

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS USP
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS: UM ESTUDO DE CASO COMPARATIVO ENTRE
ENSAIOS CPTU E SPT EM RESENDE-RJ**

Aluno: Gustavo Domingues da Veiga Vieira

Orientador: Professor Doutor Edilson Pizzato

Coorientador: Gabriel F. R. Maciel Bastos

São Paulo

2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Investigações geotécnicas: um estudo de caso comparativo entre os ensaios CPTu e
SPT em Resende-RJ**

GUSTAVO DOMINGUES DA VEIGA VIEIRA

Trabalho Final apresentado à Comissão de
Trabalho Final (CTF), como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato
Coorientador: Gabriel F. R. Maciel Bastos

SÃO PAULO

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada, Giovana Fernandes, e a minha família que estiveram ao meu lado, do início ao fim dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem Ele, nada do que foi feito se faria, és a minha Rocha e Fortaleza, Pai, Amigo, Senhor, Redentor e Salvador . À minha amada, que permaneceu ao meu lado nos bons e maus momentos, é a pessoa mais importante da minha vida. Aos meus pais, irmãos, sogros e cunhada que são a minha família. Aos amigos, familiares e igrejas, que me aconselharam, me ajudaram, torceram e oraram por mim. Aos professores e mestres que me guiaram, ensinaram e inspiraram.

Agradeço a Conteste Engenharia por todo apoio, ao Prof. Dr. Edilson Pizzato, por sua orientação e ao Gabriel Bastos, por toda ajuda e amizade.

“Portanto, quem ouve estas minhas palavras e as pratica é como um homem prudente que construiu a sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram contra aquela casa, e ela não caiu, porque tinha seus alicerces na rocha.” Mateus 7:24-25.

RESUMO

Este estudo realiza uma análise comparativa entre os métodos *Cone Penetration Test with pore pressure measurement* (CPTu) e *Standard Penetration Test* (SPT) na investigação de solos em duas áreas distintas de uma campanha de investigação geotécnica em Resende-RJ. Os resultados obtidos indicam que o SPT, embora seja economicamente mais viável e cumpra os requisitos normativos, apresenta limitações de padronização e confiabilidade, especialmente em solos com baixos valores de SPT(N). O CPTu, apesar de seu custo mais elevado, proporciona parâmetros adicionais, como ensaio de dissipação e medições de poropressão. Ambos os métodos indicaram um perfil de solos semelhante. No entanto, o CPTu se mostrou mais preciso, permitindo a identificação de um número maior de camadas devido às suas medições contínuas, enquanto o SPT fornece informações pontuais a cada metro de investigação. Esse trabalho contribui para a escolha criteriosa do método mais adequado, considerando custo, padronização e precisão na caracterização geotécnica do solo.

Palavras-chave: Caracterização de solos; SPT e CPTu; Geotecnia aplicada; Rift Continental do Sudeste do Brasil

ABSTRACT

This study conducts a comparative analysis between the Cone Penetration Test with pore pressure measurement (CPTu) and the Standard Penetration Test (SPT) in soil investigation across two distinct areas of a geotechnical investigation campaign in Resende-RJ, Brazil. The results indicate that while the SPT is more economically feasible and meets regulatory requirements, it presents standardization and reliability limitations, especially in soils with low NSPT values. The CPTu, despite its higher cost, provides additional parameters, such as dissipation tests and pore pressure measurements. Both methods indicated a similar soil profile. However, the CPTu proved to be more precise, allowing the identification of a greater number of layers due to its continuous measurements, while the SPT provides point data at each meter of investigation. This work contributes to a careful selection of the most suitable method, considering cost, standardization, and precision in geotechnical soil characterization.

Keywords: Soil characterization; SPT and CPTu; Applied geotechnics; Continental Rift of Southeastern Brazil

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. METAS E OBJETIVOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 A Bacia Sedimentar de Resende.....	12
3.1.2 Revisão Estratigráfica.....	15
3.1.2.1 Formação Ribeirão dos Quatis.....	15
3.1.2.2 Formação Resende.....	16
3.1.2.2.1 Membro Itatiaia e Membro Acácias.....	16
3.1.2.3 Formação Floriano.....	16
3.1.2.4 Depósitos quartenários.....	17
3.2 CPT e CPTu- Ensaio de Cone.....	18
3.2.1 Resistência de ponta (qc).....	20
3.2.2 Atrito Lateral (fs).....	20
3.2.3 Poropressão (u).....	20
3.2.4 Correções de resistência de ponta (qt).....	21
3.2.5 Interpretações dos resultados de CPT e CPTu.....	21
3.2.5.1 Normalização.....	22
3.2.5.2 Resultados Dos Testes De Dissipação.....	23
3.2.5.2.1 Estimativas de permeabilidade baseadas no teste de dissipação.....	24
3.3 SPT- Sondagem À Percussão.....	24
3.3.1 NBR 6484 de 2020.....	25
3.3.2 Classificação dos solos.....	26
3.4 Comparação Entre Ensaio SPT E CPTu.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1 Ensaio SPT.....	30
4.2 Ensaio CPTu.....	33
5. RESULTADOS.....	35
5.1 SPT.....	35
5.1.1 SPT-02.....	35
5.1.2 SPT-05.....	36
5.2 CPTu.....	36
5.2.1 CPTu-02.....	36
5.2.2 CPTu-05.....	39
5.3 Perfis de solos transportados.....	43
6. DISCUSSÃO.....	45
6.2 Comparação entre o CPTu e SPT.....	46
6.2.1 Ensaio de Dissipação.....	47
6.2.2 Quando utilizar o SPT ou o CPTu.....	48
7. CONCLUSÕES.....	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa geológico da bacia de Resende e sua respectiva Carta Estratigráfica de Ramos (2003), retirado de Aguiar (2016).....	13
Figura 2- Registro das principais revisões estratigráficas da Bacia de Resende. Retirado de Aguiar (2016), adaptado de Ramos et al. (2006).....	14
Figura 3- Carta estratigráfica da Bacia de Resende. Retirada de Ramos et al. (2006).	15
Figura 4- Exemplo de Apresentação dos Resultados de Gráfico de um Teste Convencional de Penetração de Piezocone. Retirada da ASTM D5778 (2012).....	19
Figura 5- Ábaco de classificação dos solos. Retirado de Robertson, Campanella & Wightman (1983)- adaptado.....	20
Figura 6- Carta de interpretação do ensaio CPT (adaptado por Souza, 2017 de Robertson, 2010).....	22
Figura 7- Martelo padronizado para cravação do amostrador, na Ilha 02.....	32
Figura 8- Amostras coletadas através do ensaio SPT, nas ilhas 02 e 05.....	33
Figura 9- Ensaio CPTu em execução na Ilha-05.....	33
Figura 10- Perfil individual de sondagem à percussão (SP-02).....	35
Figura 11- Perfil individual de sondagem à percussão (SP-05).....	36
Figura 12- SBT e Bq normalizados, pontos plotados, CPTu-02.....	37
Figura 13- Resistência de cone, razão de atrito, razão de poropressão e índice SBT, normalizados, CPTu-02.....	37
Figura 14- Linha hidrostática no gráfico de poropressão, CPTu-02.....	38
Figura 15 -Ensaio de dissipação, CPTu-02.....	39
Figura 16- SBT e Bq normalizados, pontos plotados, CPTu-05.....	40
Figura 17- Resistência de cone, razão de atrito, razão de poropressão e índice SBT, normalizados, CPTu-05.....	40
Figura 18- Linha hidrostática no gráfico de poropressão, CPTu-05.....	41
Figura 19- Ensaio de dissipação em 6,72m, CPTu-05.....	42
Figura 20- Ensaio de dissipação em 8,74m, CPTu-05.....	42
Figura 21- Perfil de solos, SPT x CPTu, ilha 02.....	43
Figura 22- Perfil de solos, SPT x CPTu, ilha 05.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Tabela da compacidade e consistência do solo a partir de ensaio SPT. Retirado de NBR 6484 de 2020.....	25
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados do ensaio de dissipação, CPTu-02.....	38
Tabela 2- Resultados do ensaio de dissipação, CPTu-05.....	41

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM- *American Society for Testing and Materials*

AT- Aterro

Bq- Coeficiente de poropressão

Bqn- Razão de poropressão normalizada

Ch- coeficiente de consolidação na direção horizontal

CPT- *Cone Penetration Test* (ensaio de piezocone)

CPTu- *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (ensaio de piezocone com medida de poropressão);

DMT- Dilatômetro de Marchetti

Dr- Densidade relativa;

Fr- Razão de atrito normalizada;

fs- Atrito lateral;

G: Módulo de cisalhamento

G/Su: razão de rigidez;

Ic- Índice de comportamento do solo;

IP- Índice de plasticidade;

kh- condutividade hidráulica horizontal;

M- rigidez média;

qc- Resistência de ponta;

qt- Resistência de ponta corrigida;

Qtn- Resistência de ponta normalizada;

Rf- Razão de atrito;

SPT(N)- número de golpes de SPT;

SPT- *Standard Penetration Test*;

SBT- *Soil Behavior Type* (comportamento do solo);

SBTn- Comportamento do solo normalizado;

SO- Solo orgânico

Su: Resistência não drenada

SRJ- Solo residual jovem

SRJ- Solo residual maduro

STA- Solo transportado aluvionar

u- Pressões neutras;

u_2 - Poropressão medida na base do cone

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, a análise de solos desempenha papel fundamental na concepção, planejamento e execução de projetos de infraestrutura. A compreensão das características geotécnicas do solo é essencial para garantir a estabilidade e a segurança de estruturas como edifícios, pontes, estradas e barragens. Nesse contexto, os métodos de investigação geotécnica, como o *Cone Penetration Test with pore-pressure measurement* (CPTu) e o *Standard Penetration Test* (SPT), são responsáveis pela obtenção de informações sobre as propriedades do solo.

De acordo com Costa et al. (2022), o SPT é um método de investigação geotécnica amplamente utilizado no Brasil e em todo o mundo. Os resultados do SPT são fundamentais para a classificação do subsolo, determinação da consistência e compacidade dos solos, além de fornecer estimativas de parâmetros geotécnicos, como capacidade de carga e densidade relativa. Já os ensaios de cone, realizam medições da resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s), sendo que o piezocone, além de medir q_c e f_s eletricamente, permite a monitoração contínua das pressões neutras (u) durante o processo de cravação (Schnaid & Odebrecht, 2000). Neste contexto, o presente trabalho de formatura propõe uma comparação entre os métodos CPTu e SPT na análise de solos, utilizando um estudo de caso como base para a investigação.

A comparação entre os métodos é essencial devido à importância destes ensaios em projetos de engenharia civil e obras de infraestrutura como rodovias e ferrovias. A análise de solos desempenha um papel crucial na segurança e no desempenho das estruturas, influenciando diretamente o projeto e a construção de edificações. Ambos os métodos são utilizados na prática da geotecnia, entretanto podem fornecer resultados distintos devido a limitações tecnológicas e de execução. Compreender as peculiaridades de cada método pode auxiliar na tomada de decisões em projetos futuros, contribuindo para a otimização de recursos, redução de custos e aumento da segurança e confiabilidade, beneficiando tanto os profissionais da área como a sociedade como um todo.

2. METAS E OBJETIVOS

O presente trabalho de formatura busca comparar os resultados obtidos pelos ensaios CPTU e SPT na análise de perfis de solos em uma campanha de investigação geotécnica realizada em Resende-RJ avaliando suas respectivas vantagens e limitações. Serão comparados parâmetros como:

- Resistência do solo
- Comportamento geotécnico do solo
- Confiabilidade dos dados
- Custo dos ensaios

As metas incluem:

- Levantamento bibliográfico
- Execução dos ensaios SPT e CPTu
- Análise dos resultados dos testes
- Comparação dos dados obtidos
- Identificação das eventuais discrepâncias entre os resultados
- Discussão das possíveis razões para as diferenças
- Elaboração de perfis de solo para correlacionar informações litológicas com parâmetros físicos do solo visando a comparação dos métodos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Bacia Sedimentar de Resende

Segundo Riccomini (1989), a Bacia Sedimentar de Resende (figura 1) está localizada no segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil, no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro. Compreende os municípios de Barra Mansa, Quatis, Porto Real, Resende e Itatiaia, estendendo-se por 47 km no sentido ENE-WSW com um eixo na direção N75E. A largura média da bacia é de 4,5 km, variando de 1,2 km a oeste de Itatiaia até 7,3 km a oeste de Resende, abrangendo uma área de afloramento de rochas sedimentares terciárias e sedimentos quaternários de cerca de 240 km². Estudos gravimétricos de Escobar (1999) indicam que a espessura do pacote sedimentar pode atingir até 550 metros.

De acordo com Riccomini (1989), os sedimentos da Bacia de Resende foram inicialmente referidos por Pissis em 1842 e, posteriormente, Branner, em 1919, apresentou o primeiro esboço geológico da região. A designação "Formação Resende" foi formalmente adotada por Amador (1975) na estratificação da bacia. Estudos de Riccomini, (1989); Melo et al., (1985), propõem uma revisão da estratigrafia dos sedimentos cenozóicos das bacias de Volta Redonda e Resende, fundamentados em análises estratigráficas, geomorfológicas, estruturais, tectônicas, além de sedimentológicas, mineralógicas, paleontológicas e geocronológicas. Essa revisão considerou a importância da tectônica na evolução das bacias, ao contrário das abordagens anteriores que se baseavam principalmente em geomorfologia. Assim, a denominação Formação Resende foi mantida para os sedimentos da bacia homônima e estendida à bacia de Volta Redonda, abandonando as designações formais anteriores. A seguir, apresenta-se a evolução da nomenclatura estratigráfica com base nas principais revisões realizadas pelos autores ao longo dos anos (figura 2).

A pilha sedimentar da Bacia de Resende é composta por duas principais formações: a Formação Resende e a Formação Floriano, conforme subdividido por Amador (1975). A Formação Resende, unidade inferior, é caracterizada por uma sequência de corpos tabulares predominantemente arenosos, com coloração que varia do branco ao cinza, e secundariamente silto-argilosas de coloração verde-oliva. Estes depósitos estão associados a um sistema fluvial entrelaçado, com leques aluviais limitados ao flanco sul do maciço de Itatiaia (Amador, 1975).

A Formação Floriano, unidade superior, é descrita por Amador (1975) como uma sucessão de camadas arenosas e argilosas de coloração variegada. Esses depósitos estão relacionados a cones aluviais coalescentes parcialmente retrabalhados por canais fluviais, predominando os processos de corridas de lama, e secundariamente, processos fluviais.

