espaciais, utilizando o variograma para descrever a variabilidade espacial, que determina o comportamento regionalizado. Isso resulta em estimativas mais precisas e menos tendenciosas, eliminando erros em média (LANDIM, 2000; LANDIM e STURARO, 2002; INPE, 2004; SOARES, 2011; FERNANDES, 2014; LANDIM, 2010, *apud* THIESEN, 2016).

O método de krigagem é reconhecido por fornecer estimativas lineares e não tendenciosas, sendo amplamente aplicado em diversos campos, especialmente em mapeamento de solos. O erro associado à estimativa do modelo é influenciado por fatores como número e proximidade das amostras, distribuição espacial e natureza do fenômeno. Embora não seja possível calcular o erro exato, é viável estimar a incerteza, auxiliando na escolha do método mais apropriado para cada situação (LANDIM, 2000; ALESSI, 2011; THIESEN, 2016).

Esse procedimento de interpolação ocorreu com auxílio do *software* ArcMap 10.8, pelo emprego do modelo de krigagem exponencial (método de krigagem ordinária com variograma exponencial), um dos modelos muito utilizados na literatura de ciências do solo (PESCIM *et al.*, 2010; THIESEN, 2016). Em relação aos modelos circular e esférico, o modelo exponencial tem a vantagem por apresentar maior suavização e refletir de maneira mais adequada os contornos do tipo de superfície analisada (THIESEN, 2016).

Como os pontos de SPT estão dispostos de maneira alinhada, nas áreas de interesse, e não dispersos de maneira a configurar uma malha, foram testados diversos valores com critérios empíricos e nenhum teste estatístico, e assim foi especificada uma distância fixa (40 metros) como um raio dentro do qual os pontos de amostra de entrada foram aplicados para realizar a interpolação.

O zoneamento da profundidade do impenetrável e da profundidade da zona saturada do aquífero foram obtidos com base na localização espacial dos furos de sondagem SPT e profundidade do impenetrável e a profundidade do nível final de água.

Para o zoneamento acerca do tipo de fundação a ser aplicada (rasa ou profunda), foram empregados a maior parte dos critérios de Thiesen (2016), que basicamente levam em consideração a viabilidade econômica, os limites e as profundidades para fundações rasas da fundação de Rebello (2011). Portanto, os critérios adotados para a geração desse produto foram:

- Limite máximo de seis metros* de profundidade para assentamento de fundação superficial, a fim de admitir a viabilidade mesmo com uma margem maior e observar os índices SPT e níveis da zona saturada em maiores profundidades (*A despeito de Rebello (2011) considerar o assentamento de fundações rasas até 2 metros de profundidade para garantir a viabilidade econômica, Thiesen (2016) adotou 4 metros como parâmetro, a fim de contemplar a escavação de até 2 metros de subsolo);

- Índice SPT ($N_{SPT} \geq 5$) na profundidade analisada e sotoposta a ela, evitando assentamento de fundação superficial sobre solo mole ou muito mole, assim como considerado por Thiesen (2016);

- As regiões que estão fora dos critérios anteriormente enumerados foram consideradas prioritariamente para fundações profundas. Para cada profundidade também foi analisada a informação da presença do nível de água, uma vez que é fundamental na avaliação do tipo de

fundação (THIESEN, 2016).

Foram gerados no total seis zoneamentos para o assentamento da fundação superficial nos primeiros seis metros de profundidade do solo, por meio da interpolação dos valores do N_{SPT} de cada sondagem para cada uma das profundidades analisadas, e o resultado foi compartimentado em duas zonas: $N_{SPT} \geq 5$, com a orientação para fundação superficial e $N_{SPT} < 5$, com a orientação para fundação profunda (THIESEN, 2016).

3. Resultados e Discussões

A superfície do nível impenetrável foi obtida a partir da interpolação dos dados dos 156 pontos de sondagens, e a Figura 4.3 representa o resultado da profundidade do impenetrável a partir dos resultados das sondagens a percussão.

Mediante observação da Tabela 4.1, é possível constatar que 100% da área em questão apresenta profundidade impenetrável maior do que 20 metros. Os resultados também indicam que quase 80% da área apresenta profundidade do topo do horizonte impenetrável entre 26,7 e 34,3 metros, e que a menor frequência de nível impenetrável (0,49%) está representada pelas menores profundidades obtidas nas 156 sondagens.

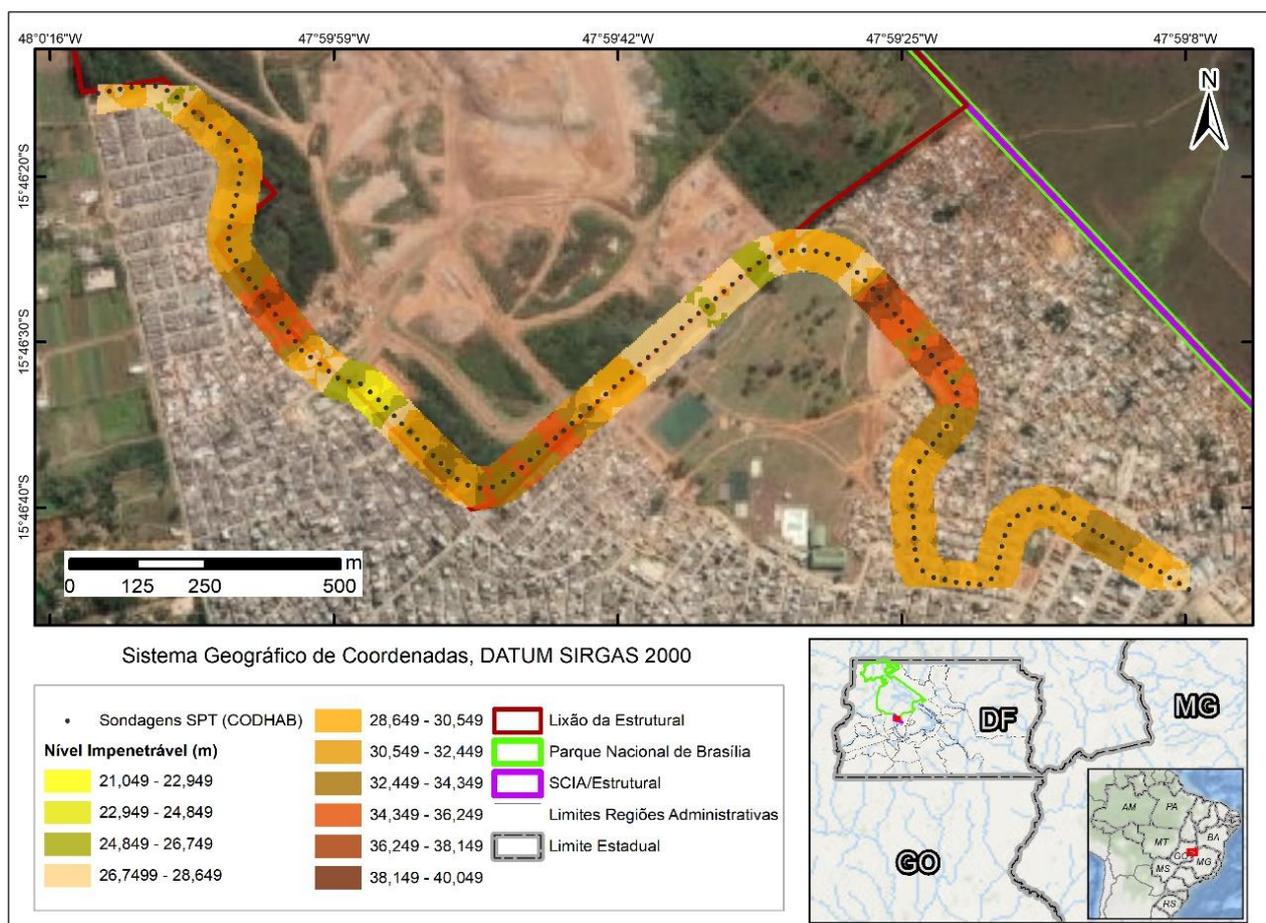


Figura 4.3 - Profundidade do impenetrável à percussão para a área adjacente ao Lixão da Estrutural.

Tabela 4.1 - Frequências da profundidade do impenetrável e do nível d'água das sondagens adjacentes ao Lixão da Estrutural.

Nível Impenetrável (m)	Área (%)	Nível d'água (m)	Área (%)
21,049 - 22,94	0,49%	1,56 - 2	0,05%
22,949 - 24,849	1,55%	2,0 - 3,0	0,02%
24,849 - 26,749	4,80%	3,0 - 4,0	0,17%
26,749 - 28,649	14,69%	4,0 - 5,0	13,94%
28,649 - 30,549	17,05%	5,0 - 6,0	3,19%
30,549 - 32,449	29,38%	6,0 - 17,25	82,64%
32,449 - 34,349	17,94%	TOTAL	100 %
34,349 - 36,249	9,95%		
36,249 - 38,149	3,26%		
38,149 - 40,049	0,88%		
TOTAL	100 %		

Em relação a orientação de tipo de fundação, foram desenvolvidos seis zoneamentos para as profundidades de 1 a 6 metros (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6). Quantitativamente, os resultados podem ser acompanhados mediante consulta à Tabela 4.2. O nível da zona saturada também foi representado nestas ilustrações, pois a presença ou não de água pode ser um fator determinante na definição do tipo de fundação.

Tabela 4.2 - Frequência da orientação de cada tipo de fundação para a área do Lixão da Estrutural, até a profundidade de 6 metros.

Orientação para fundação	Área (%)					
	Prof.= 1 m	Prof.= 2 m	Prof.= 3 m	Prof.= 4 m	Prof.= 5 m	Prof.= 6 m
Superficial	53,15%	49,87%	22,38%	21,79%	30,81%	37,46%
Profunda	46,85%	50,13%	77,62%	78,21%	69,19%	62,54%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%

A partir da Figura 4.4, 4.5 e 4.6 e da Tabela 4.2 é possível notar que as fundações profundas são tecnicamente mais aplicáveis a serem empregadas com o aumento da profundidade, comportamento contrário ao esperado de acordo com a metodologia e os critérios de Thiesen (2016), que prevê ganho de resistência do solo com o aumento da profundidade.

A consulta aos de 156 perfis SPT e à Figura 4.1 evidencia que há presença de aterro, material exógeno, na maior parte da área e em diferentes profundidades. Esse material de aterro não é constituído apenas de resíduos domésticos, apresenta materiais diversos, como: produtos de bota-fora, entulhos, restos de podas urbanas etc. Portanto, o comportamento dos locais com aterros terá influência da própria natureza do material acumulado incluindo deformabilidade e resistência; e em função da sua forma de disposição e arranjo, com níveis mais compactados e coesos e níveis mais fofos e desagregados.