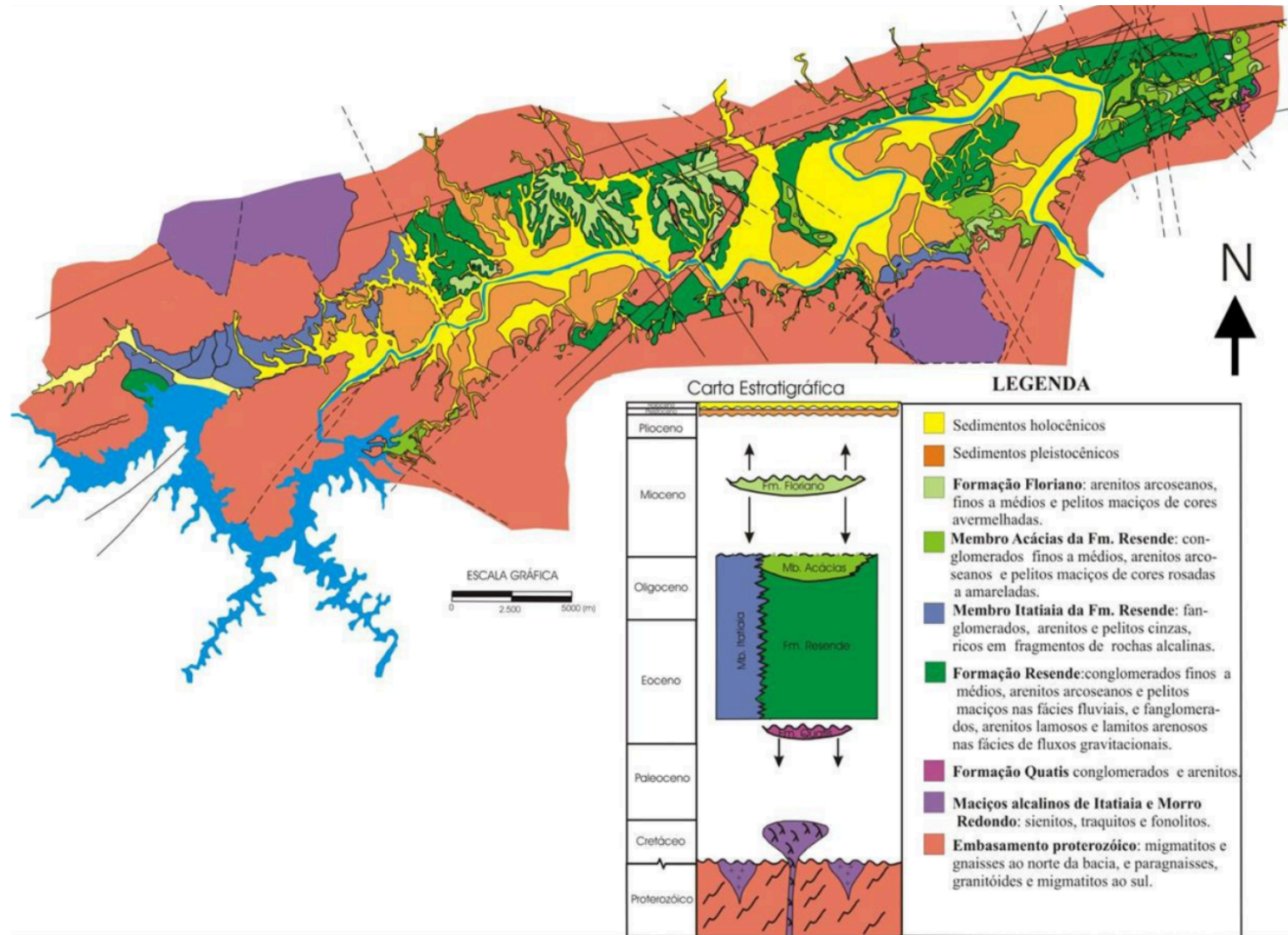


Figura 1- Mapa geológico da bacia de Resende e sua respectiva Carta Estratigráfica de Ramos (2003), retirado de Aguiar (2016).

A revisão estratigráfica realizada por Melo et al. (1983, 1985) manteve a designação Formação Resende, sugerindo que os depósitos atribuídos à Formação Floriano seriam produtos da alteração dos depósitos superficiais da Formação Resende. Essa proposta manteve a subdivisão de Amador (1975) para a Formação Resende em uma porção rudácea, formada por depósitos de leques aluviais, e outra porção com sucessões depositadas em um sistema fluvial entrelaçado.

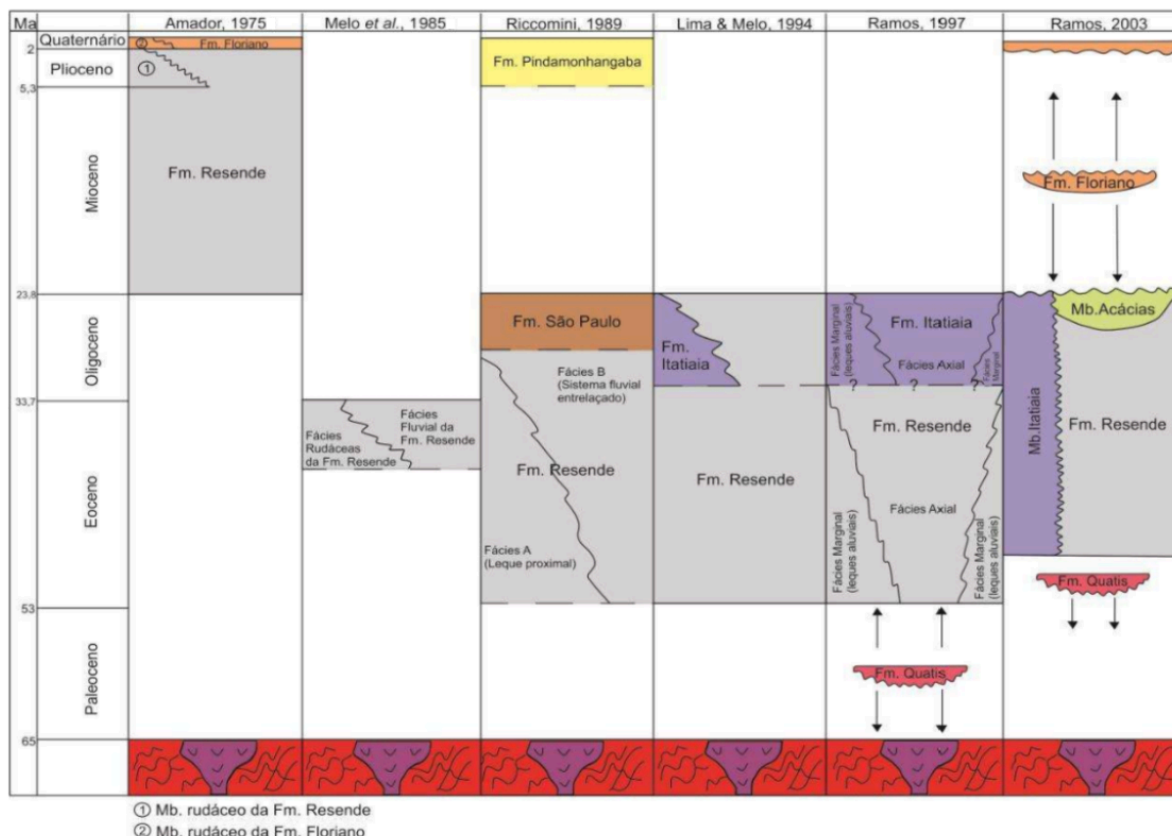


Figura 2- Registro das principais revisões estratigráficas da Bacia de Resende. Retirado de Aguiar (2016), adaptado de Ramos et al. (2006).

Riccomini (1989) revisou novamente a estratigrafia do Rift Continental do Sudeste do Brasil e formalizou o Grupo Taubaté, que inclui as formações Resende, Tremembé e São Paulo, além das rochas vulcânicas ultrabásicas alcalinas da Bacia de Volta Redonda. Especificamente na Bacia de Resende, Riccomini reconheceu depósitos de um sistema fluvial meandrante, associando-os à Formação São Paulo. A figura 3, apresenta a carta estratigráfica da Bacia de Resende, que contém as principais formações descritas por Riccomini (1989), Amador (1975), e as revisões de Ramos et al. (2006).

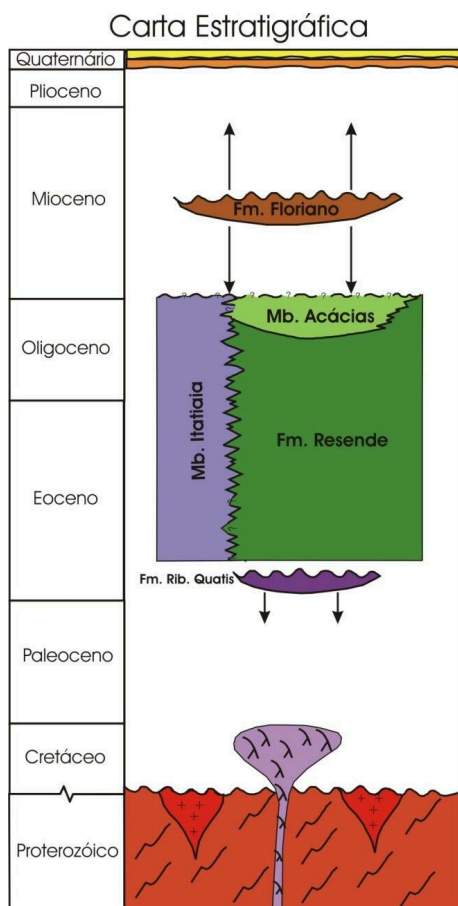


Figura 3- Carta estratigráfica da Bacia de Resende. Retirada de Ramos et al. (2006).

3.1.2 Revisão Estratigráfica

Ramos et al. (2006) revisaram a estratigrafia dos depósitos aluviais terciários na Bacia de Resende. A Formação Ribeirão dos Quatis é a unidade cenozóica mais antiga, representando um sistema fluvial entrelaçado sobre um embasamento arrasado. A Formação Resende, que contém a maioria dos depósitos paleogênicos, é caracterizada por leques aluviais e lamitos. A formação é dividida em Membro Itatiaia e Membro Acácias, refletindo ambientes de deposição fluvial. A Formação Floriano é composta por arenitos e pelitos de um sistema fluvial meandrante.

3.1.2.1 Formação Ribeirão dos Quatis

A Formação Ribeirão dos Quatis, proposta por Ramos (2003), representa a unidade cenozóica mais antiga da Bacia de Resende, com uma espessura estimada entre 25 e 30 metros, localizada em sua seção-tipo ao longo da Ferrovia do Aço, no município de Quatis. Esta formação é essencial para compreender a sedimentação em ambientes fluviais de tipo entrelaçado, ocorrendo sobre um embasamento arrasado e apresentando inconformidade com o substrato proterozóico. A identificação da Formação Ribeirão dos Quatis como parte

do registro geológico local destaca a sua importância na reativação das falhas do sistema ENE-WSW, que moldaram o hemigráben no início do Eoceno.

3.1.2.2 Formação Resende

A Formação Resende, conforme reconhecida por Amador (1975), é a unidade mais extensa da bacia e abrange depósitos paleogênicos. Seu ambiente deposicional inclui leques aluviais e depósitos fluviais, e reflete a dinâmica sedimentar complexa da região. A proposta de subdividir esta formação em dois membros distintos, Membro Itatiaia e Membro Acácias, é um avanço significativo na estratigrafia local. O Membro Itatiaia, associado a sedimentos fluviais ricos em detritos de rochas alcalinas, destaca a influência dos maciços adjacentes na composição dos sedimentos, enquanto o Membro Acácias, caracterizado por depósitos fluviais, sugere uma transição entre os ambientes sedimentares da formação e a deposição de sedimentos mais recentes.

3.1.2.2.1 Membro Itatiaia e Membro Acácias

A formalização do Membro Itatiaia, que apresenta características composicionais distintas dos depósitos fluviais convencionais, representa um aporte importante para a compreensão dos processos deposicionais na bacia. A sua relação gradacional com a Formação Resende *stricto sensu* ilustra a complexidade do sistema sedimentar. O Membro Acácias, por sua vez, com uma espessura de 30 a 40 metros, indica uma fase de sedimentação fluvial que se tornou preponderante em um contexto tectônico que permitiu a formação de uma planície fluvial, longe dos efeitos de fluxos gravitacionais. A base desses ciclos é formada por conglomerados finos e maciços, com presença de intraclastos pelíticos, frequentemente dispostos como lentes ou acúmulos irregulares que originam brechas intraformacionais. Sobre estas camadas, há arenitos arcoseanos médios a grossos com estruturas acanaladas de médio porte, que constituem a litofácies predominante nesta associação. No topo dos ciclos, encontram-se camadas pelíticas de geometria lenticular a tabular, variando de centimétricas a métricas, com cores que vão do esverdeado ao avermelhado. Segundo Ramos et al. (2006), esse conjunto de características sugere um sistema fluvial com semelhanças ao modelo de rio entrelaçado profundo e perene de leito arenoso, com períodos de alagamento na planície aluvial, conforme descrito por Miall (1985, 1996).

3.1.2.3 Formação Floriano

A Formação Floriano, situada na porção superior da sequência estratigráfica da Bacia de Resende, é constituída, segundo Aguiar (2016), por arenitos arcoseanos com estratificações cruzadas e camadas de lama avermelhadas, que são depositadas em um sistema fluvial meandrante. Ramos (2003), destacou que essa unidade também inclui o Membro Rudáceo, associado aos depósitos de leque aluvial localizados na estrada para o Parque Nacional do Itatiaia. Esses aspectos sugerem que os sedimentos da Formação

Floriano foram moldados por processos de transporte e deposição fluvial, refletindo as condições ambientais da região durante sua formação.

A revisão estratigráfica realizada por Melo et al. (1985) questionou a independência da Formação Floriano, propondo que seus depósitos representariam apenas a porção superficial da Formação Resende, modificada por processos intempéricos ou por variações de fácies em um sistema deposicional unificado. Essa perspectiva foi relevante para compreender a transição entre as diferentes camadas sedimentares e os processos que alteraram sua composição ao longo do tempo.

Ramos et al. (2006), caracterizou a Formação Floriano por suas sucessões de lamitos e arenitos avermelhados com estratificações cruzadas acanaladas, dispostas em geometria lenticular ou sigmoidal. Essa formação foi interpretada como resultado de um sistema fluvial de canal meandrante arenoso, sobreposto aos depósitos da Formação Resende e ao embasamento proterozoico. Dessa forma, a Formação Floriano representa a fase final de colmatação da Bacia de Resende, marcando o encerramento dos processos sedimentares que caracterizaram sua evolução..

3.1.2.4 Depósitos quaternários

Os depósitos quaternários da Bacia de Resende têm grande relevância geológica e são amplamente representados por sedimentos de idade pleistocênica e holocênica. Segundo Aguiar (2016), esses depósitos podem ser encontrados tanto em faixas consolidadas quanto em faixas inconsolidadas, especialmente em áreas de maior erosão. Essas camadas de sedimentos geralmente cobrem todas as unidades litológicas expostas, destacando-se por camadas coluvionares de material recente que revestem o terreno. Os sedimentos são compostos principalmente de fragmentos quartzosos e feldspáticos, com granulometrias que variam de grânulos a calhaus, sendo comuns os seixos bem arredondados. Quando consolidados, esses fragmentos formam um arcabouço em uma matriz arenosa igualmente arredondada. As estruturas sedimentares observadas incluem estratificações horizontais e imbricação de clastos, conforme detalhado por Aguiar (2016). Essas características sugerem um ambiente de transporte fluvial, onde a ação das drenagens desempenhou um papel crucial na deposição e conformação dos sedimentos.

A predominância de depósitos quaternários na região é indicativa da dinâmica geomorfológica recente, que influenciou profundamente a paisagem da Bacia de Resende. O transporte e a deposição dos sedimentos por drenagens locais, conforme descrito por Aguiar (2016), explicam a forma arredondada dos clastos e a distribuição dos pacotes sedimentares. A atuação desses processos é visível na geomorfologia atual, que reflete uma história de erosão e sedimentação intensa sobre todas as unidades litoestratigráficas.

3.2 CPT e CPTu- Ensaio de Cone

De acordo com Schnaid & Odebrecht (2000), os ensaios de cone, conhecidos como CPT e CPTu, envolvem a penetração vertical de uma ponta cônica no solo a uma velocidade constante de 20 mm/s, com um ângulo de ponta de 60°. A área transversal do cone pode variar de 10 cm² a 15 cm², dependendo do equipamento utilizado. Para padronizar o ensaio de cone e facilitar a comparação de resultados entre diferentes equipamentos, foram estabelecidas normas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), um órgão internacional que desenvolve e publica normas para diversos produtos, sistemas e serviços. As normas são: ASTM D3441 de 2005 e a ASTM D5778 de 2012.

Segundo a ASTM D3441 (2005), este método envolve a penetração lenta e constante de uma haste pontiaguda no solo. O CPT é conhecido por sua aplicabilidade em investigações geotécnicas, auxiliando no projeto e construção de obras civis, fornecendo dados relevantes para a análise de estabilidade de taludes, capacidade de carga de fundações e caracterização do solo. Além do ensaio CPT, a norma também aborda o ensaio *Cone Penetration Test with pore pressure measurement* (CPTu), uma extensão do CPT que inclui a medição da pressão de poros durante a penetração da haste no solo. De acordo com a ASTM D5778 (2012), o CPTu adiciona uma camada adicional de informações ao tradicional CPT, fornecendo dados sobre a permeabilidade do solo e seu comportamento sob diferentes condições de drenagem. Esses dados são essenciais para avaliar a estabilidade de aterros, projetar sistemas de drenagem e entender os processos de adensamento do solo.

Segundo Schnaid & Odebrecht (2000), existem três tipos principais de equipamentos para o ensaio de cone. O cone mecânico, que realiza medições na superfície, transferindo os esforços para cravar a ponta cônica e medir a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s) por meio de hastes mecânicas. O cone elétrico, equipado com células de carga instrumentadas eletricamente, possibilita a medição direta de q_c e f_s na ponta. Por fim, o piezocone, além de medir q_c e f_s eletricamente, permite a monitoração contínua das pressões neutras (u) durante o processo de cravação.

Uma das principais vantagens desse ensaio, conforme destacado por Alves Filho (2010), é o registro contínuo da resistência à penetração, fornecendo uma descrição do perfil do subsolo, o que é essencial para estimativas de custos em projetos de fundações. Além disso, o ensaio elimina qualquer influência do operador nas medições de q_c , f_s e u , como pode ser visto na figura 4, que apresenta um exemplo dos resultados gráficos do ensaio de piezocone.

Segundo Alves Filho (2010), no caso do piezocone, onde as informações do CPT são complementadas com medidas de poropressões, quantifica um novo parâmetro de classificação de solos que é B_q - coeficiente de poropressão.

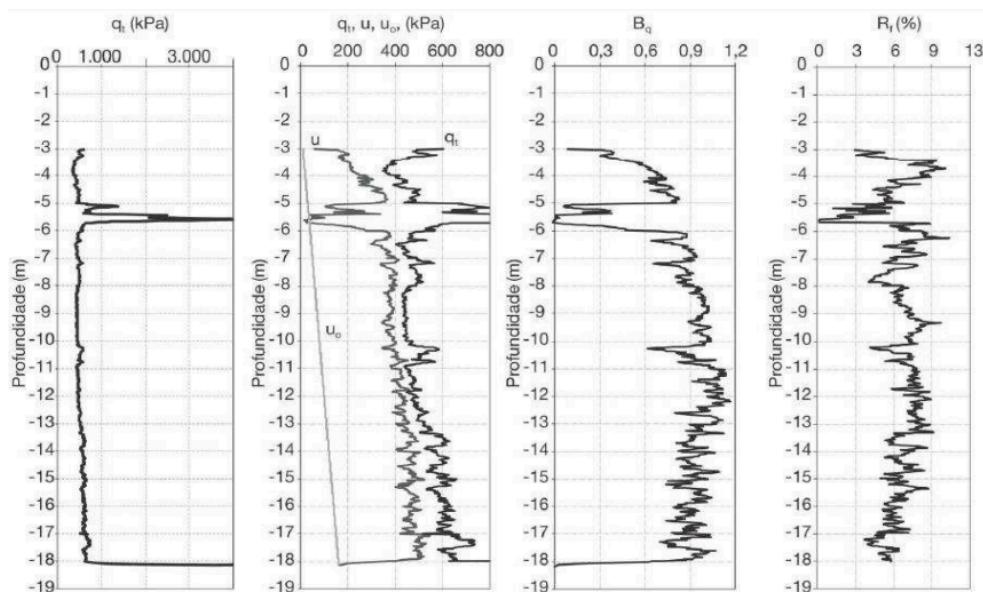


Figura 4- Exemplo de Apresentação dos Resultados de Gráfico de um Teste Convencional de Penetração de Piezocone. Retirada da ASTM D5778 (2012).

A norma brasileira NBR 12069 MB-3.406 de 1991, que regulamentava o ensaio CPT (Cone Penetration Test), foi revogada em 2015 sem ser substituída. Portanto, não está em vigor uma norma brasileira específica para este ensaio. Em consequência, as normas internacionais têm sido amplamente utilizadas para orientar a execução e interpretação dos resultados do ensaio CPT no Brasil. Robertson, Campanella & Wightman (1983) apresentaram um ábaco de classificação de solos com base no parâmetro F_r , razão de atrito normalizada, que é a relação entre a resistência de atrito lateral e a resistência de ponta corrigida, do CPT (figura 5)

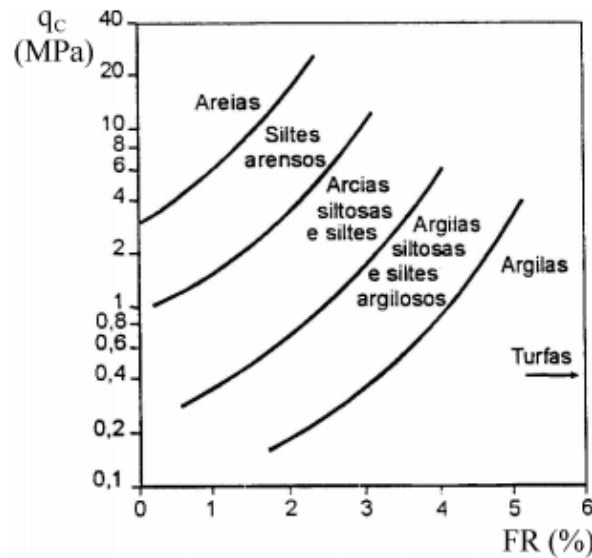


Figura 5- Ábaco de classificação dos solos. Retirado de Robertson, Campanella & Wightman (1983) - adaptado.

3.2.1 Resistência de ponta (q_c)

A resistência de ponta (q_c) é o principal parâmetro obtido no CPTu. Ela representa a resistência do solo à penetração do cone e varia significativamente com o tipo de solo. Em solos arenosos, valores de q_c podem variar entre 10 e 20 MPa, enquanto em solos argilosos, esses valores são muito menores. Solos arenosos normalmente adensados apresentam um aumento contínuo de q_c com a profundidade, devido ao aumento da tensão de confinamento, ao passo que solos sobreadensados podem manter q_c constante (Schmertmann, 1978).

3.2.2 Atrito Lateral (f_s)

O atrito lateral (f_s) representa a resistência ao movimento de cisalhamento entre o solo e a superfície do cone durante a penetração. Este parâmetro é particularmente importante para a caracterização de solos moles, como argilas, que apresentam valores baixos de resistência de ponta e maiores valores de atrito lateral (Robertson, 2010).

Desde sua introdução por Begemann em 1953, a medição do atrito lateral evoluiu, especialmente com o advento dos cones elétricos, que proporcionaram uma medição contínua e precisa (Begemann, 1965). Essa evolução foi crucial para estudos de solos moles, onde as propriedades geotécnicas são mais delicadas e exigem maior precisão nos dados (Lunne et al., 1997).

3.2.3 Poropressão (u)

A medição da poropressão foi um avanço significativo introduzido nos anos 1970 com o desenvolvimento do CPTu. Ela é responsável por ser necessária a correção dos valores de resistência de ponta (q_t) (Robertson et al., 1992).

A posição do filtro de medição da poropressão influencia diretamente nos resultados obtidos, sendo possível colocar o filtro em três posições principais: na ponta do cone (u_1), imediatamente atrás da ponta (u_2) e na camisa de atrito (u_3) (Lunne et al., 1997).

3.2.4 Correções de resistência de ponta (q_t)

Em piezocones, é necessário realizar a correção da resistência de ponta (q_t) para levar em conta a poropressão que atua atrás da ponta do cone, conforme a equação:

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 q_t$$

a é a razão entre a área projetada da ponta do cone e a área total do cone. Este fator varia entre 0,75 e 0,85, dependendo das características do equipamento utilizado (Robertson, Campanella & Wightman (1983)). A aplicação desta correção é crucial para a interpretação correta dos dados obtidos em solos finos e saturados, evitando a subestimativa da resistência ao cisalhamento nessas condições.

3.2.5 Interpretações dos resultados de CPT e CPTu

Segundo Souza (2017), o uso de cartas de interpretação para a classificação de solos com base nos ensaios CPT teve início com a carta proposta por Begemann em 1963, que relacionava a resistência de ponta (q_c) com a resistência lateral (f_s). Schmertmann, em 1969, introduziu um método baseado na resistência de ponta (q_c) e na razão de atrito (R_f) para classificação dos solos com cones elétricos. Com o objetivo de melhorar a precisão da classificação, diversas pesquisas foram realizadas, levando ao desenvolvimento de ábacos para o piezocone, como o proposto por Robertson (2010), que correlaciona a resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) com a razão de atrito normalizada (F_r) (figura 6). Conforme destacado por Mayne (1995), essa abordagem também permite inferir sobre densidade relativa, sensibilidade, índice de vazios e o histórico de tensões do solo.

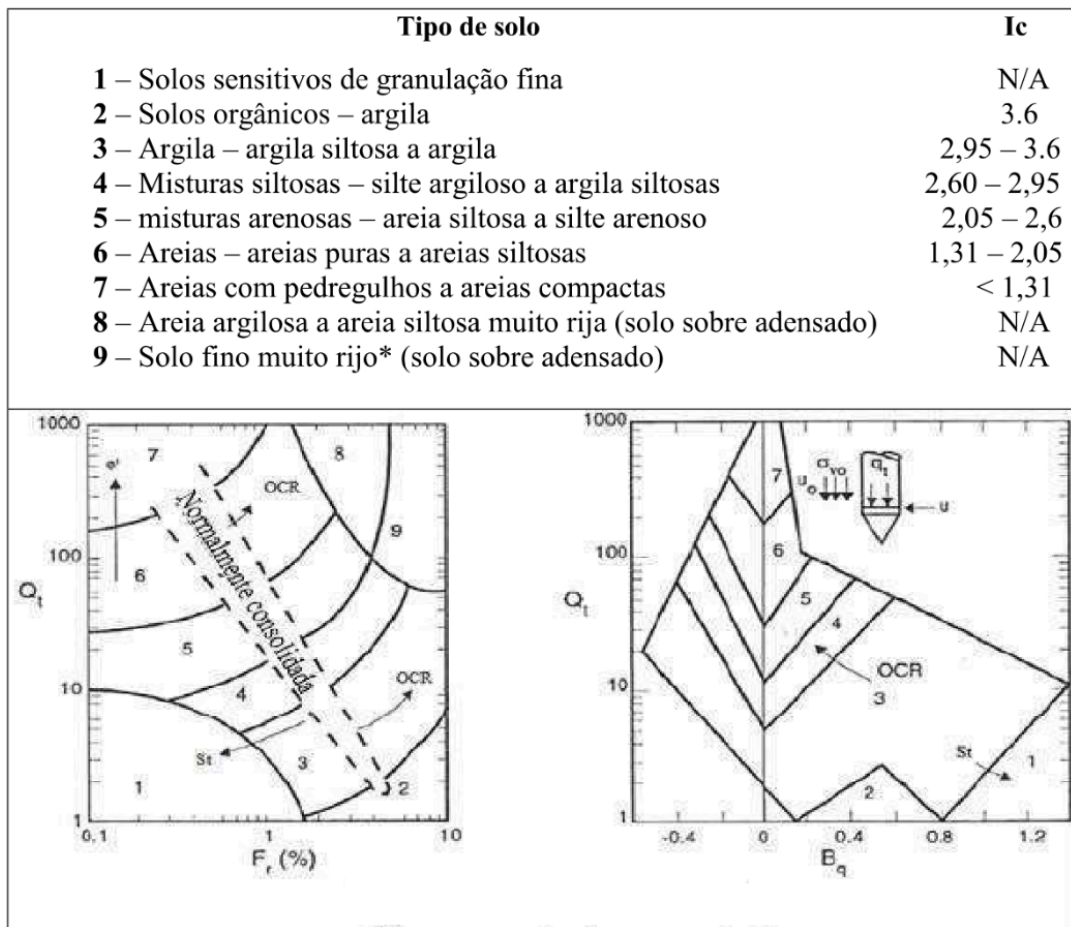


Figura 6- Carta de interpretação do ensaio CPT (adaptado por Souza, 2017 de Robertson, 2010).

Robertson & Wride (1998) introduziram o índice de tipo de solo (Ic), utilizado para definir as zonas de tipos de solos em uma forma normalizada. Esse índice utiliza a relação entre Q_{tn} e F_r para traçar círculos concêntricos que delimitam as regiões dos diferentes tipos de solo.

3.2.5.1 Normalização

Segundo Souza (2017), a normalização é necessária porque tanto a resistência à penetração do cone (q_c) quanto a resistência de atrito lateral (f_s) aumentam com a profundidade, devido ao aumento das tensões de sobrecarga. Wroth (1984) foi o responsável por propor a normalização linear, que ajusta os dados de forma a refletir o comportamento do solo. Segundo Robertson (2010), a resistência à penetração normalizada do cone, Q_t , é obtida por meio da equação:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$$

Q_t representa a resistência total do cone, σ_{vo} é a tensões verticais totais e σ'_{vo} corresponde à tensão de sobrecarga efetiva *in situ*, Wroth (1984). Já a razão de atrito normalizada, Fr , é dada pela relação:

$$Fr = (f_s/(q_t - \sigma_{vo})) \times 100\%$$

f_s é a resistência de atrito lateral. Esse parâmetro normalizado é útil para classificar solos e distinguir entre materiais de granulação fina e grossa.