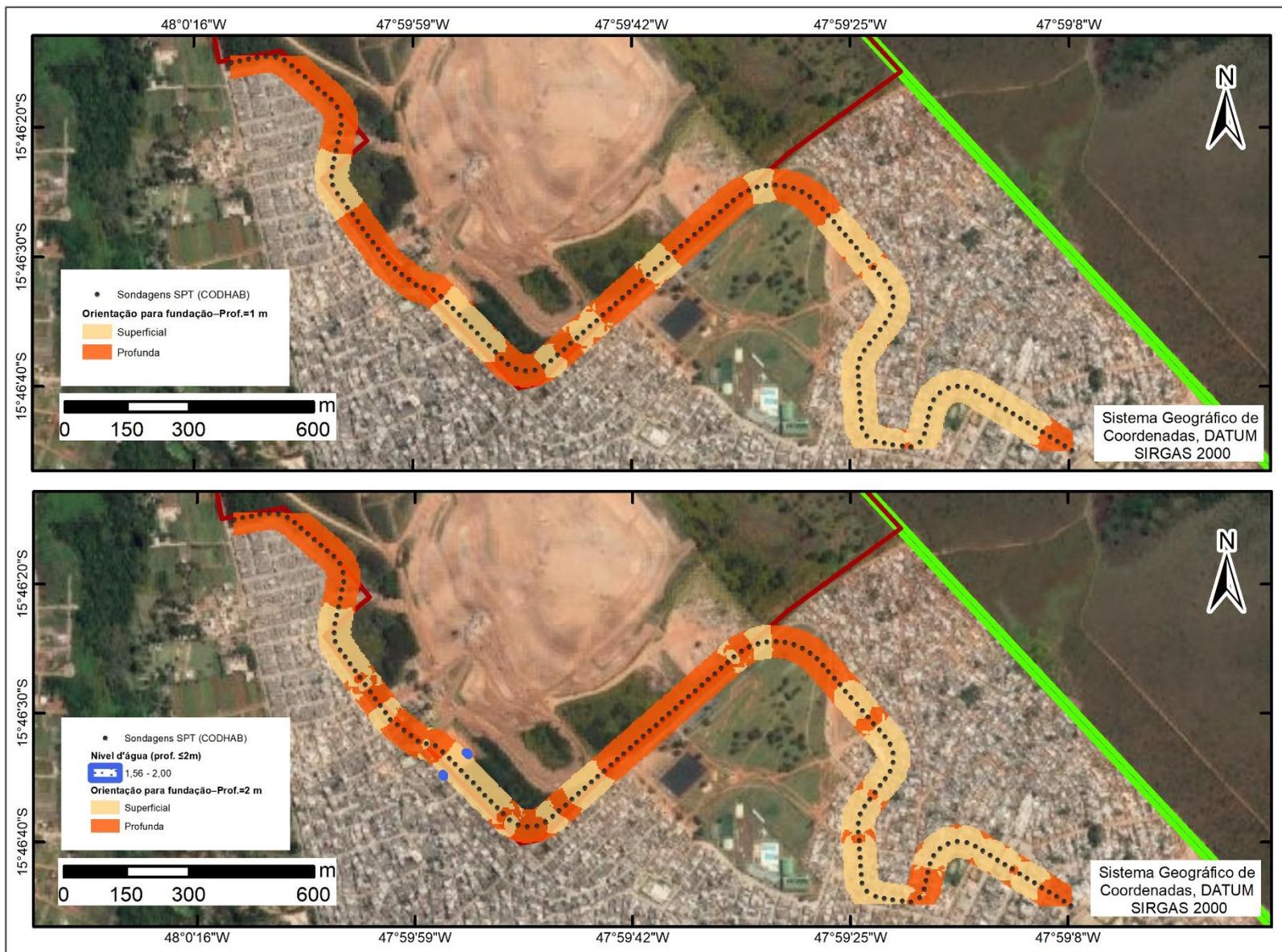


Figura 4.4 - Orientação para fundação para a área adjacente ao Lixão da Estrutural, até a profundidade de 2 metros, com a representação do nível d'água.

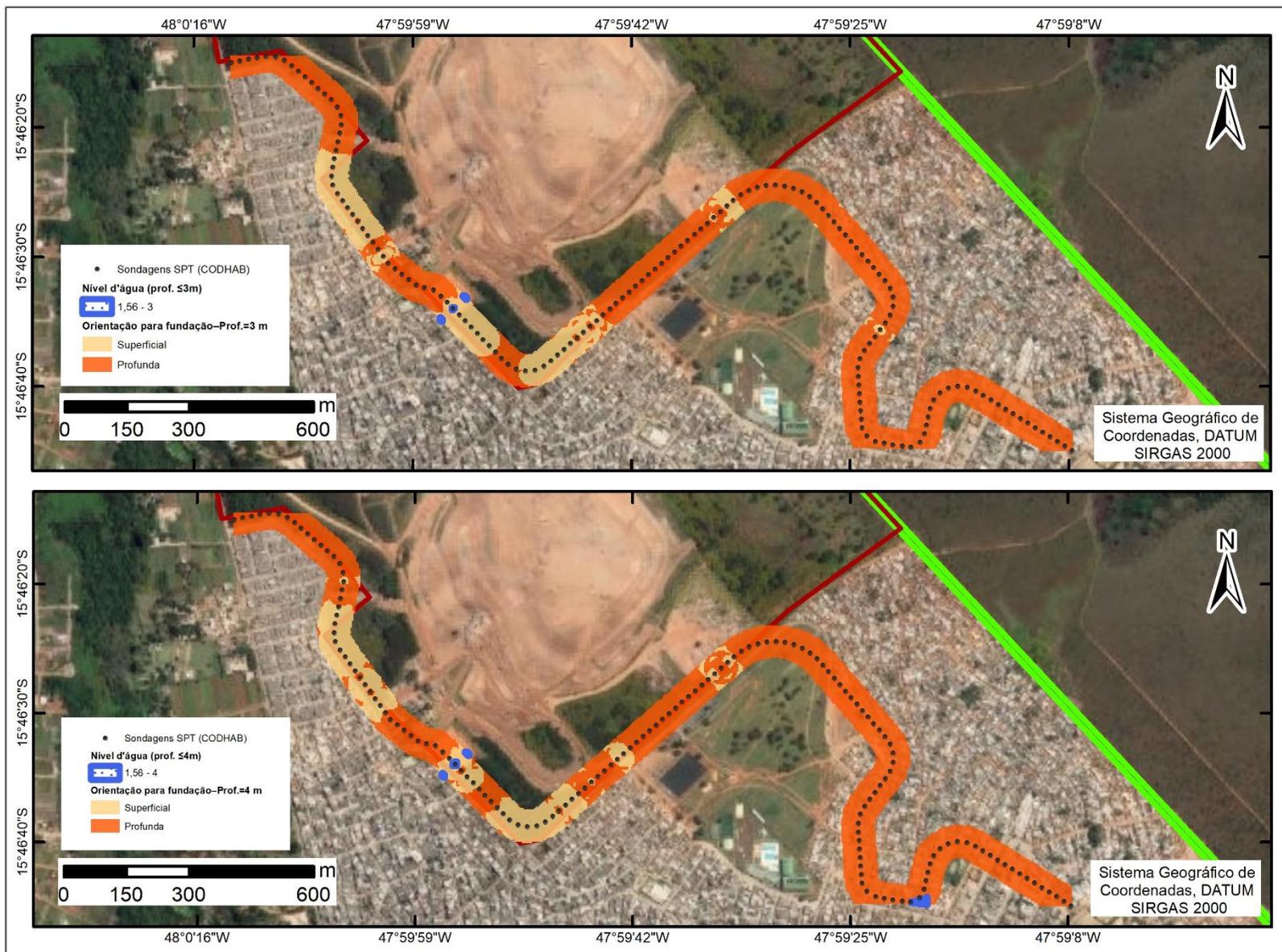


Figura 4.5 - Indicação da fundação para a região adjacente ao Lixão da Estrutural, em profundidades de 3 e 4 metros, incluindo o nível da água representado.

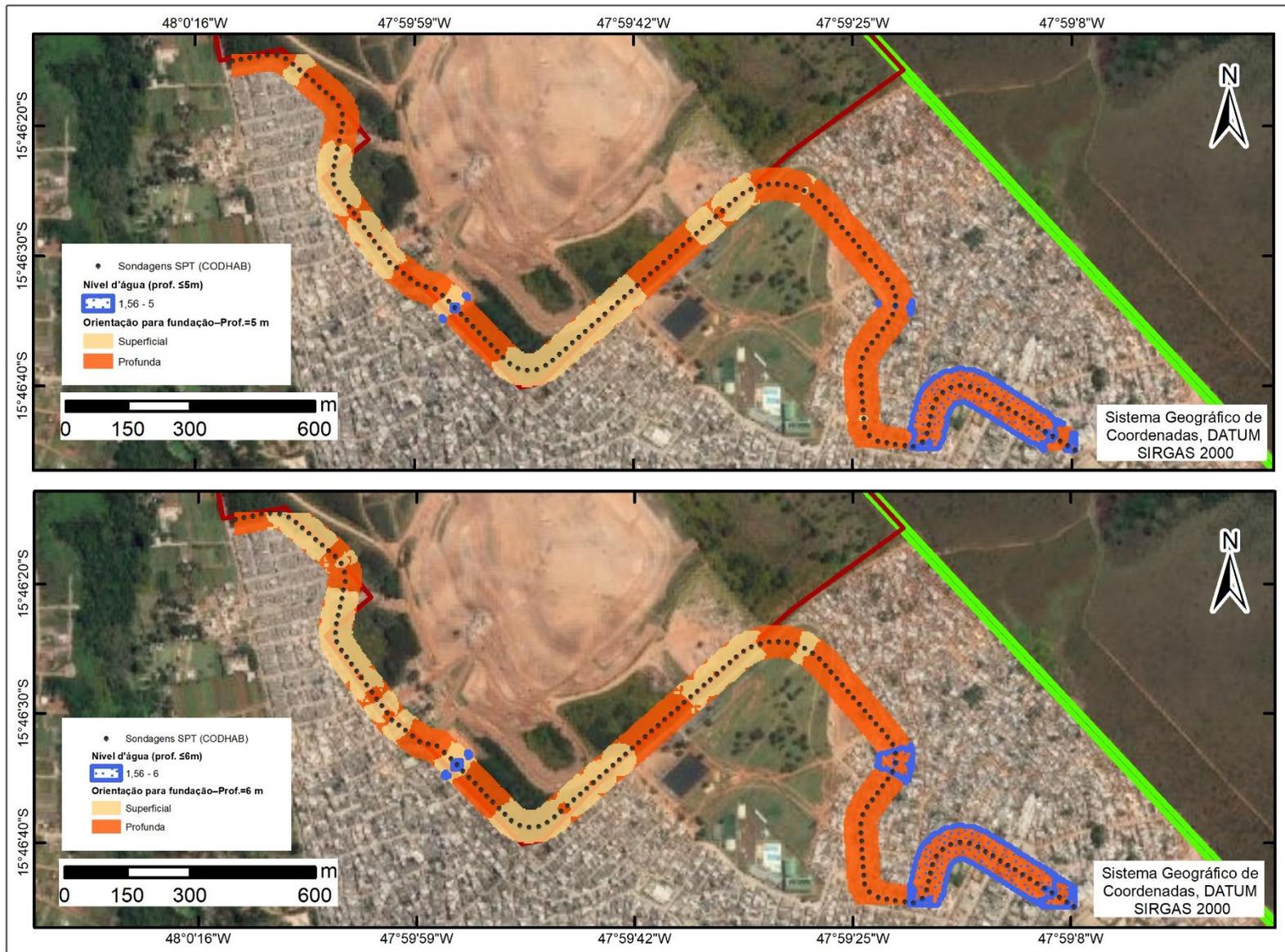


Figura 4.6 - Representação das fundações para a área próxima ao Lixão da Estrutural, a profundidades de 5 e 6 metros, com a inclusão do nível da água na representação.

4. 4. Considerações Finais e Conclusões

As representações do nível da profundidade do impenetrável, do nível d'água e dos seis zoneamentos para orientação de fundação não corroboram com a hipótese de que problemas geotécnicos são causados devido ao ataque químico do chorume à rocha/saprólito e sim de que há influência da própria natureza dos resíduos (aterros) e substratos (ardósias) heterogêneos na caracterização geotécnica.

Além do nível de profundidade do impenetrável à percussão ser muito profundo e dos índices SPT serem baixos desde a superfície até maiores profundidades (incompatibilizando com a tendência de aumento da resistência pedológica acompanhando o aumento da profundidade, THIESEN, 2016) existe a possibilidade de haver ataque químico do chorume às estruturas das fundações em locais que as fundações estivessem em contato direto com a zona saturada. Portanto, a maioria das informações e suas interpretações reforçam a inviabilidade técnico-financeira de execução de um projeto de prédios com mais de 3 km de extensão e com 4 a 5 pavimentos nessa região, como proposto inicialmente pelo Governo do Distrito Federal para ocupação urbana na região.

Em contrapartida, como o contexto pedológico e geológico é o mesmo em toda a área sondada, sendo constituído basicamente por latossolos recobrendo ardósias, e como o aterro ocorre na maior parte das sondagens, possivelmente há influência nos índices de resistência menores na superfície e nos níveis de impenetrável mais profundos seriam pela própria natureza dos materiais: aterro heterogêneo em superfície, influenciando no zoneamento até os 6 metros; regolito e rocha heterogêneos em subsuperfície. Essa interpretação indica que as estruturas geológicas (principalmente as clivagens ardosianas e os falhamentos) seriam responsáveis pelas profundidades anômalas e variadas no nível do impenetrável.

Portanto, o aprofundamento do estudo pedo-geológico e geotécnico da área se faz fundamental, e deve ocorrer baseando-se na ampliação do banco de informações por meio da realização de mais ensaios SPT, tanto em área contaminada como em área sem contaminação e no mesmo contexto pedo-geológico. Mais sondagens na região vizinha às 156 existentes auxiliariam na melhoria das interpolações, de forma a gerar uma malha, e sondagens em áreas sem contaminação ajudariam no entendimento das causas da ocorrência de profundidades anômalas dos níveis de impenetrável.

Além disso, como medida de gestão e planejamento, antes da comprovação da inviabilidade total do projeto, seria interessante propor alternativas ao projeto atual, com outras possibilidades para uso e ocupação da área (como instalação de parques ecológicos, locais para prática de esportes, empreendimentos simples que geram algum bem de consumo etc.) ou até opções de padrões de estruturas para fundações de edificações menores de acordo com os

zoneamentos produzidos. Tais edificações deverão possuir modelos de fundações variáveis, que evitem o contato e as reações com o chorume, de forma a se minimizar efeitos deletérios futuros.

4.5 Referências Bibliográficas

- ALLESSI, C. C. Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄, Rn e microbiota em um campo petrolífero do recôncavo baiano (BA). Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. 218p.
- CIDADES INTELIGENTES. O que foi o Lixão da Estrutural? O maior lixão da América Latina. 2018. Disponível em: <http://ci.eco.br/o-que-foi-o-lixao-da-estrutural-o-maior-lixao-da-america-latina/>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- FERNANDES, T. T. Krigagem indicativa para elaboração de mapas probabilísticos em agricultura de precisão. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2014.
- INPE. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília, EMBRAPA, 2004. ISBN: 85-7383-260-6 Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>. Acesso em: 15 abril 2022.
- LANDIM, P.M.B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Lab. Geomatématica, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 2000.
- LANDIM, P.M.B; STURARO, J.R. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatématica, Texto Didático 6, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2002.
- MACHADO, M.E.J. Catadores ainda tentam se firmar após fechamento do lixão da Estrutural. 2019. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2019/01/20/interna_cidadesdf,731621/catadores-tentam-se-firmar-apos-fechamento-do-lixao-da-estrutura.shtml. Acesso em: 10 fev. 2022.
- MARQUES, M. Lixão da Estrutural: um retrato do maior depósito de lixo da América Latina: um retrato do maior depósito de lixo da América Latina. 2018a. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/lixao-da-estrutural-um-retrato-do-maior-deposito-de-lixo-da-america-latina.ghtml>. Acesso em: 18 fev. 2022
- MARQUES, M. Lixão da Estrutural é fechado e rejeitos passam a ser descartados em aterro. 2018b. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/lixao-da-estrutural-e-fechado-e-rejeitos-passam-a-ser-descartados-em-aterro.ghtml>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- PESCIM, E. E.; URBANO, M.R.; DEMÉTRIO, C. G. B. Estimação da densidade do solo em uma região da Amazônia para o cálculo de estoques de carbono do solo. 19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística – SINAPE. São Pedro/SP, 2010. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/resumo%20estendido_geo.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.
- REBELLO, Y. C. P. Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento. 3. ed. São Paulo: Ed. Ziguarte, 2011. 239 p. ISBN 978-85-85570-10-1
- SEMA DF. 2021. Diagnóstico de Contaminação e proposta de remediação do Antigo Lixão da Estrutural. Brasília. Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal. 487 p.
- SOARES, W. C. Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens a percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa/PB. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2011. 215 p.
- THIESEN, S. Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: Um estudo de caso em Blumenau/SC. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES

Neste capítulo serão debatidos os resultados obtidos na presente pesquisa, analisando criticamente suas implicações e relevância dentro do contexto da área de estudo. Os dados obtidos serão integrados com informações existentes da literatura de maneira crítica a fim avaliar as hipóteses formuladas. Em seguida, serão exploradas as implicações práticas e teóricas dos resultados.

5.1 Neotectônica e Registros de Reativações no Distrito Federal

Os perfis apresentados no Capítulo 3, especialmente os Perfis de Materiais Geotécnicos e os Perfis Geológicos, evidenciam diversas anisotropias ou descontinuidades nos horizontes do regolito. Tais estruturas exibem uma geometria de calhas ou vales preenchidos, que tem suas causas atribuídas a reativação tectônica por diversos autores (MARTINS, 2000; MARTINS *et al.*, 2004; XAVIER, 2010; CAMPOS *et al.*, 2016).

No Brasil, a reativação tectônica ou neotectônica se dá por eventos de movimentação tectônica, ocorridos a partir do limite paleógeno-Neógeno, em geral a partir da acomodação de estruturas geológicas geradas em processos tectônicos neoproterozoicos. No caso da Faixa de Dobramentos Brasília, essas estruturas são representadas pelas zonas de fraqueza e anisotropias que foram geradas nas fases finais dos eventos da orogênese brasileira. As reativações dessas estruturas são principalmente identificadas por características presentes no relevo, solos e depósitos quaternários (XAVIER, 2010).

O estudo e identificação da neotectônica baseia-se em áreas correlatas das geociências, incluindo: caracterização do meio físico (geomorfologia, sedimentologia, pedologia e estruturas recentes); investigação geofísica da sismicidade; datação por meio de técnicas de geocronologia; outras técnicas: geofísica aplicada (GPR e eletrorresistividade), sensoriamento remoto (XAVIER, 2010).

Esses processos desempenham um papel crucial na compreensão da evolução das paisagens (morfodinâmica), distribuição dos solos, forma e densidade da rede de drenagem e dinâmica dos aquíferos fraturados. Além disso, são fundamentais para planejamento e implantação de obras civis, empreendimentos de grande porte, exploração mineral de depósitos com controle estrutural (XAVIER, 2010) e inclusive no condicionamento de aquíferos fraturados.

Xavier (2010) aponta que no Distrito Federal os principais registros neotectônicos são vinculados a reativação de lineamentos, presença de grabens quaternários (Graben do Maranhão e

Graben de São Sebastião), assimetria de vales (vales tectônicos em solos/saprolitos em Águas Claras e vales fluviais do Rio Jardim), transporte de solos, compartimentação geomorfológica, dentre outros etc. (falhas e estruturas *slickensides* em horizontes lateríticos, estruturas em brechas carbonáticas paleógenas, leques aluviais cenozoicos).

Pela correspondência direta entre o contexto geológico, geomorfológico e pedológico da área do Lixão da Estrutural e da região de Águas Claras, há a probabilidade de ocorrência de estruturas e geometrias similares com os vales tectônicos presentes nos solos/saprolitos também nas áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural.

A variação abrupta de nível e/ou espessura em alguns horizontes/materiais dos perfis apresentados no Capítulo 3, interpretadas e representadas por meio de falhas normais, são admissíveis como registro de atividade ou de estruturas neotectônicas.

O arcabouço das unidades mais profundas (rocha alterada) pode sugerir interpretação alternativa aos blocos tectônicos altos e baixos. Neste caso, a estruturação poderia ser vinculada a dobras parasíticas ou fractais dentro do anticlinório no interior do Domo de Brasília (FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998). Essa interpretação é descartada tendo em vista que a estruturação geral mostra um padrão desarmônico, sem alguma direção ou vergência preferencial, ao contrário do que seria esperado caso o controle fosse por dobramentos e não por falhamentos recentes.

Portanto, tal interpretação de estruturas e contexto tectônico, de acordo com as geometrias encontradas nos horizontes basais dos perfis descritos no Capítulo 3, corrobora o apresentado por Martins (2000), Martins *et al.* (2004) e Xavier (2010) para essa região (Figura 5.1A e Figura 5.3).