Além disso, a normalização dos dados de pressão de poros, por meio do parâmetro de pressão de poros normalizado, Bq , é crucial para entender o comportamento do solo em relação às pressões intersticiais geradas durante a penetração do cone, Souza (2017). De acordo com Wroth (1984), o parâmetro Bq é calculado como:

$$Bq = \Delta u/q_n$$

$\Delta u = u_2 - u_0$, representando o excesso de pressão de poros (diferença entre a pressão de poros medida (u_2), e a pressão de equilíbrio (u_0), e q_n é a resistência líquida do cone, definida por:

$$q_n = q_t - \sigma_{vo}$$

3.2.5.2 Resultados Dos Testes De Dissipação

Os testes de dissipação consistem em interromper a penetração do piezocone e observar as pressões de poros (u) com o tempo decorrido (t). Os dados são registrados automaticamente pelo computador de campo e devem ser coletados até que ocorra uma dissipação mínima de 50%. As pressões de poros são plotadas em função da raiz quadrada de (t). A técnica gráfica sugerida por Robertson, Campanella & Wightman (1983) fornece um valor para t_{50} , que corresponde ao tempo necessário para 50% de consolidação.

O valor do coeficiente de consolidação na direção horizontal, Ch , é calculado pela teoria de Houlsby e Teh (1988) usando a seguinte equação:

$$Ch = \frac{T \times r^2 \times I_r^{0,5}}{t_{50}}$$

Onde:

- T : fator de tempo fornecido pela teoria de Houlsby e Teh (1988), correspondente à posição da pressão de poros.
- r : raio do piezocone.
- Ir : índice de rigidez, igual ao módulo de cisalhamento G dividido pela resistência não drenada da argila, S_u .
- t_{50} : tempo correspondente a 50% de consolidação.

3.2.5.2.1 Estimativas de permeabilidade baseadas no teste de dissipação

Segundo Houlsby e Teh (1988), a dissipação das pressões de poros durante um teste de dissipação CPTu é controlada pelo coeficiente de consolidação na direção horizontal Ch , que é influenciado por uma combinação da permeabilidade do solo k_h e da compressibilidade M , conforme definido pela seguinte equação:

$$k_h = \frac{Ch \times Y_w}{M}$$

Onde:

- M é o módulo de compressão unidimensional;
- Y_w é o peso específico da água, em unidades compatíveis.

3.3 SPT- Sondagem À Percussão

De acordo com Costa et al. (2022), o Teste de Penetração Padrão (SPT) é um método de investigação geotécnica amplamente utilizado no Brasil e em todo o mundo. Sua popularidade se deve à sua simplicidade, robustez e custo-benefício, além da vasta experiência acumulada ao longo dos anos. Os resultados do SPT são fundamentais para a classificação do subsolo, determinação da consistência e compacidade dos solos.

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o ensaio de SPT desempenha um papel fundamental e consolidado na prática geotécnica, sendo amplamente empregado em projetos de fundações devido à sua simplicidade, economia e ao histórico de experiência acumulada na execução. Para Schnaid e Odebrecht (2012), a continuidade do uso desse método é considerada uma tendência futura, especialmente se combinada ao avanço técnico e metodológico já alcançado. Para que a prática de engenharia incorpore efetivamente esses avanços, é necessário adotar metodologia e equipamentos padronizados, bem como assegurar a calibração da energia aplicada ao amostrador. Além disso, o treinamento e a supervisão da equipe envolvida são imprescindíveis para obter resultados confiáveis, ainda que elevem os custos. Uma vez atendidas essas condições, as metodologias do SPT podem ser aplicadas na estimativa de parâmetros de comportamento

do solo e no desempenho esperado das fundações, considerando sempre as limitações do método. Conforme Costa et al. (2022), os valores médios de penetração podem fornecer indicações quantitativas, como evidenciado por SPT(N) superiores a 30, que em geral indicam solos estáveis e resistentes, dispensando investigações mais complexas. Em contraste, solos com SPT(N) abaixo de 5 apresentam compressibilidade e baixa resistência, sendo inadequados para solução exclusiva via SPT, pois o ensaio deixa de ser representativo nessa faixa.

3.3.1 NBR 6484 de 2020

A ABNT (2020) contém procedimentos para a execução de sondagens de simples reconhecimento de solos com o ensaio SPT, abordando tanto o sistema manual quanto o mecanizado. Define o SPT como a determinação do índice de resistência à penetração (N) por meio do número de golpes necessários para cravar 30 cm do amostrador-padrão, após uma cravação inicial de 15 cm com um martelo de 65 kg. Este índice é crucial na caracterização do solo para projetos geotécnicos, que pode ser observado no Quadro 1.

O método SPT envolve a perfuração e cravação dinâmica do amostrador-padrão de 45 cm a cada metro de profundidade, determinando o tipo de solo e o índice de resistência à penetração, além de observar o nível da água. A norma especifica requisitos para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados, incluindo martelos e amostradores adequados, além de procedimentos padronizados para cravação e contagem de golpes.

Solo	Índice de resistência à penetração <i>N</i>	Designação ^a
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)
^a As expressões empregadas para a designação da compactidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.		

Quadro 1- Tabela da compactidade e consistência do solo a partir de ensaio SPT. Retirado de NBR 6484 de 2020.

3.3.2 Classificação dos solos

A classificação dos solos obtidos através de sondagem SPT segue diretrizes técnicas estabelecidas pela NBR 6484 (2020). Segundo a norma, o processo de identificação das amostras envolve uma análise tátil e visual, considerando três aspectos principais: granulometria, plasticidade e cor. No que diz respeito à origem, os solos podem ser classificados como aterros, residuais, ou transportados, englobando solos coluvionares, aluvionares, fluviais e marinhos.

De acordo com a NBR 6502 (2022), o solo residual é aquele formado in situ pela decomposição da rocha matriz, quando esta está sujeita à ação de intemperismos físicos ou químicos. Esse tipo de solo pode apresentar diferentes estágios de evolução. O solo residual jovem encontra-se em um estágio inicial de alteração, mantendo em maior grau as características da rocha original. Já o solo residual maduro resulta de uma decomposição total da rocha matriz, não apresentando mais vestígios de estrutura da rocha.

Segundo a NBR 6502 (2022), os solos transportados são definidos como materiais que foram deslocados de seu local de formação original por agentes naturais como água, vento, gravidade ou gelo. A norma apresenta diversas subclassificações, entre as quais destacam-se o solo aluvionar, formado pela sedimentação de partículas transportadas em suspensão pela ação das águas; o solo coluvionar, originado pela deposição de partículas transportadas pela ação da gravidade; e o solo marinho, gerado pela sedimentação de materiais em ambientes costeiros ou marinhos, sendo influenciado por processos típicos desses locais. A norma também define o conceito de aterro como um depósito artificial de qualquer tipo de solo ou de outros materiais. Esses depósitos podem ser utilizados para criar elevações ou preenchimentos, sendo fundamentais em obras de infraestrutura.

Sob a perspectiva geológica, há uma distinção clara entre solos e sedimentos. Solos são materiais resultantes do intemperismo das rochas, enquanto sedimentos correspondem a partículas transportadas e depositadas em um novo local. Contudo, no âmbito da geotecnia, esses conceitos se sobrepõem. Segundo a NBR 6502:1995, sedimentos podem ser classificados como solos transportados. Assim, ambos os termos, sedimentos e solos transportados, são frequentemente utilizados de maneira intercambiável em estudos geotécnicos. Essa abordagem unificada é essencial para o desenvolvimento de soluções práticas na engenharia, uma vez que considera os materiais depositados por processos naturais como solos, facilitando a aplicação de normas e métodos de análise padronizados. Dessa forma, é possível abranger um espectro mais amplo de condições geológicas e geomorfológicas em projetos de infraestrutura.

Segundo a norma NBR 6484 (2020), a granulação é o primeiro critério para a identificação dos solos. Os solos grossos são aqueles que apresentam uma textura áspera ao tato, como areias e pedregulhos, enquanto os solos finos, como argilas e siltes, são macios ao toque. Essa diferenciação pode ser verificada pelo ensaio tátil, em que se fricciona a amostra entre os dedos, além da análise visual que permite observar a predominância dos tamanhos de grãos. Partículas maiores que 0,1 mm podem ser vistas a olho nu, facilitando a classificação preliminar.

Conforme a NBR 6484 (2020), dentro dos solos grossos, a norma estabelece subdivisões. Solos com grãos maiores que 2 mm são classificados como pedregulhos, enquanto aqueles com grãos entre 0,1 mm e 2 mm são classificados como areias. As areias, por sua vez, podem ser subdivididas em areias grossas, médias e finas, de acordo com o tamanho predominante dos grãos. As areias grossas possuem grãos da ordem de 1,0 mm, as médias em torno de 0,5 mm, e as finas, 0,1 mm. Quando se observa uma boa distribuição dos diferentes tamanhos de grãos, é possível indicar que a areia é bem graduada, o que tem implicações diretas na permeabilidade e compacidade do solo. Por outro lado, solos compostos por partículas menores que 0,1 mm são classificados como argilas ou siltes. A distinção entre esses dois tipos de solo baseia-se na plasticidade e na resistência coesiva. As argilas apresentam alta plasticidade quando possuem umidade suficiente, sendo moldáveis ao toque, e, quando secas, têm uma maior resistência coesiva. Já os siltes têm uma plasticidade reduzida e, quando secos, se desagregam com mais facilidade.

De acordo com a NBR 6484 (2020), a nomenclatura das frações de solo segue uma ordem de predominância das partículas identificadas, podendo incluir até três frações distintas, como em "argila silto-arenosa". Além disso, podem ser feitos complementos à descrição com a presença de pedregulhos, cascalhos, matéria orgânica ou detritos. A cor do solo, outro critério essencial para a identificação, deve ser indicada logo após a coleta da amostra. A norma recomenda o uso de até duas designações de cores, sendo comum utilizar-se termos como branco, cinza, preto, marrom, amarelo e vermelho. Quando o solo apresenta mais de duas cores distintas, deve-se utilizar o termo "variegado". Adicionalmente, a presença significativa de mica deve ser indicada, classificando o solo como "micáceo".

3.4 Comparação Entre Ensaio SPT E CPTu

Souza (2017) destaca que o ensaio CPTu fornece dados contínuos e detalhados sobre as propriedades do solo, como resistência ao cisalhamento e pressão de poro, enquanto o SPT é mais simples e amplamente utilizado devido ao seu baixo custo e

facilidade de execução. No entanto, o SPT apresenta limitações significativas, como a variabilidade dos resultados devido à dependência da habilidade do operador e à menor precisão em solos coesivos. Em seu trabalho de correlação entre os métodos, observou que:

“nos resultados de classificação do solo, houve em alguns casos semelhança dos dados aferidos através das cartas disponibilizadas pelo software CPT com relação àqueles atingidos em outros ensaios, como DMT, SPT e de caracterização.” (Souza, 2017)

Essa semelhança sugere que o CPTu pode ser uma ferramenta valiosa para complementar o SPT, especialmente em solos onde a precisão e a continuidade dos dados são cruciais. Por outro lado, as diferenças observadas em algumas camadas podem ser atribuídas à variabilidade geológica regional e às limitações dos métodos de correlação usados.

De acordo com a NBR 6122 (2020), norma que estabelece os critérios técnicos e procedimentos necessários para o dimensionamento, planejamento e execução de fundações de edificações, a realização de sondagens do tipo SPT é obrigatória para a elaboração de projetos de fundações. Mesmo que sejam utilizados ensaios complementares, como o CPTu, a norma estabelece que o SPT deve ser realizado, pois fornece parâmetros indispensáveis e normatizados para o dimensionamento seguro das fundações.

Um dos principais pontos de divergência entre os dois ensaios é o tipo de solo onde cada método apresenta melhores resultados. Enquanto o SPT se mostra mais adequado para solos granulares, devido à sua natureza discreta de coleta de dados a cada metro de profundidade, o CPTu, com sua capacidade de fornecer informações contínuas, é especialmente útil em solos coesivos. Isso foi evidenciado em estudos, como o realizado por Costa et al. (2022), no qual os ensaios de SPT e CPTu foram comparados em diferentes camadas de solo no município de Biguaçu, SC. Os resultados indicaram uma maior dispersão nos dados do SPT quando comparados com os do CPTu, particularmente em solos argilosos, devido à heterogeneidade natural do solo e ao tempo decorrido entre as execuções dos ensaios.

No estudo mencionado, os solos da camada superficial de Biguaçu, predominantemente compostos por argila de baixa resistência e alta compressibilidade, apresentaram uma correlação mais precisa entre os resultados do CPTu, enquanto o SPT apresentou limitações devido à sua menor sensibilidade e à dificuldade de interpretar resultados em solos saturados e moles.

Schnaid e Odebrecht (2012) destacam que os ensaios de cone (CPT) e piezocone (CPTu) foram incorporados à prática de engenharia no Brasil, complementando as informações obtidas em investigações preliminares com sondagens SPT.

Os parâmetros de ensaio (q_c , f_s , u), obtidos em conformidade com normas técnicas nacionais e internacionais, permitem a estimativa de diversas propriedades do solo, como a densidade relativa (D_r), resistência não drenada (S_u), ângulo de atrito interno (ϕ'), histórico de tensões e coeficiente de adensamento (C_h). Esses dados são cruciais para o dimensionamento seguro e eficiente de fundações, contribuindo para a previsão de capacidade de carga e para a estimativa de recalques nos projetos.

Por fim, ambos os ensaios apresentam vantagens e limitações específicas, e a escolha entre SPT e CPTu depende das condições do solo e do nível de precisão requerido no projeto geotécnico. Conforme indicado no estudo de Costa et al. (2022), a integração de ambos os métodos pode fornecer uma caracterização mais robusta e completa do perfil geotécnico, sendo recomendada, principalmente em solos heterogêneos ou de comportamento complexo, como argilas de alta compressibilidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o levantamento bibliográfico sobre a geologia regional de Resende-RJ e os ensaios CPTu e SPT, incluindo uma revisão da metodologia de cada ensaio, suas vantagens, limitações e aplicações.

A execução da campanha de investigação ocorreu de agosto a outubro, abrangendo sete ilhas de investigação no terreno da empresa contratante. Para a análise comparativa, foram escolhidas as ilhas 02 e 05, pois, nas demais, os ensaios CPTu foram interrompidos nos primeiros metros devido ao pico de resistência de ponta. Em cada ilha a distância entre os furos de cada ensaio é de 5 metros.

Os dados dos ensaios foram organizados em relatórios de campo, com resultados das cravações e características do solo obtidas em laboratório.

Para a confecção dos perfis de sondagem foi utilizado o *software* da empresa DynamicCad. Para a plotagem de dados do CPTu foi utilizado o *software* CPData. A análise comparativa permitiu estruturar os resultados dos métodos SPT e CPTu, considerando resistência do solo, granulometria e delimitação das camadas do solo. Perfis de solos foram elaborados para cada ensaio, através do programa Canva, visando a melhor visualização e comparação das informações obtidas. Todas as etapas foram realizadas com o apoio da empresa Conteste Engenharia Ltda., os ensaios de campo, programas utilizados e laboratórios.

Foi adotada a abordagem geotécnica para a classificação dos sedimentos da Formação Floriano, presentes na Bacia de Resende. Embora, sob a perspectiva geológica, esses depósitos sejam classificados como sedimentos devido à sua origem e processo de deposição, para fins de análise geotécnica foram tratados como solos transportados. Essa escolha se justifica pelo fato de que a engenharia geotécnica considera sedimentos transportados e depositados por agentes naturais, como água, vento ou gravidade, dentro da classificação de solos transportados, o que facilita a aplicação de normas técnicas e métodos de investigação padronizados.

4.1 Ensaio SPT

O ensaio SPT foi conduzido em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6484-2020. Para garantir a precisão e a consistência dos resultados, foram utilizados os equipamentos adequados, todos dimensionados conforme as especificações da norma. Isso incluiu uma variedade de componentes essenciais, tais como uma torre de aço desmontável, tubos de revestimento de aço com diâmetros internos variando entre 63,5 mm e 165 mm, hastes de perfuração/cravação com diâmetro nominal interno de 25 mm, trado-concha com diâmetro compatível com o tubo de revestimento, e trado helicoidal com diâmetro mínimo de 56 mm. Além disso, foram empregados o trépano/peça de lavagem

com largura mínima de 62 mm, amostrador-padrão com diâmetro externo de 50,8 mm e diâmetro interno de 34,9 mm, cabeça de bater com diâmetro de tarugo de aço de 88 mm e altura de 90 mm e martelo padronizado para cravação do amostrador, com uma haste-guia de 1,20 m de comprimento e massa total de 65 kg. Todos esses equipamentos foram selecionados e operados de acordo com os requisitos técnicos estabelecidos na norma.

No que se refere ao processo de perfuração, a sondagem foi iniciada utilizando-se o trado-concha ou cavadeira manual até a profundidade de 1 m, seguido pela instalação do primeiro segmento do tubo de revestimento dotado de sapata cortante. Nas operações subsequentes de perfuração, foram utilizados o trado concha até atingir o nível d'água freático ou quando o avanço da perfuração com o trado helicoidal fosse inferior a 50 mm após 10 min de operação, momento em que se passava ao método de perfuração por circulação de água.

Durante a perfuração por circulação de água, o material escavado foi removido por meio de circulação de água realizada pela bomba d'água motorizada através da composição de perfuração. Medidas foram adotadas para estabilização do solo e limpeza do furo, quando necessário, utilizando-se tubo de revestimento. Durante todas as operações de perfuração, o nível d'água no interior do furo foi mantido em cota igual ou superior à do nível d'água do lençol freático encontrado. A profundidade foi verificada a cada ensaio.

Para a coleta de amostras representativas do solo, foi amostrada uma parte do solo pelo trado durante a perfuração até 1 m de profundidade. Adicionalmente, a cada metro de perfuração, a partir de 1 m de profundidade, a amostragem do solo se deu por meio do amostrador-padrão.

Após o posicionamento do amostrador-padrão, foi colocada a cabeça de bater e, utilizando-se o tubo de revestimento como referência, marcou-se na haste um comprimento de 45 cm divididos em três segmentos iguais de 15 cm. Em seguida, o martelo foi apoiado cuidadosamente e registrado o avanço estático.

A cravação do amostrador-padrão foi realizada até completar os 45 cm de penetração por meio de impactos sucessivos do martelo padronizado caindo livremente de uma altura de 75 cm (Figura 7). O número de golpes necessários para a cravação de cada segmento de 15 cm foi registrado. As amostras foram imediatamente acondicionadas em recipientes herméticos, devidamente etiquetados com informações detalhadas, e armazenadas adequadamente.



Figura 7- Martelo padronizado para cravação do amostrador, na Ilha 02.

O critério de paralisação das sondagens foi estabelecido de acordo com as necessidades específicas do projeto, conforme definido pela contratante ou seu preposto, garantindo que as sondagens atendam aos requisitos técnicos exigidos. Conforme solicitado pelo contratante, as sondagens foram paralisadas em 10,45 metros. Além disso, foi observada a posição do nível de água encontrado no furo de sondagem. Ao final da sondagem, foi realizado o máximo rebaixamento possível da coluna d'água interna do furo e foram feitas anotações adicionais relacionadas à posição do nível d'água, após 24h. As amostras foram examinadas tátil e visualmente, identificando-as com base em características como granulometria, plasticidade, cor e origem. Elas foram ordenadas pela profundidade e examinadas individualmente, agrupando-se as amostras consecutivas com características semelhantes, como pode ser visto na figura 8.

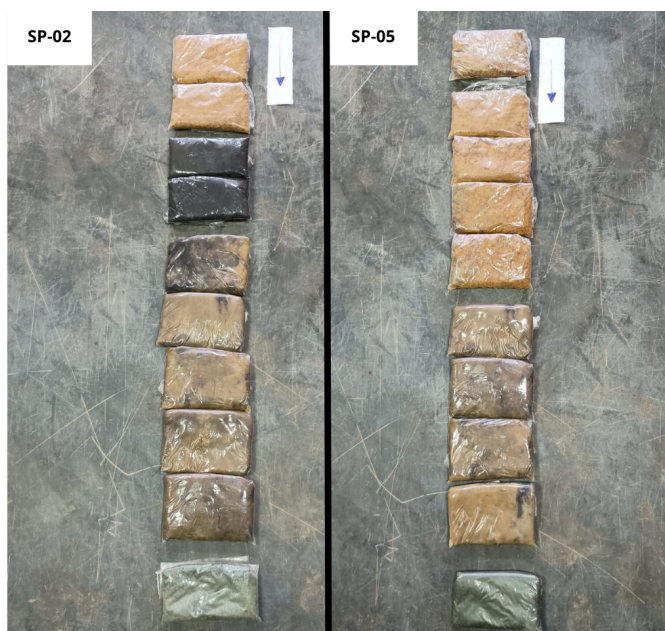


Figura 8- Amostras coletadas através do ensaio SPT, nas ilhas 02 e 05.

4.2 Ensaio CPTu

Para a execução dos ensaios CPTu com penetrômetro piezocone eletrônico, seguiu-se o procedimento descrito na norma ASTM D5778-12. A máquina de empuxo foi posicionada sobre o ponto de sondagem, nivelada e levantada do sistema de suspensão, ajustando-se os cilindros hidráulicos para garantir o alinhamento vertical correto das hastes de empuxo com a direção do empuxo, como pode ser visto na figura 9.



Figura 9- Ensaio CPTu em execução na Ilha-05.

A taxa de avanço do cilindro hidráulico foi ajustada para manter uma velocidade de penetração de 20 ± 5 mm/s, assegurando a consistência das leituras. Antes do início dos

ensaios, a ponta do penetrômetro e o sistema de aquisição de dados foram ativados 20 minutos antes do uso. Uma leitura inicial de referência da ponta do penetrômetro foi obtida em condição não carregada, à temperatura mais próxima possível das condições do solo, e comparada com leituras anteriores para garantir a estabilidade térmica.

A profundidade das leituras foi medida com precisão de ± 100 mm a partir da superfície do solo. A resistência do cone e a resistência da luva de fricção foram determinadas continuamente com a profundidade e registradas em intervalos não superiores a 50 mm. Durante a execução do ensaio, a resistência de ponta e atrito lateral foram monitorados continuamente para garantir a operação adequada e identificar sinais de obstruções ou condições adversas.

Leituras de pressão da água intersticial foram registradas e monitoradas para verificar a dissipação de pressão, especialmente em solos de baixa condutividade, onde o tempo de dissipação foi mais longo.

Nos casos em que a pressão de empuxo excessiva impediu o progresso, redutores de fricção foram utilizados conforme necessário, ou a ponta do penetrômetro foi retirada e reintroduzida até a profundidade de interrupção. Todos os dados coletados durante a sondagem foram acompanhados de leituras de referência finais, comparadas com as iniciais para garantir a integridade dos resultados.

Após a conclusão da sondagem, as hastes de empuxo e a ponta do penetrômetro foram retiradas rapidamente. A ponta do penetrômetro foi inspecionada para verificar a operação adequada, e leituras de referência finais foram obtidas para comparação com as iniciais.

Durante os testes de dissipação de pressão da água intersticial, a penetração foi temporariamente interrompida no local de interesse, e a pressão da água intersticial foi registrada em função do tempo até que a pressão de equilíbrio fosse atingida ou 50% da pressão inicial tivesse se dissipado. Esses dados foram registrados como gráficos de pressão da água intersticial versus logaritmo do tempo.

5. RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos ensaios de campo realizados na área de estudo, em Resende-RJ, com uma distância de 5 metros entre cada ensaio em uma mesma ilha.

5.1 SPT

Com o ensaio SPT é possível obter o número de golpes de penetração e o gráfico SPT(N), que é convertido no estado de compacidade e consistência do solo. Além do nível d'água, estratigrafia do solo, e classificação geológico-geotécnica. Ambos ensaios foram interrompidos em 10,45 m, por critérios contratuais

5.1.1 SPT-02

Este ensaio atingiu 10,45 metros e foi paralisado por ordem do contratante. Nível d'água identificado em 3,75 metros. No geral apresenta valores baixos de SPT(N), tendo a partir da superfície um aterro com dois metros de profundidade, seguido de camadas argilosas muito mole, orgânicas ou transportadas, chegando a dez metros de profundidade, e logo após, solo residual jovem, duro, de silte argilo-arenoso, como pode ser observado na figura 10.

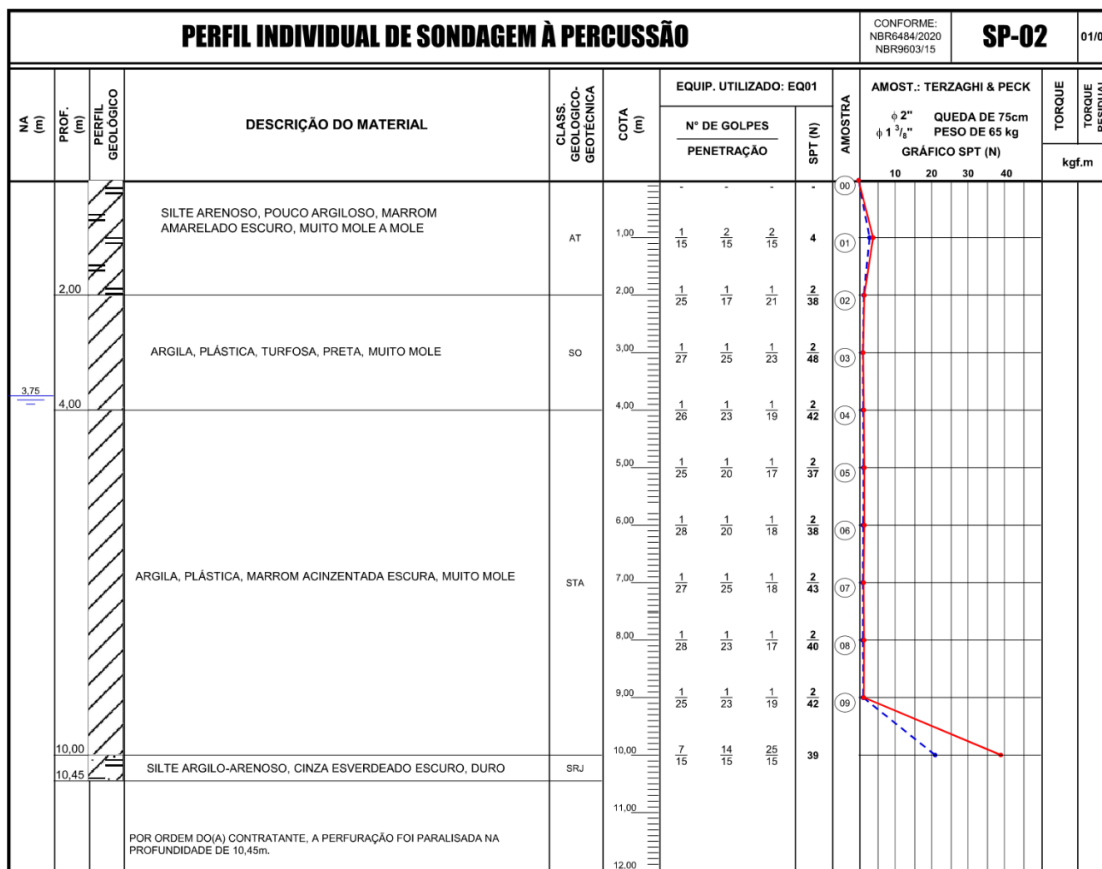


Figura 10- Perfil individual de sondagem à percussão (SP-02)

5.1.2 SPT-05

Este ensaio atingiu 10,45 metros e foi paralisado por ordem do contratante. Nível d'água não encontrado. Este local possui um aterro mais profundo, chegando a 5,65 metros, com valores médios de SPT(N), solo argiloso, mole a médio, seguido de argila muito mole (figura 11).



Figura 11- Perfil individual de sondagem à percussão (SP-05)

5.2 CPTu

5.2.1 CPTu-02

O ensaio de piezocone mostrou, através dos pontos plotados na figura 12, a predominância de solos argilosos, silte argilosos e a argilo siltosos, mas também pontos em areia, areia siltosa, silte arenoso, e poucos pontos plotado em material orgânico, solos muito rígidos e solos sensitivos de granulação fina. O solo, na ilha-02, parte de camadas arenosas, com areia siltosa, para camadas argilosas, e volta no final para areia siltosa, sendo que no caminho há intercalações, nas camadas argilosas, por exemplo, existem lentes de areia siltosa e solo fino sensitivo, como pode ser observado na figura 13, e o

ensaio termina em 10,59 m, com 53,01 minutos de dissipação, por pico de resistência de ponta. Além disso, através da linha hidrostática do local de ensaio é indicado um nível d'água em 3,75 m de profundidade, como é observado na figura 14.