Além das interpretações de falhas normais em perfis, naqueles onde foi possível e havia ligação, foi verificada a intersecção das estruturas secundárias em planta (Figura 5.5), estando associadas a grandes lineamentos regionais. Como as principais estruturas neotectônicas são NW e NE, há concordância com as intersecções contínuas que foram observadas: um graben do perfil 22 a 54 (925 metros) para o perfil 54 a 92 (1230 metros); um horst (1690 metros até 1860 metros) do perfil 54 a 92 para o perfil 92 a 111.

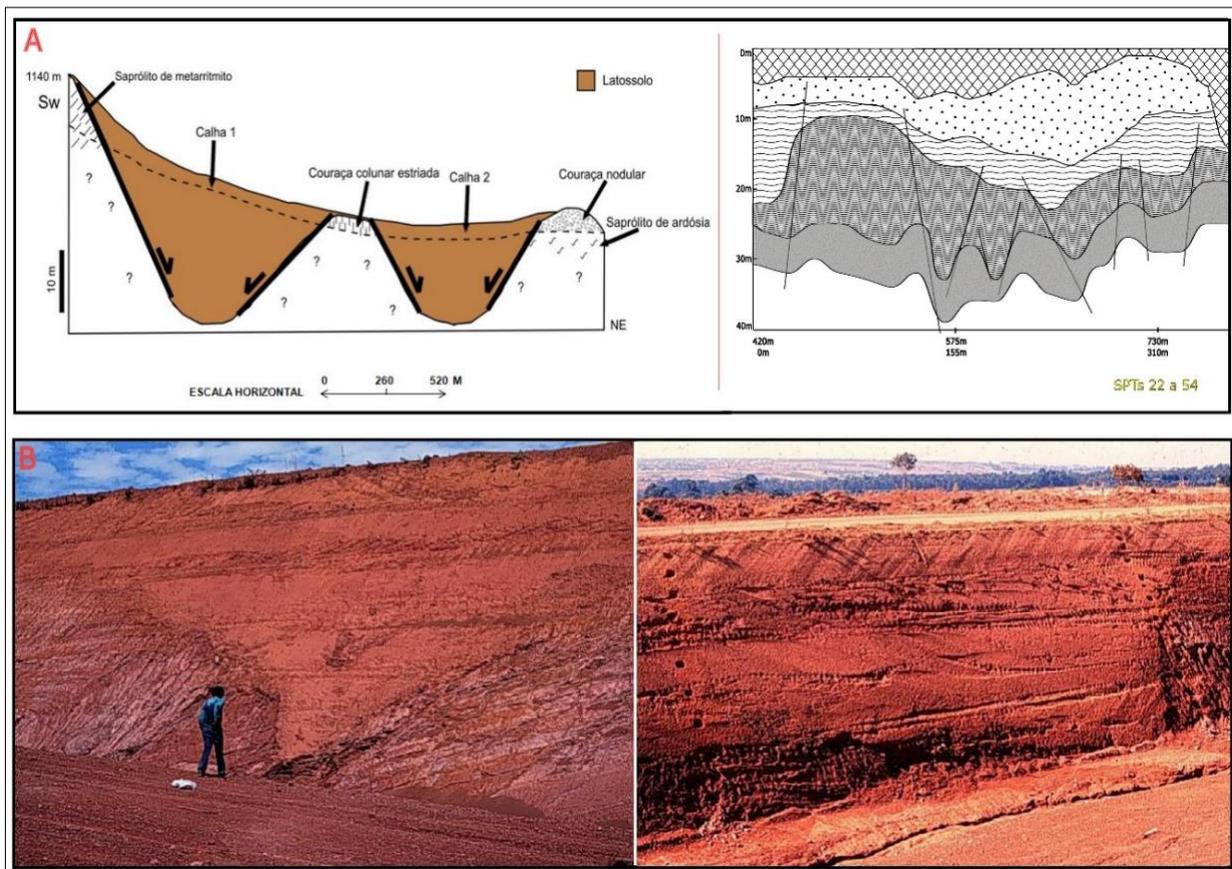


Figura 5.1 - A: Calhas interpretadas por Martins (2000) e reinterpretadas por Xavier (2010), comparadas com parte do segundo perfil geológico elaborado e apresentado no Capítulo 3. B: Registros dos cortes/trincheiras das obras do metrô de Águas Claras (MARTINS, 2000).



Figura 5.2 - A: SPT01-10572, realizada nas proximidades de uma entrada do Lixão. B: Local de realização das sondagens SPT01 e 02-10573, em área sem contaminação, na Colônia Agrícola 26 de Setembro.

5.2 Implicações da Evolução Morfo-litoestrutural e Pedogenética

Nesta pesquisa além da utilização das 156 SPTs (CODHAB) e de dados de SPTs secundários, foram contratadas mais três sondagens SPT para serem realizadas com as seguintes condições:

- Uma sondagem SPT com circulação de água em área contaminada, alinhada entre as SPTs 44 e 45 (SPT01-10572) (Figura 5.2A);
- Uma sondagem com circulação de água e outra sem circulação de água em área sem contaminação, a oeste do Córrego Cabeceira do Valo, na Colônia Agrícola 26 de Setembro. Foram realizadas no mesmo local, mas a um metro de distância entre elas (SPT01-10573 e SPT 02-10573, com e sem circulação de água respectivamente) (Figura 5.2B).

Essas três novas sondagens realizadas (Apêndice 2) tinham o intuito principal de validação dos dados existentes, de maneira comparativa, em relação a contaminação e tipo de SPT (com ou sem circulação de água).

O aspecto geral observado foi que, sobre o mesmo contexto de latossolos gerados a partir de ardósias em áreas planas, ou seja, mesmo contexto geológico, pedológico e geomorfológico, as sondagens SPTs avançam até a grande profundidade devido a própria natureza dos solos/maciços. Essa combinação nessa região do Distrito Federal (centro-oeste do anticlinório) propicia perfis de latossolos muito desenvolvidos e com baixas resistências.

Outro ponto verificado é a influência direta do avanço/profundidade do furo de acordo com o tipo de SPT executado, em que a sondagem com circulação de água exibe maior avanço/profundidade do que a sondagem sem circulação de água. As 156 SPTs da CODHAB também foram executadas com circulação de água (Apêndice 1).

Tais constatações são reforçadas com a análise dos perfis SPT secundários (Apêndice 3): Água e Terra Consultoria (2006), Topocart (2010) e HR Fundações (2022 e 2023). Regionalmente, a distribuição desses pontos se dá sobre a mesma unidade geológica (ardósias da Formação Ribeirão do Torto) e mesmo compartimento geomorfológico (Plano intermediário) mas que localmente apresentam diferenças de unidades geológicas (restritamente ocorrem quartzitos da Formação Ribeirão Piçarrão), além de contrastes na declividade, espessura e classificação dos solos (Figura 5.3).

Pela comparação e avaliação das sondagens SPTs secundárias, mesmo a combinação latossolo + ardósia apresenta variações, com locais menos espessos em áreas de maiores declividades. As sondagens SPT secundárias mais rasas ocorrem basicamente em cambissolos e gleissolos, solos que apresentam menor desenvolvimento. Portanto, os fatores naturais seriam os regentes fundamentais das características que são apresentadas pelas sondagens SPT.

Além dos fatores anteriormente citados, outro parâmetro que influencia e controla fortemente as características e profundidades totais das sondagens SPT na região, seriam as estruturas reativadas pela neotectônica. Dentre os valores de profundidade do impenetrável para as 156 SPTs (Apêndice 1), que são altos verifica-se valores ainda maiores do que a média (em alguns locais alcançam 40 metros de profundidade). Tais valores anômalos da profundidade do impenetrável são compreendidos como vinculados diretamente a profusão de falhas normais combinadas de diversas maneiras e escalas. O contraste lateral pode mostrar desnível de mais de 10 metros em locais próximos.

Portanto, pelo que foi apresentado nos dois capítulos de resultados, aliado as interpretações iniciais do presente capítulo, há a constatação é de que o chorume não afeta as propriedades geotécnicas dos maciços naturais, contrapondo ao proposto na caracterização geotécnica do Diagnóstico de Contaminação do Lixão (SEMA, 2021). O trabalho de Campos (2007) também já havia considerado a hipótese de que o chorume pudesse alterar as propriedades geotécnicas do maciço em que se encontra instalado.

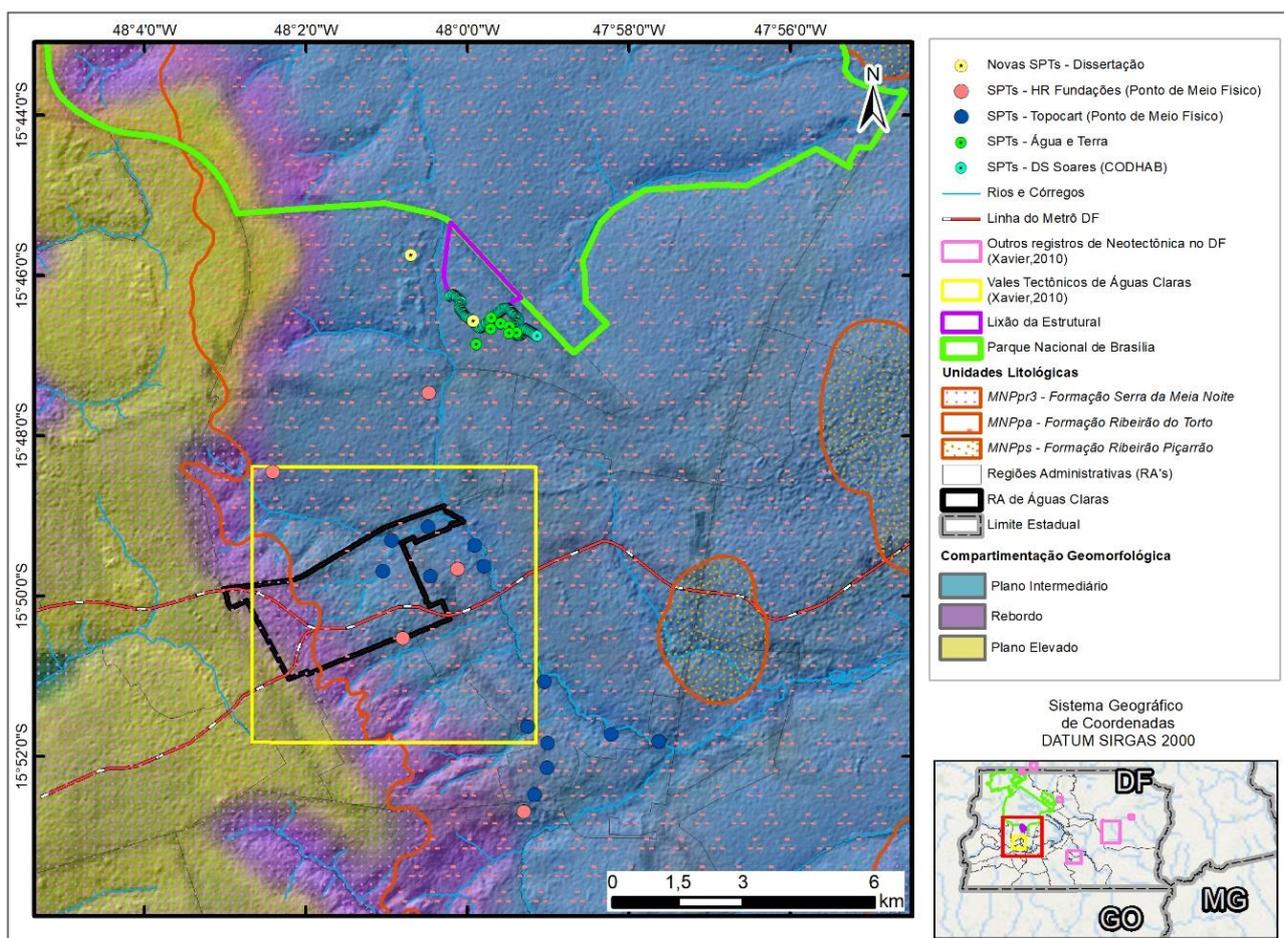


Figura 5.3 - Distribuição espacial das sondagens SPT (CODHAB e novas SPTs) deste trabalho e das sondagens secundárias, de acordo com a geologia (CAMPOS *et al.*, 2001) e geomorfologia (Fonte: GDF, 2010) na região.

Em síntese, o contexto atual do meio físico do Distrito Federal foi moldado conforme o controle litoestrutural, que conseqüentemente ditou a geomorfologia e a pedologia. O modelo de evolução pedo-geomorfológica a ser apresentado a seguir, proposto por Martins *et al.* (2004), é aderente e elucidativo em relação a concepção de que as características naturais seriam as principais responsáveis pelas propriedades que são observadas em sondagens SPT.

Nesta proposta é destacado que regionalmente, o ciclo Brasileiro desenvolveu um padrão estrutural de domos e bacias devido às fases de interferência das dobras com eixos N-S e E-W, sendo marcadas pelo Domo de Brasília, com rochas do Grupo Paranoá, e bacias inseridas nas rochas dos Grupos Araxá e Canastra (Figura 5.4A). Durante o Mioceno Inferior ocorreu reativação tectônica, que facilitou um processo de denudação do topo do regolito laterítico existente no domo. Esses processos denudacionais cortaram o núcleo do Domo de Brasília, originando os Planos Intermediários e invertendo o relevo e fluxo/geometria das drenagens, de centrífuga para centrípeta. Este local de depressão relativa é denominado como a Depressão do Paranoá (MARTINS *et al.*, 2004).

Os Planos Elevados, residuais nos flancos dos domos após os processos de denudação, são sustentados e escalonados de acordo com a disposição litológica e atitude das camadas. No Domo de Brasília os topos dos Planos Elevados são sustentados por quartzitos médios (Formação Ribeirão da Contagem) e metarritmitos arenosos (Formação Serra da Meia Noite) na parte interna. A transição dos Planos Elevados para os Planos Intermediários, que seria a depressão das ardósias (Formação Ribeirão do Torto) no centro do Domo de Brasília, é marcada pelos Rebordos (MARTINS *et al.*, 2004) (Figura 5.4B, 5.4C e 5.4D).

Outro ponto marcante do controle litoestrutural do relevo é que o dobramento assimétrico durante o domeamento resultou em flancos oeste mais horizontais e flancos leste mais inclinados, revelando a vergência para ao Cráton São Francisco. Isso causou maiores áreas de aplainamento residual mais marcadas no lado oeste e a sul (eixos de dobramento irregulares) do Domo de Brasília, como visto na Chapada da Contagem (constituída pela parte sudoeste, oeste e norte dos Planos Elevados no Domo de Brasília) e Chapada de Brasília (constituída pela parte sudeste dos Planos Elevados no Domo de Brasília), em contraste com o flanco leste mais estreito (MARTINS *et al.*, 2004) (Figura 5.4B, 5.4C e 5.4D).

Martins *et al.* (2004) ainda consideram a etapa de formação dos latossolos sobre as chapadas elevadas/planos intermediários e espessamento dos saprolitos, a partir do Mioceno Médio. Estes autores ainda complementam que a partir do Plioceno Superior, com nova atividade tectônica, foi desencadeado um processo adicional de erosão, e que os canais formados nas encostas/Rebordos da Depressão do Paranoá, por atividade tectônica e erosão, foram preenchidos

por sedimentos provenientes da cobertura pedogenética. Martins (2000) também descreve a ocorrência dessas calhas em seu trabalho (Figura 5.1).

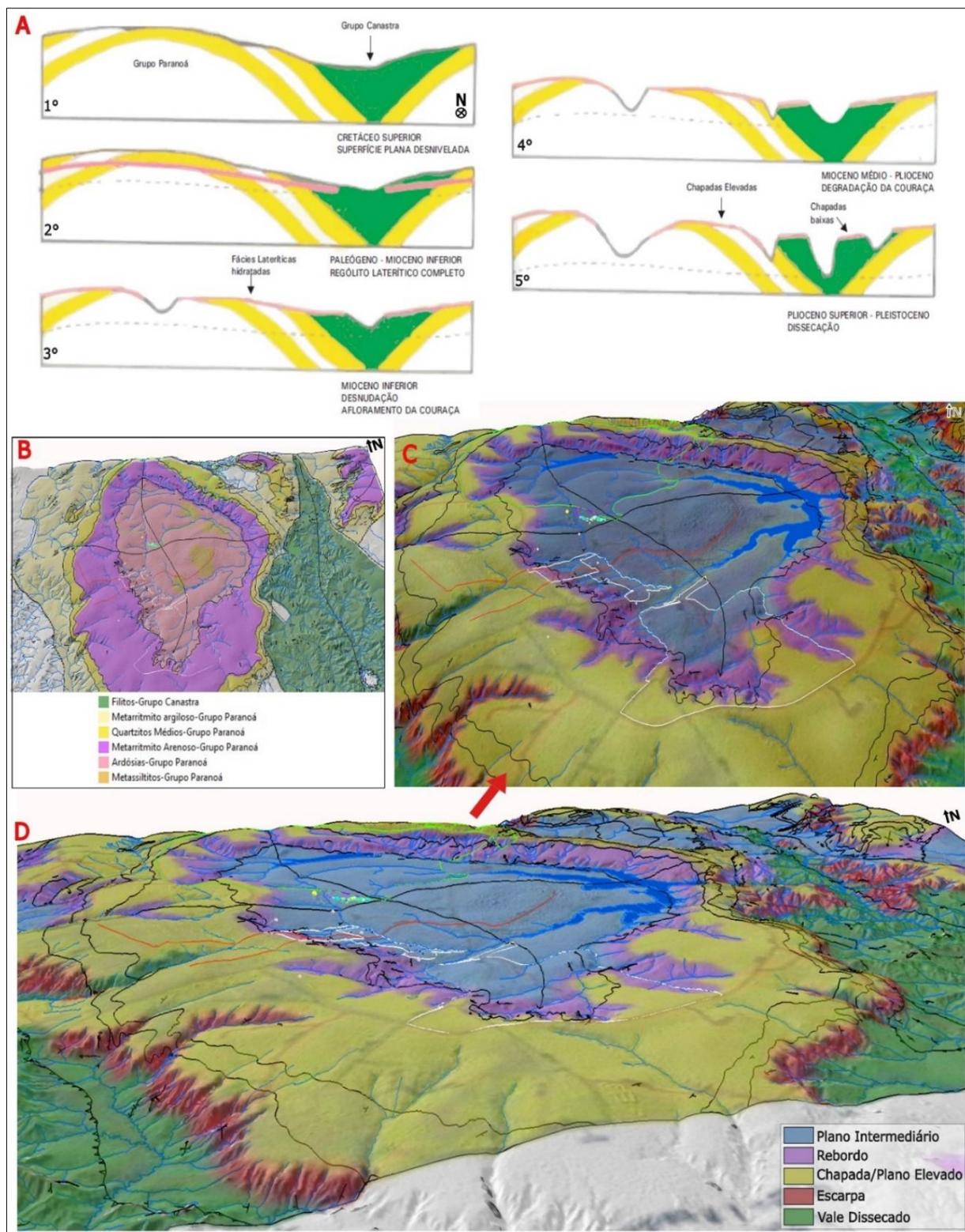


Figura 5.4 - A: Proposta de Martins *et al.* (2004) para a Evolução Geomorfológica do DF. **B:** Geologia do DF, com destaque para os filitos do Grupo Canastra e para as unidades do Grupo Paranoá, que constituem o Domo de Brasília (CAMPOS *et al.*,2001). **C:** Compartimentação Geomorfológica do Domo de Brasília (Fonte: GDF, 2010). **D:** Visão panorâmica do relevo do DF, destacando o Domo de Brasília.

A conclusão do modelo de Martins *et al.* (2004) se dá com o relato de que no Quaternário há a continuação do aprofundamento do saprolito, que já havia sido espessado por maior atividade química e pedogenética em períodos mais úmidos.

Xavier (2010) comenta que a coexistência de solos profundos e solos rasos no mesmo compartimento geomorfológico são implicações de processos neotectônicos. Essa autora ainda complementa que o padrão da rede de drenagem também é um forte indicador (estando fortemente associadas a lineamentos regionais principais), sendo os padrões em treliça (que fluem paralelamente e recebem afluentes ortogonalmente) ou paralelos (que escoam paralelamente uns aos outros, mas com ângulos agudos) (Figura 5.4B e Figura 5.4C; Figura 5.5) são facilmente desenvolvidos em linhas de intersecção entre os planos de falha e a superfície do terreno.