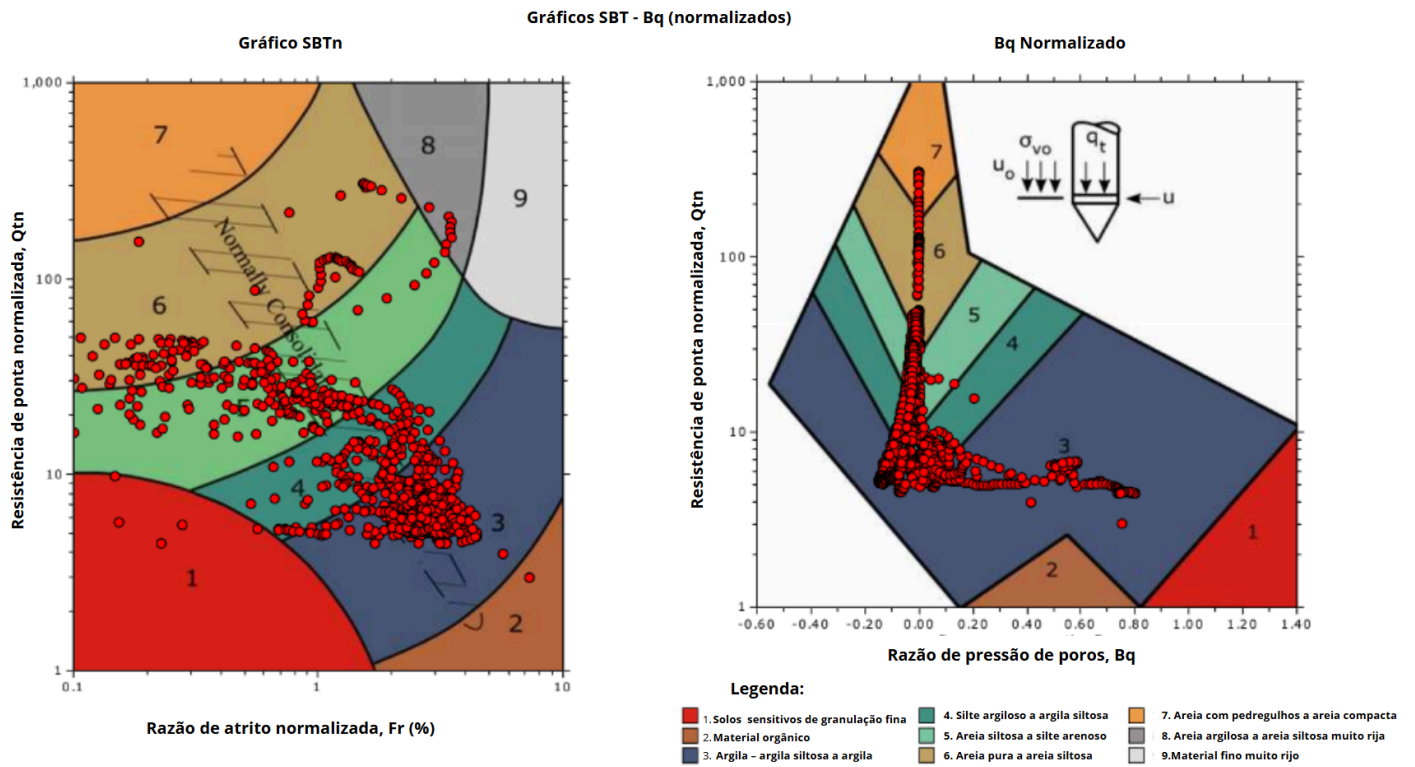


Figura 12- SBT e Bq normalizados, pontos plotados, CPTu-02.

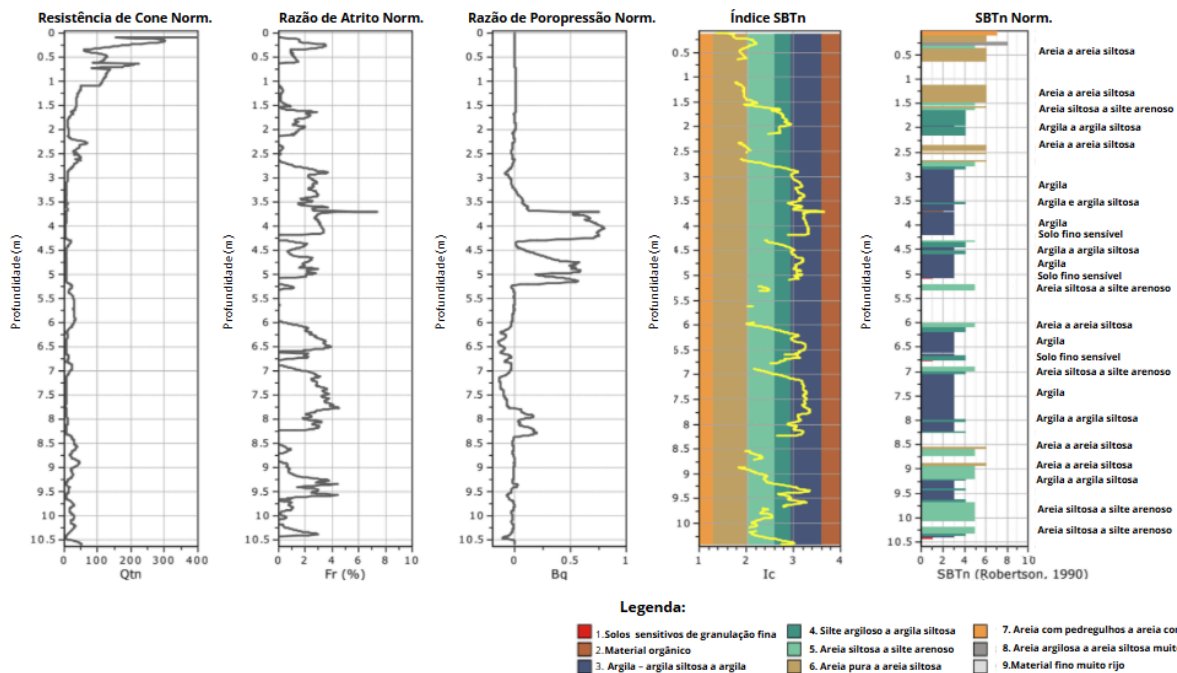


Figura 13- Resistência de cone, razão de atrito, razão de poropressão e índice SBT, normalizados, CPTu-02.

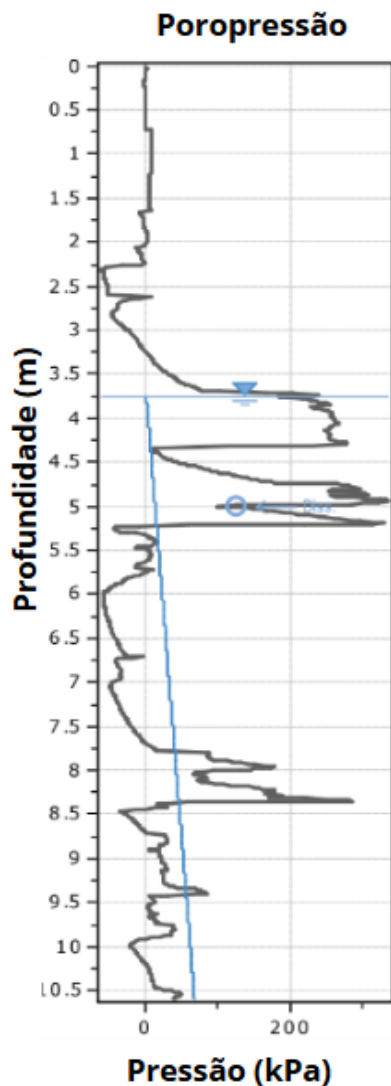


Figura 14- Linha hidrostática no gráfico de poropressão, CPTu-02.

O ensaio de dissipação realizado na ilha-02, na profundidade de 5 metros, apresenta os resultados, representados na tabela 1. Estes valores são representados através da figura 15, que indica também a pressão hidrostática $u_0 = 12,26$ kPa.

Son. CPTu	Prof. (m)	$(t_{50})^{0,5}$ (s)	t_{50} (s)	t_{50} (anos)	G/Su	Ch (m^2/s)	Ch (m^2/ano)	M (MPa)	kh (m/s)
CPTu - Ilha 2	5	34,2	1168	3,70E-05	713,09	1,88E-06	59	2,68	6,88E-09

Tabela 1- Resultados do ensaio de dissipação, CPTu-02.

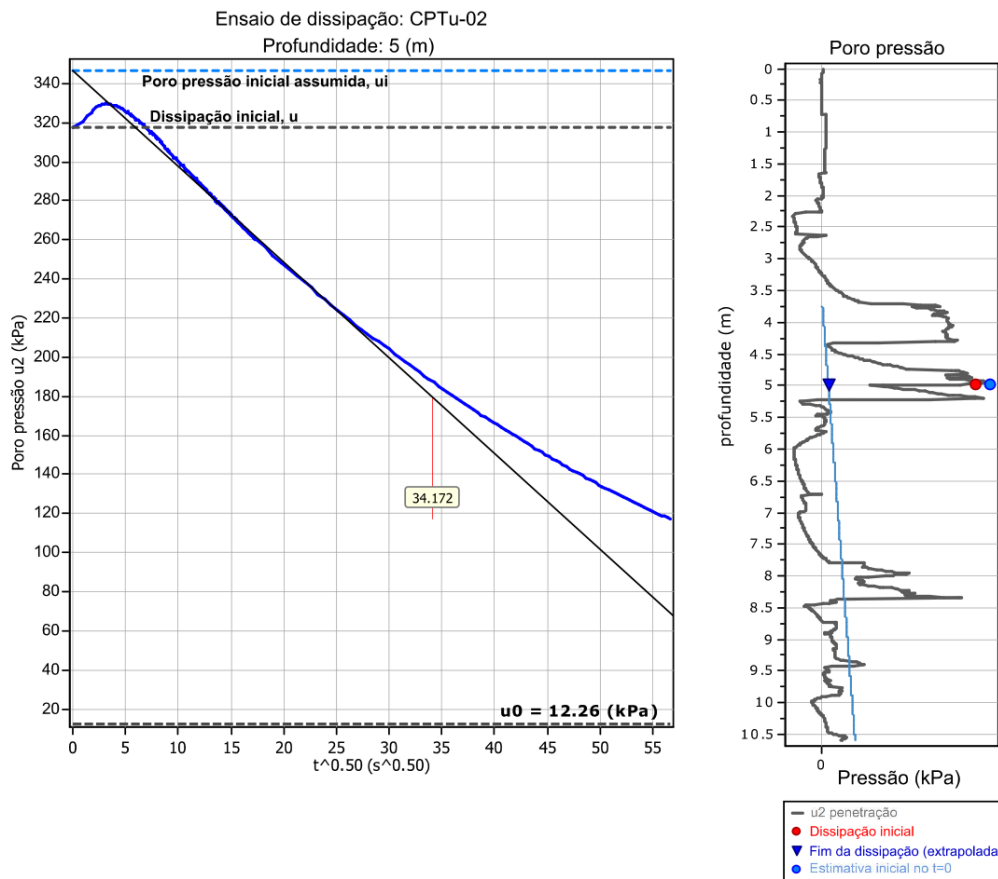


Figura 15- Ensaio de dissipação, CPTu-02.

5.2.2 CPTu-05

O ensaio de CPTu realizado na ilha-05, possui metragem máxima de 8,74 metros, foi paralisado por pico de resistência de ponta. Foram realizados dois testes de dissipação, em 6,72 metros, com 69,50 minutos de duração, e outro em 8,74 metros, com 54 minutos de duração. Através dos pontos plotados, utilizando a relação entre resistência de ponta e razão de atrito, na figura 16 podemos observar a alta incidência de pontos tanto para solos argilosos, como para areias siltosas a siltes arenosos. Além disso, é possível notar pontos em solos mais rígidos, como areia com pedregulhos, muito compacta, e material fino muito rijo.

O perfil de solo gerado na figura 17, mostra uma camada de material rígido, compacto, fino a arenoso, seguida por uma camada de areia siltosa a silte arenoso, com lentes argilosas, e uma camada de argila, com presença de solo orgânico, voltando à areia siltosa, nos metros finais. No ensaio de dissipação realizado no CPTu na ilha 05, não foi possível considerar as linhas hidrostáticas para determinar o nível d'água, uma vez que o teste de dissipação deve ser realizado no pico de poropressão para obter dados confiáveis. Contudo, neste caso, a metragem para o ensaio foi definida pelo cliente, interferindo

diretamente na representatividade dos resultados. Essa limitação resultou em um gráfico que aponta um nível d'água na superfície, o que não condiz com a realidade local. Assim, a análise do nível d'água baseada na linha hidrostática foi comprometida, como pode ser visto na figura 18, demonstrando a importância de seguir os critérios técnicos adequados ao realizar esse tipo de ensaio.

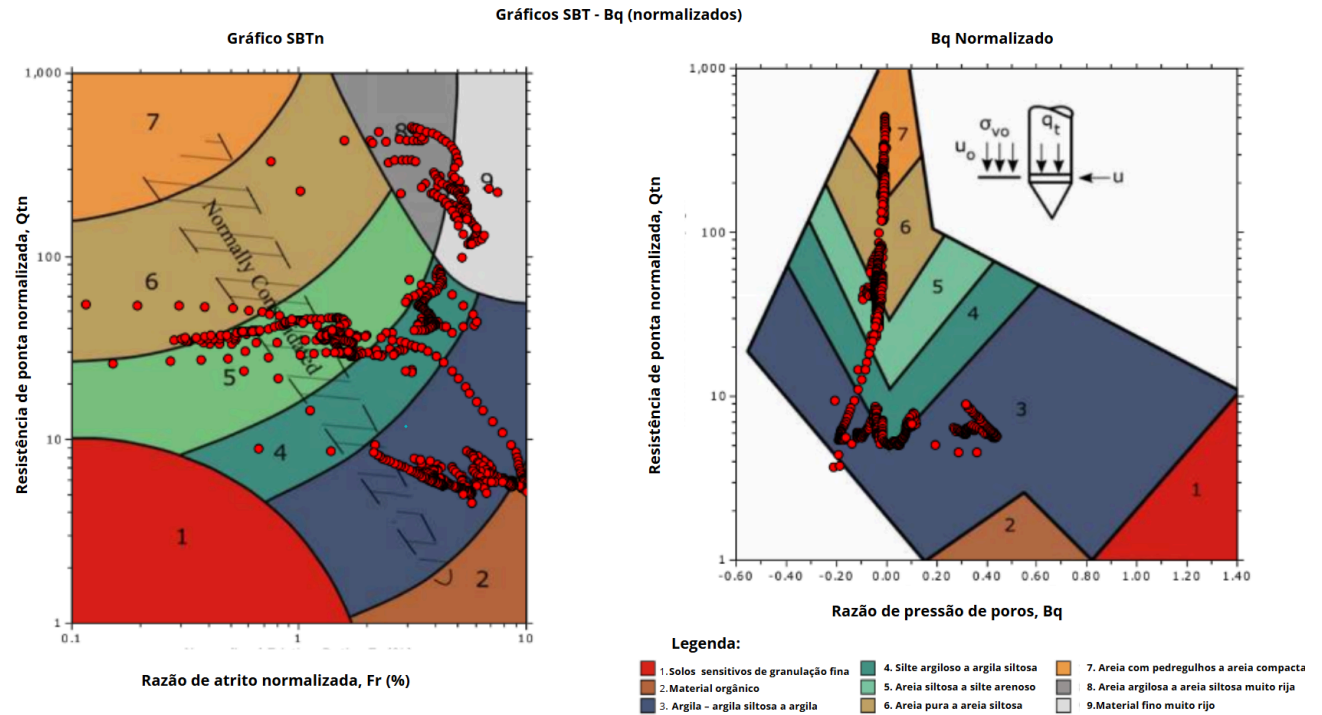


Figura 16- SBT e Bq normalizados, pontos plotados, CPTu-05.

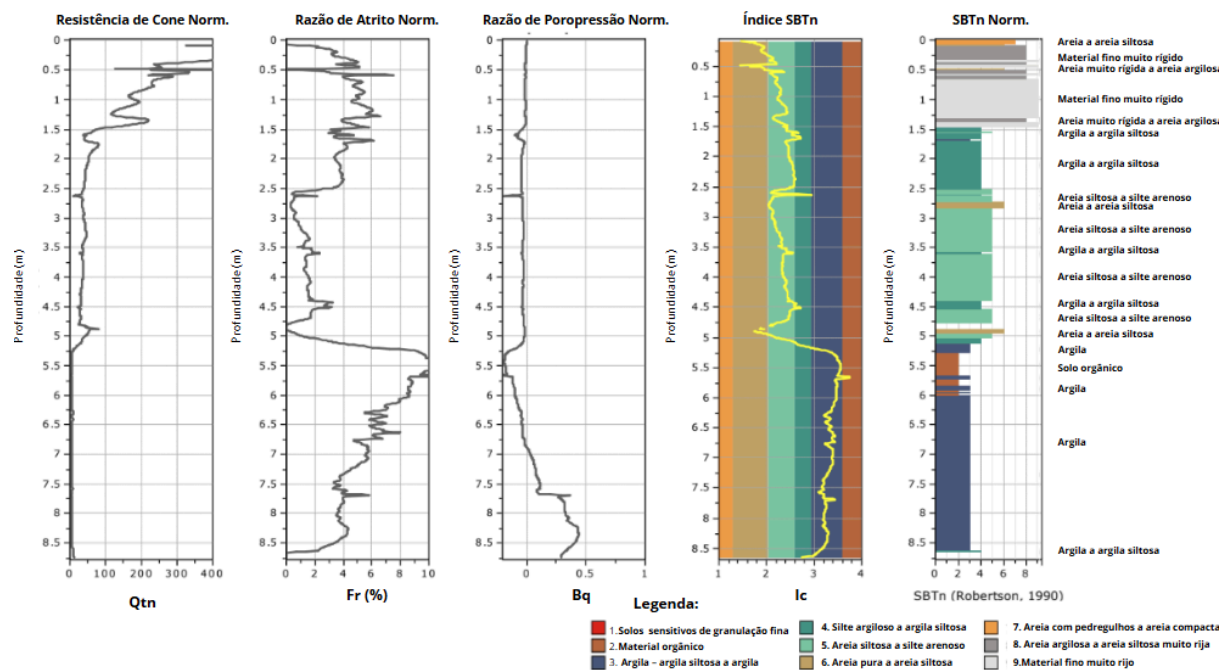


Figura 17- Resistência de cone, razão de atrito, razão de poropressão e índice SBT, normalizados, CPTu-05.

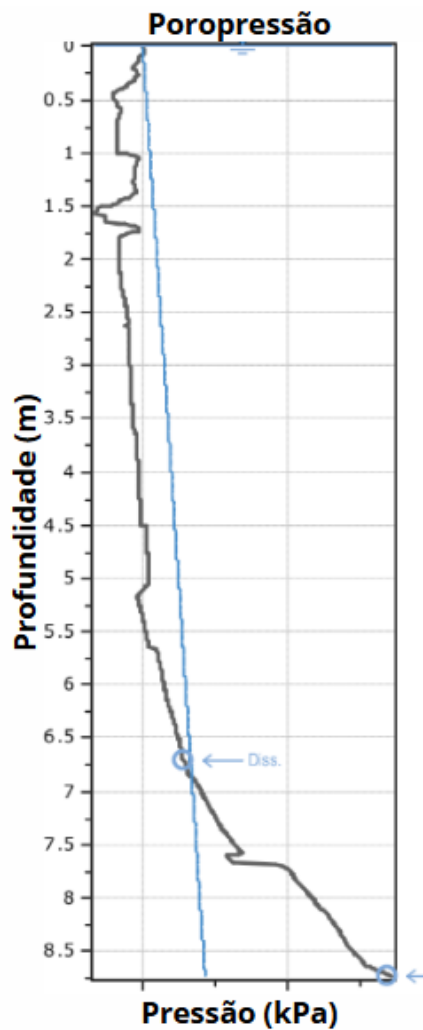


Figura 18- Linha hidrostática no gráfico de poropressão, CPTu-05.

Os ensaios de dissipação realizados na Ilha 05 para o CPTU foram executados em profundidades de 6,72 metros e 8,74 metros, fornecendo os parâmetros principais representados na tabela 2. Esses valores são representados nas figuras 19 e 20, que indicam também a pressão hidrostática $u_0 = 65,92$ kPa, para 6,72m, e $u_0 = 85,74$ kPa, para 8,74m.

Sond. CPTU	Prof. (m)	(t50)0.5 (s)	t50 (s)	t50 (anos)	G/Su	ch (m ² /s)	ch (m ² /ano)	M (MPa)	kh (m/s)
CPTu- ilha 05	6,72	27,7	766	2,43E-05	933,48	3,27E-06	103	1,95	1,65E-08
CPTu- ilha 05	8,74	31,5	993	3,15E-05	100	8,26E-07	26	0,78	1,04E-08

Tabela 2- Resultados do ensaio de dissipação, CPTu-05.

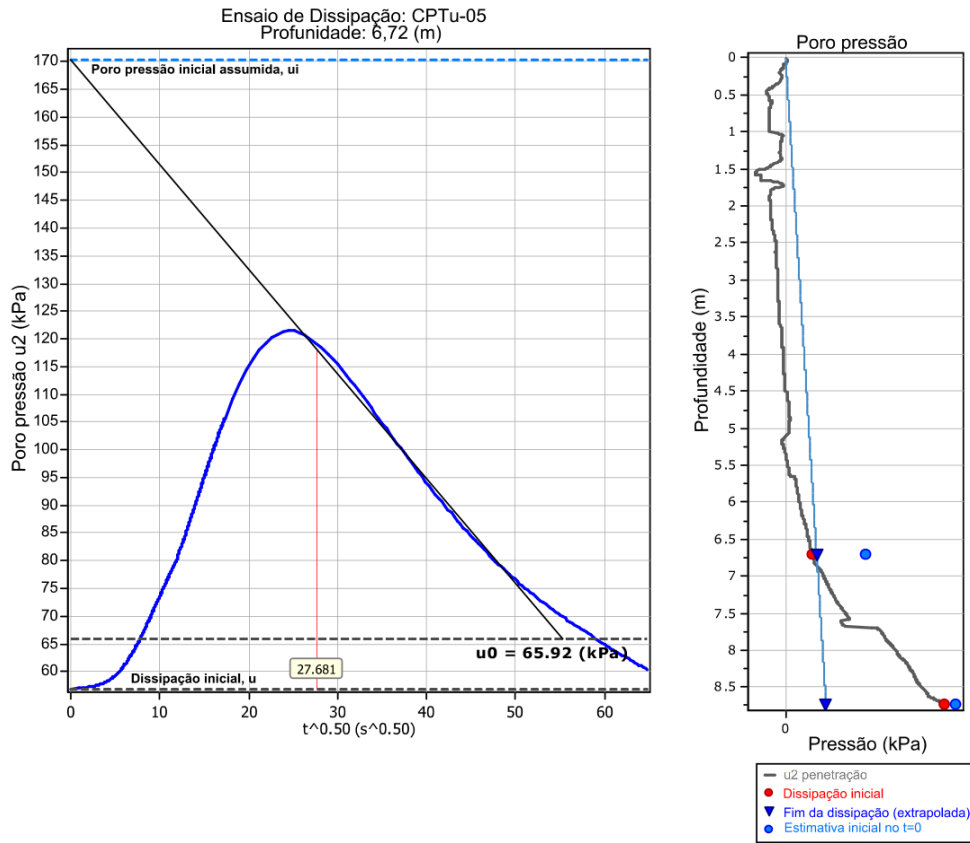


Figura 19- Ensaio de dissipação em 6,72m, CPTu-05.

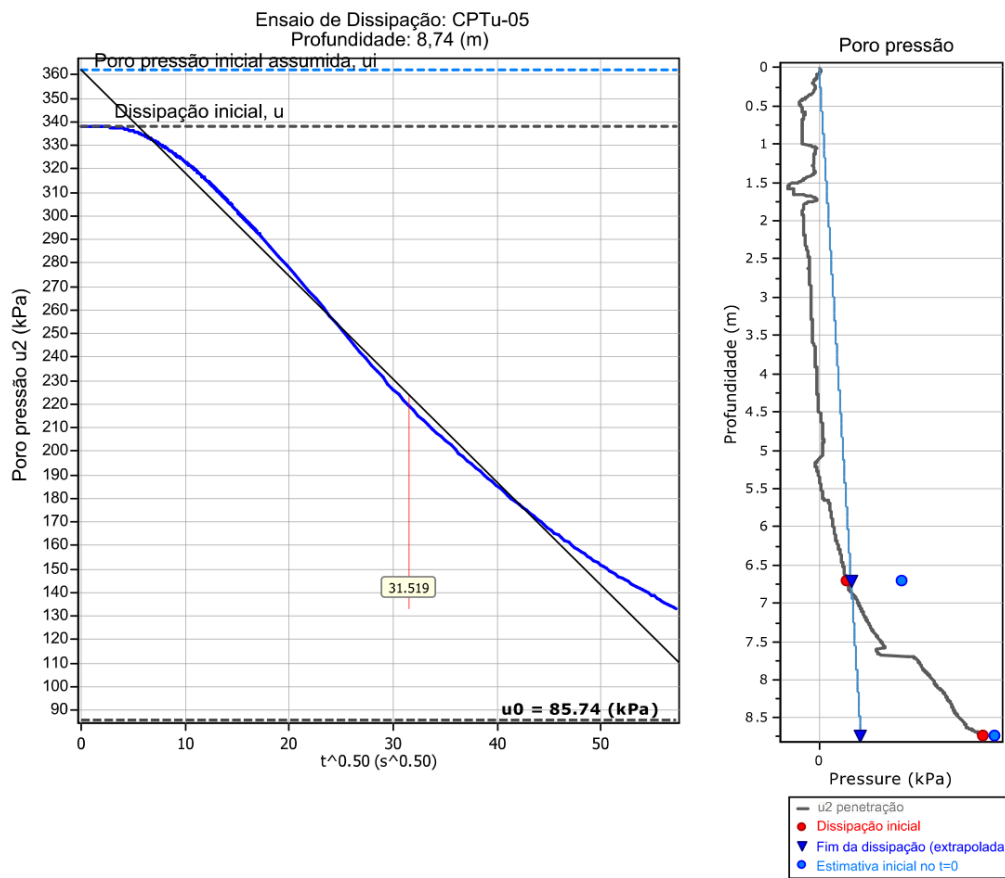


Figura 20- Ensaio de dissipação em 8,74m, CPTu-05.

5.3 Perfis de solos transportados

No perfil SPT-02, a camada superficial, até 2,00 m de profundidade, é composta por silte arenoso, pouco argiloso, de cor marrom amarelada escura, com consistência muito mole a mole. Entre as profundidades de 2,00 a 4,00 m, observa-se uma argila plástica, de cor preta e turfosa, também de consistência muito mole. Abaixo dessa camada, de 4,00 m até 10,00 m, a estratigrafia revela argila plástica, marrom acinzentada escura, ainda com consistência muito mole. Por fim, a camada mais profunda é composta por silte argilo-arenoso, de coloração cinza esverdeado escuro e com consistência dura (figura 21).

No CPTu-02, o perfil superior, até 1,50 m, é dominado por areia a areia siltosa, seguido por uma transição de argila a argila siltosa entre 1,50 m e 3,00 m, com presença de variações de areia siltosa. De 3,00 a 9,50 m, encontra-se uma camada de argila e argila siltosa com lentes de areia siltosa e solo fino sensível. A profundidade de 9,50 m a 10,50 m é marcada por uma camada de areia siltosa a silte arenoso (figura 21).

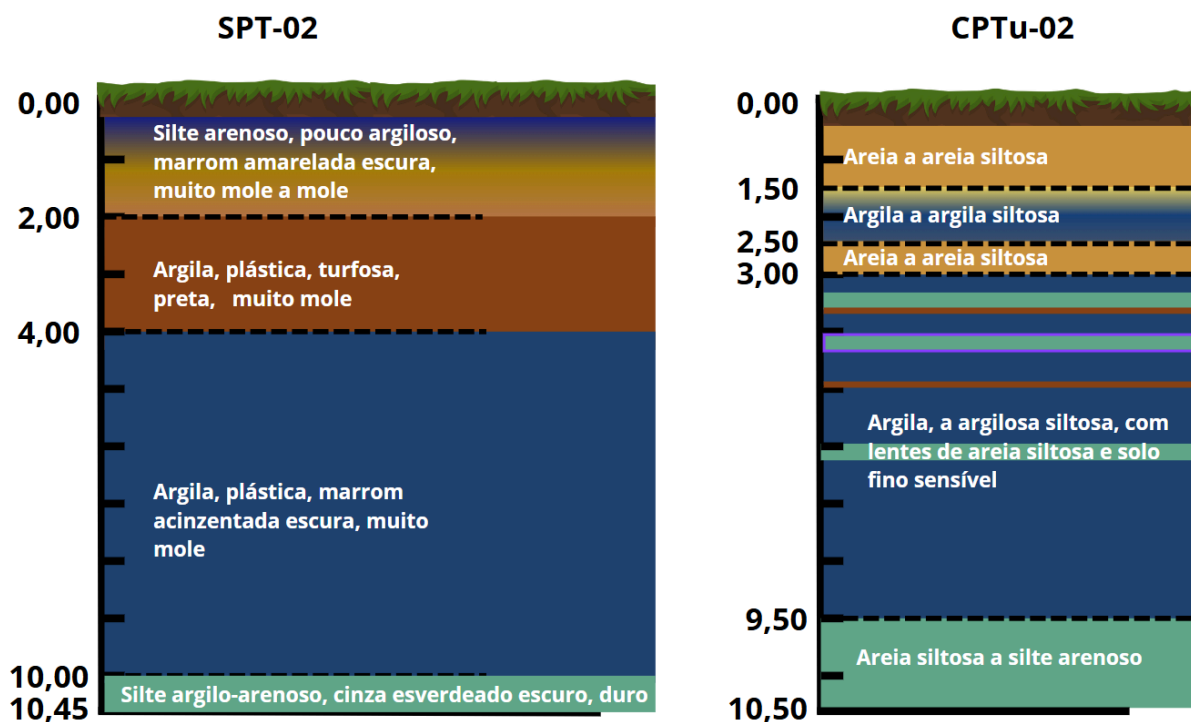


Figura 21- Perfil de solos, SPT x CPTu, ilha 02.