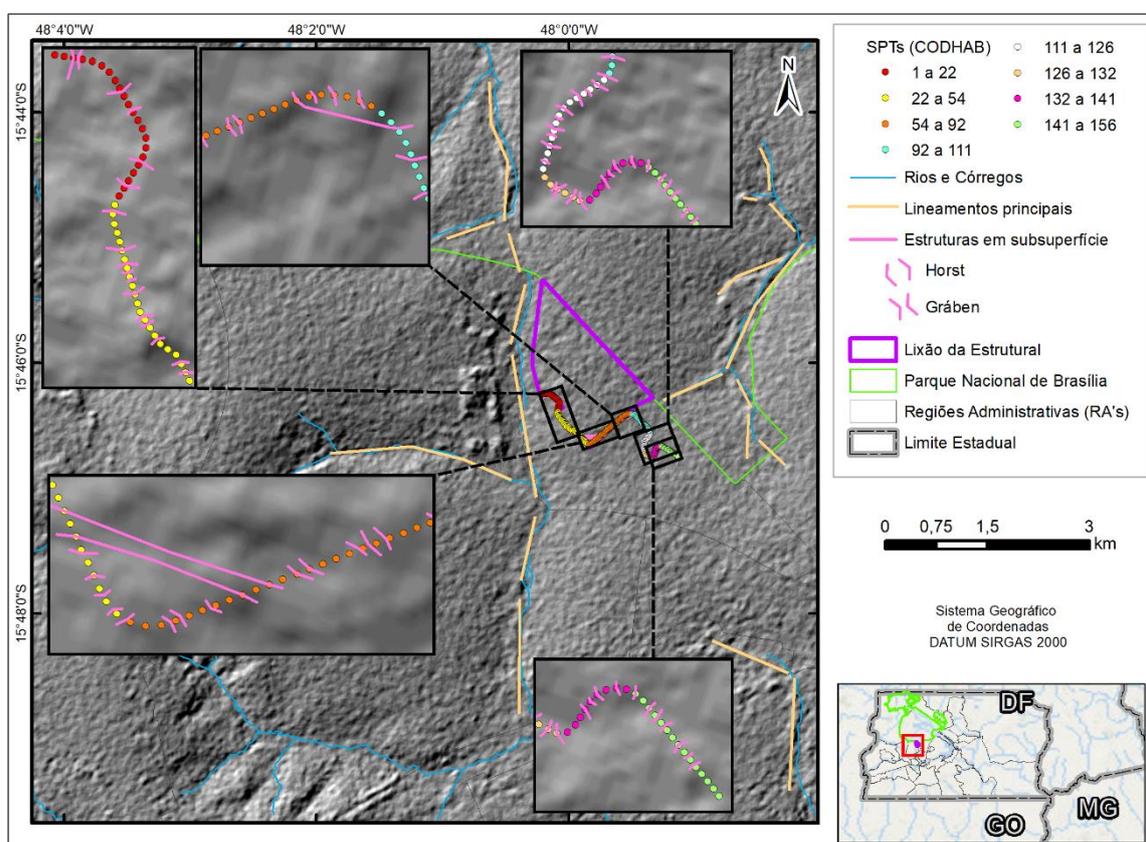


Figura 5.5 - Lineamentos estruturais regionais e intersecção das estruturas (horst e graben) em planta.

Outro resultado, apresentado no terceiro item do Capítulo 3, utilizado para o entendimento do impacto do chorume no maciço foi o teste da relação/comparação visual entre o dado de SPT e o dado de eletrorresistividade. Contudo, o vínculo observado não foi satisfatório para a integração da conjectura de que o chorume afeta todas as propriedades geotécnicas dos maciços.

Gonçalves *et al.* (2021) correlacionam com sucesso a resistividade e o N_{SPT} , mas aponta que é sensível a variação de litologia, textura e conteúdo de argila. A correspondência entre

N_{SPT} /geologia e a eletrorresistividade neste trabalho não foi maior, provavelmente em função da presença do contaminante no maciço e do teor de argila dos solos. Caso a eletrorresistividade fosse aplicada em uma área não contaminada (sem a presença do chorume) seria esperada maior correlação.

Gonçalves *et al.* (2021) ainda apontam que a física envolvida no fluxo de corrente elétrica no substrato indica que diversos parâmetros (distribuição do tamanho dos grãos, mineralogia, grau de saturação, porosidade e cimentação) influenciam tanto a resistência do solo (N_{SPT}), quanto a resistividade elétrica (ρ) do meio.

Portanto, trata-se de uma avaliação complexa, que demanda consideração de diversos fatores, como: composição/textura dos materiais/solos; natureza do material parental, se aplicada em solo arenoso, argiloso ou de textura franca; porosidade e compactação do substrato; presença de água/umidade e espessura da zona não saturada; heterogeneidades no substrato (possível presença de matacões ou lentes de outros tipos de rochas).

5.3 Planejamento Geotécnico e Ocupação Urbana

A despeito do exposto anteriormente, de que o maciço não experimenta alterações físicas ou mecânicas devido à presença/contato com o chorume, ainda permanecem outros desafios geotécnicos, basicamente ligados a fundação de edificações.

Como já citado, o projeto de construção predial da CODHAB se constituiria de uma edificação de 4 a 5 pavimentos (Figura 5.6B) com 3,23 quilômetros de extensão, estando inclusive situado sobre uma área que já houve disposição direta de resíduos em trincheiras até 1978 (Figura 5.6A).

De acordo com o protótipo pretendido e com os dados das sondagens SPT realizadas nessa área, analisa-se que as fundações dessas edificações necessitariam de robustez e profundidade na maior parte dos locais com pretensão de ocupação. A análise apresentada no Capítulo 4 corrobora a determinação de fundações profundas na maior área a ser ocupada. Portanto, a possibilidade de haver problemas geotécnicos ligados às estruturas das fundações, inclusive o ataque químico do chorume, aumentariam as dificuldades técnicas da execução e manutenção do projeto.

O chorume é um lixiviado escuro de composição complexa, que depende dos resíduos presentes e seus estágios de decomposição (DEL REY, 2020). Portanto, o chorume pode conter substâncias que podem reagir e corroer os materiais constituintes do concreto de eventuais fundações instaladas na região ao longo do tempo. Isso acarretaria uma redução na resistência ao longo do tempo, podendo aumentar a permeabilidade do concreto e tornando-o mais suscetível à infiltração.

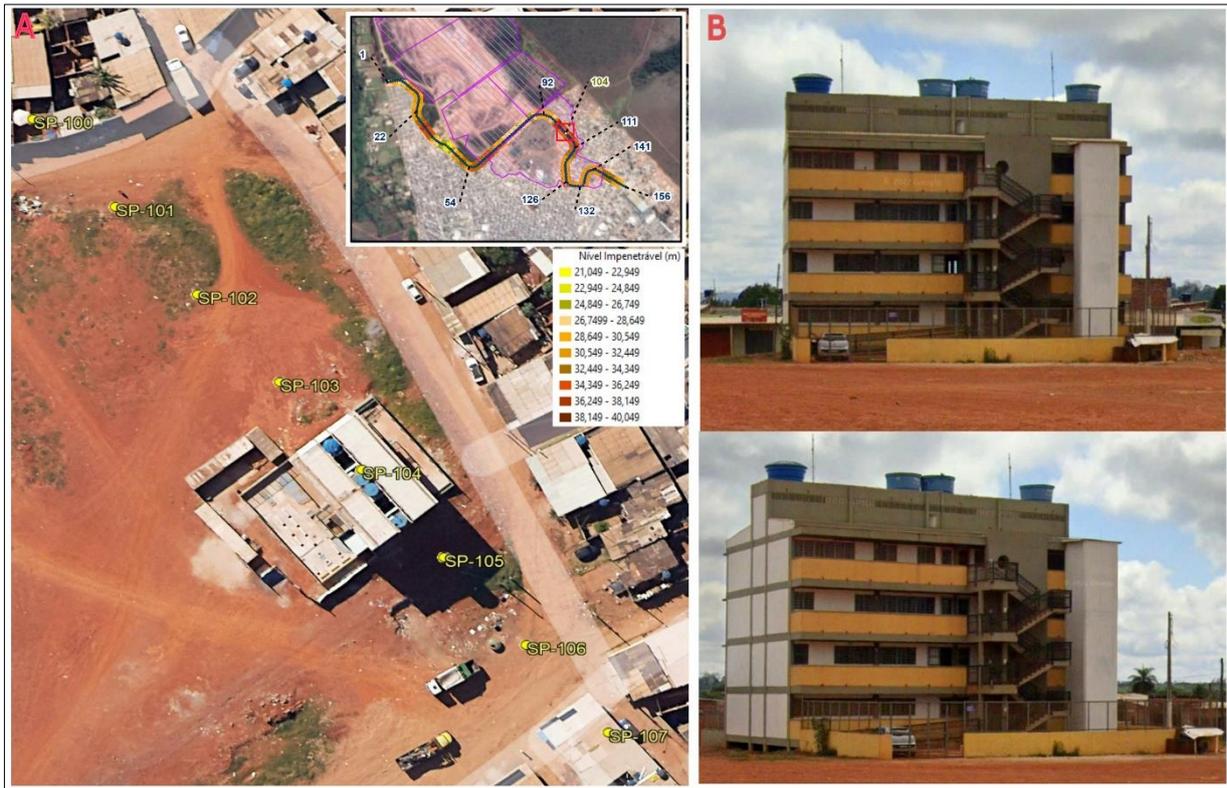


Figura 5.6 - A: Localização do protótipo da edificação do projeto da CODHAB, no local da SPT 104. **B:** Registro do protótipo constituído de 4 pavimentos de apartamentos e um pavimento superior de área funcional.

Como as fundações estruturadas de concreto armado são muito empregadas, em casos de contato do chorume com estas estruturas, poderia causar ataque no aço das armaduras (vergalhões) dentro do concreto, depois da deterioração do próprio concreto.

Portanto, ao projetar e construir fundações de edificações de maior porte, principalmente em áreas com contexto de contaminação, é importante considerar a profundidade da zona saturada e os potenciais efeitos do efluente contaminante. O emprego de medidas de proteção e impermeabilização adequadas para as fundações podem ser necessárias para mitigar esses efeitos.

Em suma, para execução segura de um projeto desse porte e contexto, haveria necessidade de ser estudar quais as melhores alternativas para o projeto da fundação. Padrões de estruturas para fundações estando no mínimo de acordo o zoneamento geotécnico geral produzido para a área (Capítulo 4) poderiam ser uma alternativa, mas seriam mais viáveis tecnicamente desde que, de acordo com as especificações da ABNT - NBR 6122:1996, que consideram diversos parâmetros para projetos e previsões (fundações em cotas diferentes, cargas admissíveis, recalque etc.).

A partir dos perfis das 156 sondagens tipo SPT (Apêndice 1) e das seções apresentadas no Capítulo 3, observa-se a ampla distribuição de locais com aterro, com grande variação de continuidade e profundidade de ocorrência.

As próprias características naturais dos aterros, atribuem a esses horizontes uma grande heterogeneidade composicional e de comportamento mecânico (resistência, dureza, ductibilidade,

rigidez etc.). Sua constituição é de vários tipos de materiais acumulados, como resíduos domésticos, entulhos de obras, produtos de bota-fora, resíduos de podas e varrição etc.

As características heterogêneas dos aterros são representadas diretamente pelas propriedades geotécnicas, em que os perfis de materiais geotécnicos evidenciam o amplo espectro de classes N_{SPT} dentro das regiões de aterro, variando de *Muito Mole* até *Dura*.

Regiões de aterro geralmente são adensadas e compactadas, devido a acumulação e/ou disposição de material exógeno no local. Esse adensamento de material heterogêneo pode trazer consequências geotécnicas negativas para o local, resultando em baixa estabilidade e variações laterais das condicionantes para suporte de carga axial das fundações, podendo ocorrer recalques diferenciais.

A consistência de um perfil natural de solo é progressiva, e em geral, com aumento da resistência com o incremento da profundidade. Os perfis SPT mostram que a presença do aterro altera essa tendência na parte superior dos perfis, já sendo alta e variada no início da sondagem. A compactação do aterro na parte superior, com o próprio peso do material, que já está adensado, poderia colmatar os horizontes naturais sotopostos.

A disposição de peso sobre o aterro pode modificar tanto a porosidade quanto a compactação dos horizontes do solo sotoposto, pois a presença desse material heterogêneo e compactado na superfície, ao ser submetido a pressão e pesos maiores, pode resultar em compactação dos horizontes inferiores.

Portanto, a estabilidade dos maciços da região como um todo, pelo que é apresentado nos perfis, realmente seria incerta e pouco previsível, podendo ser afetada com a aplicação de carga de um eventual prédio de maior porte.

Além das sondagens realizadas fora da zona de acumulação de resíduos (em mesmo contexto de solos, relevo e substrato) terem demonstrado comportamento anômalo em termos de profundidade do impenetrável, sondagens na área do lixão, não submetidas à presença de chorume mostraram o mesmo comportamento.

A região definida pelas sondas SPT 141 a 156 não é submetida a presença de aterros ou de chorume, e neste setor as profundidades do impenetrável mantêm o padrão de serem profundas, em geral maiores que 30 metros. A confirmação de que nesta porção não existe contaminação foi corroborada por estudo geofísico e presença de poço de monitoramento da qualidade da água subterrânea (SEMA, 2021), ou seja, para penetrabilidade o chorume não afeta.

Ainda poderia se avaliar a questão do gás liberado, entretanto essas regiões onde as SPTs foram realizadas em tese não possuem mais produção de gás, por ser a parte mais antiga e com os resíduos já decompostos. Só há produção de gás nas regiões mais recentes, parte norte e intermediária.

Desse modo, pode ser demonstrado que o chorume não interfere nas propriedades mecânicas (resistência a penetração/penetrabilidade) do maciço rochoso e regolítico, sendo que a anomalia de ocorrência profunda do impenetrável é atribuído à soma das condicionantes naturais: solos e regolitos argilosos e muito espessos (que resultam em predominância de materiais de baixa resistência geotécnica), relevo aplainado (que possibilita intenso intemperismo) e substrato representado por ardósias intensamente fraturadas (que facilita a percolação de água e ampliação da pedogênese).

Mesmo que as feições geotécnicas sejam controladas por feições naturais, a viabilidade técnico-financeira da ocupação é restrita do ponto de vista da complexidade e magnitude do projeto em termos de tipos de fundações e risco geotécnico.

A ocupação da região por edificações de maior porte ainda não é indicada pelos seguintes argumentos:

- Custo elevado, devido ao dimensionamento de fundações profundas com risco elevado de ataque por chorume;
- Risco geotécnico elevado, em razão da grande espessura e distribuição de aterros heterogêneos em vários segmentos, com risco de instabilidade que pode causar patologias geotécnicas;
- Baixo valor fundiário agregado, pois se trata de uma obra de atendimento ao interesse social com localização desprivilegiada por estar adjacente a uma área de antigo lixão.

Além dos argumentos enumerados, em termos gerais, entende-se que a execução de um empreendimento com estas feições não estaria totalmente concordante com os padrões de desempenho sobre sustentabilidade da *International Finance Corporation* (IFC) de acordo com as Diretrizes Gerais de Meio Ambiente, Saúde e Segurança para regiões contaminadas do Grupo do Banco Mundial (WBG) (2007), referente a meio ambiente, socioeconomia, gestão da terra e reassentamento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após compilação dos dados disponíveis e integração dos resultados é possível concluir, em primeiro plano e de maneira geral, que as características inerentes do meio físico da região de estudo são primordiais para corroborar as interpretações e considerações.

A região é majoritariamente composta por ardósias da Formação Ribeirão do Torto, com ocorrências localizadas de quartzitos do topo da Formação Ribeirão Piçarrão, na forma de janelas erosivas.

O padrão de relevo da área é plano a suave ondulado, localmente e regionalmente, estando situado no compartimento de Planos Intermediários, mais especificamente em uma depressão relativa, denominada Depressão do Paranoá.

A variação pedológica é ligada a declividade local, uma vez que o compartimento geomorfológico regional é único. Ocorrem predominantemente latossolos vermelhos e latossolos vermelho-amarelos, que vão de perfis muito espessos a perfis com menores desenvolvimentos, e em menor proporção ocorrem cambissolos em regiões de maiores declividades e gleissolos próximo a cabeceiras de drenagens.

Os resultados das integrações dos dados das 156 sondagens SPT que são apresentados em perfis apresentam três conjuntos principais de informações: Índice SPT - N_{SPT} , Materiais Geotécnicos, Interpretação Geológica. O primeiro conjunto foi fundamental para a interpretação/modelagem da disposição das distintas zonas, de acordo com os valores de resistência a penetração, depois da organização e plotagem das informações dos logs das sondagens SPTs. Importante destacar que os dados utilizados na modelagem são uniformes, tendo sido obtidos com o mesmo controle de campo e método de aquisição.

O segundo conjunto de perfis forneceu a informação da distribuição dos aterros e dos locais e zonas que foram agrupados para compor cada um dos cinco horizontes: aterro de resíduos, com características muito heterogêneas; horizontes A + B latossólicos, com classes geotécnicas predominantemente *Muito Mole* a *Mole*; primeiro horizonte de alteração/saprolítico (horizonte C1), com ocorrência majoritária da classe *Média*; segundo horizonte de alteração/saprolítico (horizonte C2), predominantemente com a classe *Rija*; horizonte de rocha alterada, constituída basicamente pela classe *Dura* e limite com a interface do impenetrável (rocha sem alteração).

Ao último grupo de perfis, a informação adicionada por meio de interpretação das falhas normais, foi primordial para o entendimento do padrão dos horizontes basais de blocos tectônicos altos (horsts), blocos baixos (grabens) e blocos baixos assimétricos (hemigrabens).

Devido a variação abrupta de profundidade e espessura, em alguns locais nos horizontes do último conjunto de perfis, foram representadas falhas normais, sendo admitidas como estruturas neotectônicas. Pelas evidências e contexto geológico, a geometria resultante é correspondente as calhas/vales neotectônicos de solos/saprolitos apontados pela literatura. O padrão desarmônico e sem indicação de vergência corrobora essa conclusão em contraponto à eventual presença de dobras.

Os resultados que são apresentados em planta, com a avaliação de orientação de tipos de fundações (rasas ou profundas), a diferentes profundidades (até 6 metros) e considerando a profundidade do nível d'água, mostram maior tendência de orientação para fundações profundas. A informação da profundidade do impenetrável exhibe valores majoritariamente altos, corroborando com o direcionamento anterior.

As sondagens realizadas no local de estudo e em outros sítios com contextos pedo-geológicos e geomorfológicos semelhantes, indicam que na região os valores da profundidade do impenetrável são anômalos, excedendo os 20 metros na maioria dos pontos. Tal situação atípica é diretamente ligada as regiões de calhas/vales nos solos/saprolitos originados pela reativação das estruturas tectônicas preexistentes.

O contexto da própria evolução morfoestrutural, aliada a pedogênese, propiciaram solos e saprolitos espessos na região de estudo. A neotectônica contribuiu quali-quantitativamente, com profusão de falhas com pequeno deslocamento e locais com falhas com rejeitos maiores.

Portanto, as anomalias de valores de profundidade do impenetrável e N_{SPT} baixos em profundidades distintas, são atribuídas as características naturais do maciço e dos materiais exógenos. Analisando de maneira crítica, tal entendimento contrapõe a hipótese formulada inicialmente de que o maciço seria afetado geotecnicamente pelo chorume, o que não deixa de ser um resultado satisfatório, uma vez que trouxe luz a uma situação negativa e refutou a suposição original.

Além do mais, é positivo a conclusão da pesquisa com o reconhecimento das limitações e potencialidades que o estudo apresentou, sem deixar de possibilitar um resultado com as devidas contribuições para o avanço do conhecimento na área.

A comparação entre o dado de SPT/geologia e a eletrorresistividade não mostrou interdependência significativa, não sendo satisfatório provavelmente em função da presença do contaminante no maciço, da textura/conteúdo de argila dos solos, natureza do material parental e compactação do substrato.

Ainda que o chorume não tenha alterado as características geotécnicas dos maciços saprolíticos e regolíticos, tem-se o entendimento da possibilidade da sua influência nas futuras fundações profundas de edificações de maior porte eventualmente instaladas na região.

Ademais, as complexidades geotécnicas decorrentes da considerável heterogeneidade do aterro se apresentam como desafios de projetos, especialmente em relação à estabilidade do solo quando sujeito às cargas associadas a médias e grandes construções.

Estas incertezas poderiam dificultar a realização de empreendimentos de médio porte, não apenas por razões técnicas, mas também devido a implicações financeiras e legais relacionadas à propriedade da terra. Portanto, é recomendado o abandono total ou estudo de alternativas de projetos em substituição à avaliada, como o emprego de edificações menores ou até com destinação de outro uso para a área, que não a de ocupação para moradia da população de baixa renda.

Diante de todas as discussões apresentadas, a seguir são elencados alguns direcionamentos e sugestões para estudos futuros na região, tanto para as áreas de conhecimento das geociências, como para as da engenharia civil:

- Estudos geotécnicos comparativos entre meios similares (mesmo contexto pedo-geológico/geomorfológico e em locais não contaminados), com grande volume de dados, a fim de se preceder a uma avaliação estatística. Fazer outras comparações, variando os tipos de solos, grau de compactação do solo (região antropizada, região de uso agropecuário, região natural e outras regiões com presença de aterro) etc.;
- Análises geotécnicas comparativas entre meios distintos, com diferentes contextos tectônicos, pedológicos, litológicos, geomorfológicos e climáticos. É válido o comparativo com locais contaminados e não contaminados por disposição de resíduos sólidos;
- Pesquisas específicas para os tipos de fundações mais aplicáveis para ambientes contaminados e com presença de aterro;
- Investigação dos tipos de fundações mais aplicáveis para a região adjacente ao Lixão da Estrutural;
- Estudo do projeto mais adequado para eventuais fundações rasas sobre o maciço de lixo, uma vez que o diagnóstico da SEMA (2021) sugere a instalação de uma usina fotovoltaica, após o encerramento das atividades da URE;
- Confecção de zoneamento de iso-profundidades de índices SPT até o impenetrável, fazendo a avaliação comparativa com outros métodos de interpolação. A inclusão e realização de mais pontos de sondagem SPT na região, a fim de melhorar a interpolação com uma boa distribuição de rede de pontos, seria de grande contribuição e eficiência;
- Modelagem tectono-estrutural 3D ou modelagem numérica dos maciços;
- Confecção de modelo numérico/3D de acordo com o índice N_{SPT} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F. 2001. Estudo e avaliação da contaminação das fontes do Parque Nacional de Brasília. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 123p.
- ALLESSI, C.C. 2011. Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄, Rn e microbiota em um campo petrolífero do recôncavo baiano (BA). Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 218p.
- ALVARES C.A., STAPE J.L., SENTELHAS P.C., GONÇALVES J.L.M.; SPAROVEK G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, C., AGUIAR, M., JUNIOR, L., & SILVA, A. 2018. Especificações e Procedimentos de Sondagem à Percussão de Simples Reconhecimento - SPT. Belo Horizonte-MG.
- ARAÚJO, R.N.G. 1996. Estudos geoquímicos da contaminação dos recursos hídricos e sua propagação nas adjacências do aterro de resíduos sólidos Jockey-Club - DF. Dissertação de Mestrado. 74p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 1996. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2001. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2020. NBR 6484: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- CAMPOS, J. E. G. 2007. Análise e delimitação da pluma de contaminação do Aterro do Jockey, Região da Vila Estrutural - DF. 11.
- CAMPOS, J. E. G.; FREITAS E SILVA, F. H.; SOUZA BIAS, E. 2001. Geologia, Hidrogeologia, Solos e Geomorfologia. In: “Olhares sobre o Lago Paranoá”. Semarh/DF.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A., FREITAS-SILVA, F.H., MARTINS-FERREIRA, M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. Brazilian Journal of Geology. 43. 461-476. 10.5327/Z2317-48892013000300004.
- CAMPOS, J.E.G.; XAVIER, T.O.; FREITAS-SILVA, F.H. 2016. Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal. Geociências, São Paulo, 35(2):203-219.
- CARNEIRO, G.A. 2002. Estudo da contaminação do lençol freático sob área do aterro de lixo do Jockey Club - DF e suas adjacências. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade de Brasília. 123p.
- CAVALCANTI, M.M. 2013. Monitoramento geoeletrico da pluma de contaminação gerada pelo Lixão da Estrutural. Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 128p.
- CHOUDHURY, M., JYETHI, D. S., DUTTA, J., PURKAYASTHA, S. P., DEB, D., DAS, R., ROY, G., SEN, T., BHATTACHARYYA, K. G. 2021. Investigation of groundwater and soil quality near to a municipal waste disposal site in Silchar, Assam, India. International Journal of Energy and Water Resources. 10.1007/s42108-021-00117-5.
- CIDADES INTELIGENTES. 2022. O que foi o Lixão da Estrutural? O maior lixão da América Latina. 2018. Disponível em: <http://ci.eco.br/o-que-foi-o-lixao-da-estrutural-o-maior-lixao-da-america-latina/>. Acesso em: 17 fev.

- CPRM. 2014. Atlas Pluviométrico do Brasil. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publique///Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>
- DEL REY, G.O. 2020. Metanogênese e variações isotópicas do carbono em ambiente de deposição de resíduos sólidos: o aterro controlado do Jockey Club de Brasília - DF. 93 f., il. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1978. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Boletim Técnico, n° 53, Rio de Janeiro: SNLCS. 455 p.
- EMBRAPA. 2018. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 5ª Ed. Revista e Ampliada. Brasília, Embrapa. 374p.
- EMEKA, O.I., OKAGU, T.T., OKONKWO, V.O., EZEAGU, A.C. 2019. Effect of municipal solid waste leachate on the Geotechnical properties of soil. 8. 40-52.
- FERNANDES, T.T. 2014. Krigagem indicativa para elaboração de mapas probabilísticos em agricultura de precisão. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Botucatu.
- FOSSON, H. 2012. Geologia Estrutural. São Paulo: Oficina de Textos. 584p. ISBN:857975058X.
- FRANCO, H.A. 1996. Geofísica e química aquática aplicados ao estudo da contaminação de recursos hídricos subterrâneos no aterro do Jockey Club, Brasília - DF. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 96p.
- FREITAS-SILVA F.H., CAMPOS J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/ SEMATEC/UnB. Vol. 1, Parte I. 86p.
- GALKO, G. 2015. The influence of infiltration of leachate from landfills on the changes of chemical parameters of the soil. Journal of Ecological Engineering. 16. 198-205. 10.12911/22998993/59374.
- GANGATHULASI, J., PARAKALLA, N., HETTIARACHCHI, H., BOGNER, J., LAGIER, T. 2009. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA. 27. 578-87. 10.1177/0734242X09103825.
- GDF. ZEE-DF 2010. Subproduto 3.1. "Relatório do Meio Físico e Biótico". Brasília/DF.
- GONÇALVES, J.T.D., BOTELHO, M.A.B., MACHADO, S.L., NETTO, L.G. 2021. Correlation between field electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts at tropical soils in Brazil. Environmental Challenges. 5. 100220. 10.1016/j.envc.2021.100220.
- INPE. 2004. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília, EMBRAPA. ISBN: 85-7383-260-6. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>. Acesso em: 15 abril 2022.
- ISLAM, I., AHMED, W., RASHID, M. U., ORAKZAI, A. U., DITTA, A. 2020. Geophysical and geotechnical characterization of shallow subsurface soil: a case study of University of Peshawar and surrounding areas. Arabian Journal of Geosciences, vol. 13, no. 18, 949. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05947-x>
- KJELDSEN, P., BARLAZ, M.A., ROOKER, A.P., BAUN, A., LEDIN, A., CHRISTENSEN, T.H. 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. In Critical Reviews in Environmental Science and Technology 32(4):297-336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- LADEIRA NETO, J.F. 2010. Mapa de declividade em percentual do relevo brasileiro. Rio de

- Janeiro: CPRM. Disponível em: < <https://www.sgb.gov.br/publicue/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html> >.
- LANDIM, P.M.B. 2000. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03.
- LANDIM, P.M.B; STURARO, J.R. 2002. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatemática, Texto Didático 6, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro.
- MACHADO, M.E.J. 2019. Catadores ainda tentam se firmar após fechamento do lixão da Estrutural. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2019/01/20/interna_cidadesdf,731621/catadores-tentam-se-firmar-apos-fechamento-do-lixao-da-estrutura.shtml. Acesso em: 10 fev. 2022.
- MARQUES, M. 2018a. Lixão da Estrutural é fechado e rejeitos passam a ser descartados em aterro. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/lixao-da-estrutural-e-fechado-e-rejeitos-passam-a-ser-descartados-em-aterro.ghtml>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- MARQUES, M. 2018b. Lixão da Estrutural: Um retrato do maior depósito de lixo da América Latina. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/lixao-da-estrutural-um-retrato-do-maior-deposito-de-lixo-da-america-latina.ghtml>. Acesso em: 18 fev. 2022
- MARTINS, E.S. 2000. Petrografia, mineralogia e geomorfologia de rególitos lateríticos no Distrito Federal, Brasília. 228f. Tese, (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- MARTINS, E.S.; REATTO, A.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F. 2004. Evolução geomorfológica do Distrito Federal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 57 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 122).
- MOHAMMED, M. A., SENSOY, M. M., ABUDEIF, A. M. 2019. Derivation of empirical relationships between geotechnical parameters and resistivity using electrical resistivity tomography (ERT) and borehole data at Sohag University site, Upper Egypt. Journal of African Earth Sciences. 158. 103563. 10.1016/j.jafrearsci.2019.103563.
- NTA, S., AYOTAMUNO, J., UDOM, I. 2021. Effect-of-Landfill-Leachate-on-Engineering-Properties-of-Test-Soil. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geological and Environmental Engineering 15(2):87-91.
- NTA, S., ODIONG, I. 2017. Impact of Municipal Solid Waste Landfill Leachate on Soil Properties in the Dumpsite (A Case Study of Eket Local Government Area of Akwa Ibom State, Nigeria). International Journal of Scientific Engineering and Science. 1. 5-7.
- PESCIM, E. E.; URBANO, M. R.; DEMÉTRIO, C.G.B. 2010. Estimação da densidade do solo em uma região da Amazônia para o cálculo de estoques de carbono do solo. 19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística – SINAPE. São Pedro/SP. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/resumo%20estendido_geo.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.
- REBELLO, Y.C.P. 2011. Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento. 3. ed. São Paulo: Ed. Zigrate. 239 p. ISBN 978-85-85570-10-1
- REDDY, K.R., HETTIARACHCHI, H., GIRI, R.K., GANGATHULASI, J. 2015. Effects of Degradation on Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from Orchard Hills Landfill, USA. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 1. 10.1007/s40891-015-0026-2.
- SCHNAID, F., ODEBRECHT, E. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

- SEMA DF. 2021. Diagnóstico de Contaminação e proposta de remediação do Antigo Lixão da Estrutural. Brasília. Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal. 487 p.
- SERAINÉ, M., CAMPOS, J.E.G., MARTINS-FERREIRA, M.A.C., GIORGIONI, M., ANGELO, T.V. 2020. Tectonic significance of abrupt immature sedimentation in a shallow cratonic margin basin: The Arkose Level, Mesoproterozoic Paranoá Group. *JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102397>.
- SILVA, J. D. (2006). Estudo da Colapsibilidade da Argila Porosa de Brasília pelo Fluxo de Contaminantes. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-146/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p.
- SOARES, W.C. 2011. Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens a percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa/PB. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. 215 p.
- TAN, S.N.M.A., TONNIZAM, M.E., SAAD, R., DAN, M.F. M., NORDIANA, M.M., HAZREEK, Z.A.M., MADUN, A. 2018. Correlation of Resistivity Value with Geotechnical N-Value of Sedimentary Area in Nusajaya, Johor, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*. 995. 012079. 10.1088/1742-6596/995/1/012079.
- THIESEN, S. 2016. Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: Um estudo de caso em Blumenau/SC. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- WORLD BANK GROUP. 2007. Environmental, Health, and Safety General Guidelines. 99p.
- XAVIER, T.O. 2010. Registros neotectônicos no Distrito Federal: implicações para o condicionamento dos recursos hídricos subterrâneos. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas), Universidade de Brasília, Brasília.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Logs de 156 Sondagens do Tipo SPT da CODHAB/GDF

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1LWK38BkHHgnKYhsY29CwIIQwL7WodOE8/view?usp=sharing>

APÊNDICE 2 - Logs de Sondagens SPT realizadas por este trabalho

Link:

https://drive.google.com/file/d/1WnZW28mj73sRvVrRhI_TcSHhySQWcU3O/view?usp=sharing

APÊNDICE 3 - Logs de Sondagens SPT de outras fontes (Dados Secundários)

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1bxHITGccDfpgwK5OmRkOHRq2QtPM0g4D/view?usp=sharing>