Para o perfil SPT-05, a primeira camada, até 1,00 m de profundidade, é formada por silte arenoso, pouco argiloso, contendo pedregulhos finos e detritos vegetais, com coloração marrom claro. Entre 1,00 m e 5,65 m, predomina a argila siltosa, pouco arenosa e plástica, de cor marrom amarelada escura e consistência de mole a média. A seguir, entre 5,65 m e 9,80 m, há uma camada de argila siltosa plástica, cinza amarronzada escura, com

consistência muito mole. Abaixo dessa camada, de 9,80 m a 10,45 m, observa-se argila siltosa plástica de cor cinza esverdeada clara e consistência muito mole (figura 22).

Já no perfil CPTu-05, a camada inicial, até 0,30 m, é composta por areia a areia siltosa, seguida por uma transição para argila a argila siltosa que se estende até 2,50 m. Entre 2,50 m e 5,70 m, o perfil apresenta areia e areia siltosa com presença de silte arenoso. De 5,70 m a 8,60 m, há uma camada composta por solo orgânico e argila, e, por fim, de 8,60 m a 8,74 m, encontra-se uma camada de argila a argilosa siltosa (figura 22).

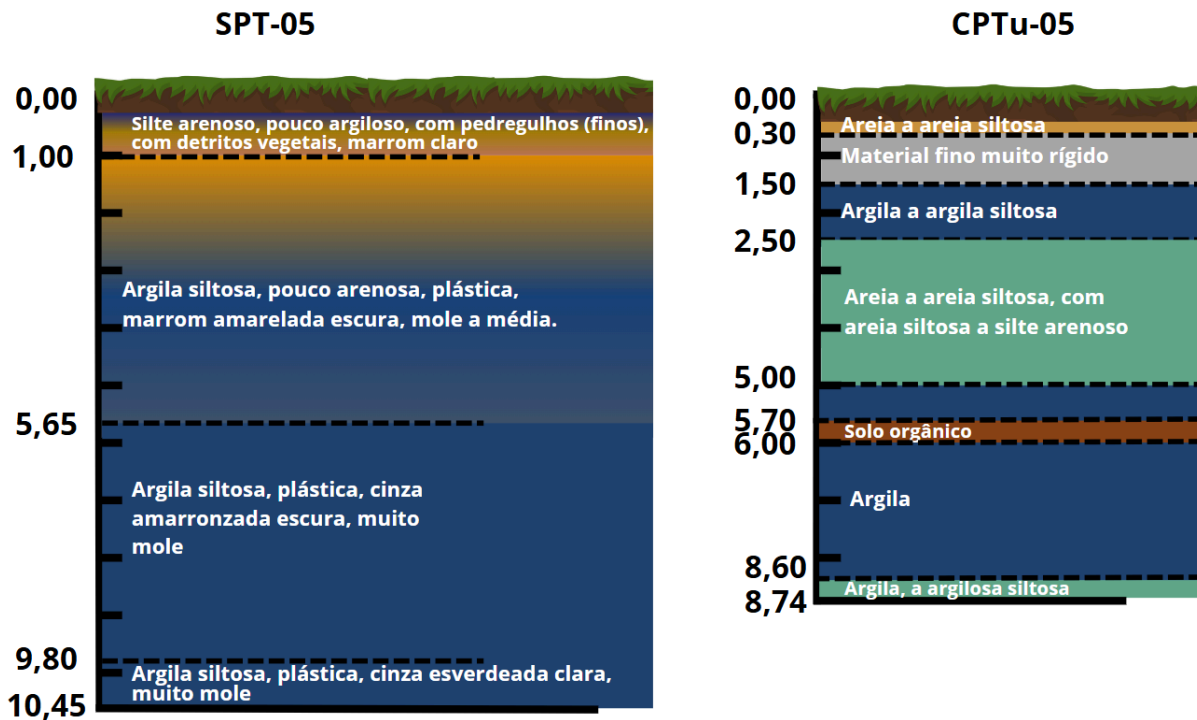


Figura 22- Perfil de solo, SPT x CPTu, ilha 05.

6. DISCUSSÃO

6.1 Interpretação das camadas obtidas em cada ensaio.

Na análise dos perfis de SPT-02 e SPT-05, bem como CPTu-02 e CPTu-05, as características dos solos se alinham com a Formação Floriano, conforme descrito na literatura sobre a Bacia de Resende, por Riccomini (1989), Ramos et al. (2006) e Aguiar (2016).

As camadas abaixo do aterro nos perfis CPTu e SPT podem ser tratadas como um conjunto de solos transportados depositados em ambientes fluviais de baixa energia. Estas camadas são compostas majoritariamente por argilas e siltes, com características que apontam para uma deposição em áreas onde a dinâmica de fluxo é reduzida, permitindo o acúmulo de sedimentos finos e, em alguns casos, matéria orgânica, como apontado em Ramos et al. (2006).

No perfil SPT-02, por exemplo, há uma sequência de argilas plásticas entre 2,00 e 4,00 metros de profundidade, com coloração preta e turfosa. Estes solos, com alta presença de material orgânico, são comuns em zonas de baixa corrente, como planícies de inundação e áreas marginais de canais fluviais, onde sedimentos suspensos gradualmente se assentam, como aponta Aguiar (2016). De forma semelhante, SPT-05 apresenta argilas siltosas entre 5,65 e 10,45 metros, também indicando um ambiente de baixa energia, caracterizado por sedimentos finos que se acumulam ao longo do tempo.

Essa dinâmica deposicional é sustentada por Ramos et al. (2006), que descreve o ambiente da Formação Floriano como associado a sistemas fluviais onde solos transportados de granulometria fina tendem a se acumular em áreas de menor intensidade de fluxo, como planícies de inundação e zonas de deposição marginal. Aguiar (2016) também reforça essa caracterização ao descrever as camadas finas e ricas em material orgânico, comuns em ambientes de baixa energia na Bacia de Resende e que são característicos da deposição em ambientes fluviais meandrantés, que favorecem o acúmulo de argilas e siltes.

Além disso, na Ilha 02 foi encontrado solo residual associado à Formação Resende. Esse solo residual, resultante da decomposição direta do substrato rochoso, revela a ação prolongada de processos intempéricos, indicando que, nesta região, há camadas não apenas de deposição fluvial recente, mas também de material residual da própria formação geológica local. Isso sugere uma transição entre os solos transportados mais recentes e o substrato rochoso da Formação Resende, como descrito por Ramos et al. (2006) e Melo et

al. (1985), ao detalhar as características das sequências sedimentares e da camada de solo residual associada à formação.

Portanto, ambos os perfis revelam solos com predominância de materiais argilosos de consistência mole a muito mole, corroborando a descrição da Formação Floriano como uma unidade sedimentar constituída por arenitos e lamitos avermelhados e estratificações cruzadas, depositados em um sistema fluvial meandrante. Esses perfis são um reflexo dos processos sedimentares da bacia, e a transição entre as camadas revela uma estrutura que acompanha o comportamento fluvial descrito por Ramos et al. (2006) e Aguiar (2016), com variações na granulometria e na composição de sedimentos moldados pela deposição fluvial.

6.2 Comparação entre o CPTu e SPT

Na discussão dos resultados entre o SPT e o CPTu no perfil 2, observa-se que ambos os ensaios fornecem informações relevantes, apresentam semelhanças no perfil de solos, mas diferem na precisão.

O ensaio SPT-02 foi interrompido a 10,45 metros por decisão do contratante, com o nível d'água identificado a 3,75 metros. Este ensaio revelou camadas predominantemente argilosas, com o solo superficial constituído de silte arenoso até 2 metros e uma sequência de argilas muito moles e orgânicas até 10 metros, indicando um solo pouco resistente e de baixa compactidade. A camada final, composta por silte argilo-arenoso de consistência dura, demonstra uma transição para um solo residual mais estável. Souza (2017) destaca que o SPT é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo e simplicidade, porém apresenta limitações, principalmente em solos argilosos, onde a variabilidade dos resultados e a dependência da habilidade do operador reduzem a precisão dos dados. Essas limitações foram evidentes no SPT-02, onde o solo de baixa resistência (valores baixos de NSPT) não possui uma interpretação confiável, uma característica comum em solos de alta saturação e baixa resistência.

Por outro lado, o ensaio CPTu-02, que alcançou 10,59 metros, oferece uma visão contínua das propriedades do solo, permitindo a identificação detalhada das variações de material, incluindo camadas arenosas e argilosas intercaladas com lentes de areia siltosa e solos finos sensíveis. Como observado nos gráficos, a sequência inicial apresenta areia a areia siltosa até 1,50 metros, seguida por transições de argilas com lentes de areia siltosa de 3,00 a 9,50 metros. Schnaid e Odebrecht (2012) argumentam que o CPTu é mais adequado para solos argilosos devido à sua capacidade de medir parâmetros como

poropressão e resistência de ponta, fornecendo uma maior confiabilidade em solos de alta compressibilidade e baixa resistência, como evidenciado no perfil da Ilha 02. O nível d'água, observado a 3,75 metros, confirmou a continuidade dos dados do SPT, reforçando a consistência da interpretação hidrostática local.

Esses resultados corroboram a complementaridade sugerida por Schnaid e Odebrecht (2012) e Costa et al. (2022), indicando que ambos os ensaios podem oferecer uma caracterização robusta do perfil geotécnico quando utilizados em conjunto. O SPT provê uma base econômica e inicial para solos granulares, enquanto o CPTu contribui com a profundidade de dados necessários para solos argilosos complexos, como os observados na Bacia de Resende. A integração dos dois métodos permite uma visão mais precisa e detalhada, essencial para o dimensionamento seguro e eficiente de fundações em áreas com solos de baixa resistência e alta compressibilidade.

A comparação entre os métodos confirma que, enquanto o SPT é vantajoso em termos de custo e aplicabilidade prática, seu desempenho em solos moles e com variações finas é limitado. Já o CPTu, apesar do custo mais elevado e da sensibilidade a picos de resistência, fornece uma caracterização detalhada e contínua, identificando camadas não detectáveis pelo SPT, o que é crucial para projetos que exigem precisão na análise das camadas do solo e na previsão de recalques, como destacado por Costa et al. (2022). Isso demonstra, conforme discutido por Souza (2017), que o CPTu é uma ferramenta essencial para a caracterização de solos onde a variação de resistência ao cisalhamento e compressibilidade é significativa, especialmente em solos moles e saturados.

6.2.1 Ensaio de Dissipação

No CPTu-02, o valor de t_{50} de 1168 segundos indica que o solo levou um tempo relativamente curto para dissipar metade da pressão de poro aplicada durante o ensaio, o que sugere uma permeabilidade moderada e que facilita a dissipação das pressões. Contudo, a baixa condutividade hidráulica (k_h) de $6,88 \times 10^{-9}$ m/s aponta para características argilosas do solo, que possui grãos finos e, portanto, baixa permeabilidade do solo. Esse perfil é compatível com a predominância de solos argilosos na área de estudo, nos quais a água encontra dificuldades para fluir entre os poros, ainda que haja certa permeabilidade inicial. Além disso, o coeficiente de consolidação horizontal (Ch) de $1,88 \times 10^{-6}$ m²/s (ou aproximadamente 59 m²/ano) indica um processo de consolidação lento. O módulo de compressibilidade de 2,68 MPa, por sua vez, revela uma baixa resistência do solo à compressão. A razão de rigidez (G/S_u), de 713,09, mostra alta rigidez relativa em relação à resistência ao cisalhamento, o que é vantajoso em situações de carga

lateral, como em fundações sujeitas a forças horizontais, segundo Robertson e Campanella (1989).

Na Ilha 05, o ensaio de dissipação realizado em profundidades de 6,72 metros e 8,74 metros revelou variações importantes nas propriedades do solo. A uma profundidade de 6,72 metros, a razão de rigidez (G/S_u) foi de 933,48, significativamente mais alta em comparação àquela obtida em 8,74 metros (de apenas 100,00). Esse dado sugere uma maior rigidez relativa nessa profundidade, possivelmente em uma camada menos compressível. O coeficiente de consolidação horizontal (C_h), com valor de $3,27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, indica que o solo nesta profundidade é mais permeável, característica que pode estar associada à presença de partículas mais grossas ou menor grau de compactação, resultando em menor resistência à dissipação de poropressão. Já na profundidade de 8,74 metros, os resultados mostraram menor rigidez e permeabilidade, refletidas em uma razão de rigidez (G/S_u) de 100,00 e uma condutividade hidráulica (k_h) de $1,04 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Esses valores sugerem que o solo nesta profundidade é mais coeso e argiloso, com baixa capacidade de dissipação de pressão, o que pode indicar a necessidade de reforço adicional ou fundações mais profundas devido à menor resistência e alta compressibilidade, segundo Schnaid e Odebrecht (2012). A rigidez média (M), de 0,78 MPa, menor que a registrada em 6,72 metros, reforça essa observação, indicando um solo compressível e de resistência limitada.

Essa análise revela camadas de solo com diferentes características de rigidez e permeabilidade em diversas profundidades, aspectos fundamentais para a previsão de recalques diferenciais e para o projeto de fundações, destacando a importância do CPTu na análise geotécnica, pois ele permite acesso direto a parâmetros que seriam obtidos de forma indireta e menos precisa pelo SPT.

6.2.2 Quando utilizar o SPT ou o CPTu

O ensaio SPT é particularmente útil em situações onde é necessário coletar amostras do solo para análises laboratoriais, permitindo determinar características como granulometria e plasticidade, fundamentais para a classificação dos solos segundo normas como a NBR 6484:2020 (Schnaid e Odebrecht, 2012). Costa et al. (2022) apontam que o SPT também é preferido em solos grossos, como aqueles com pedregulhos, onde o CPTu pode ter dificuldades de penetração.

Por outro lado, o CPTu é mais adequado para uma caracterização contínua e detalhada do perfil do solo, sendo ideal para solos moles e saturados onde a identificação precisa das camadas é fundamental (Souza, 2017). Esse ensaio fornece um registro

contínuo de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e pressão de poro (u_2), sendo essencial em análises de liquefação e recalques, pois permite uma avaliação precisa do comportamento em condições críticas (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Em casos onde são necessários parâmetros geotécnicos mais detalhados para o projeto, recomenda-se o uso do ensaio CPTu, que permite obter diretamente valores essenciais como densidade relativa, capacidade de carga e dados específicos de dissipação da pressão de poro.

7. CONCLUSÕES

Este estudo confirmou o cumprimento dos objetivos propostos, demonstrando que os ensaios CPTu e SPT foram comparados de maneira eficaz quanto às suas vantagens e limitações. A elaboração de perfis de solo possibilitou correlacionar informações litológicas com parâmetros físicos do solo. Além disso, as metas específicas foram atingidas de maneira sistemática. O levantamento bibliográfico estabeleceu uma base sólida para o entendimento teórico, enquanto a execução dos ensaios seguiu os protocolos estabelecidos, resultando em dados consistentes para análise. A comparação entre os métodos identificou discrepâncias esperadas, como a maior sensibilidade do CPTu em solos argilosos de baixa resistência e a limitação do SPT em fornecer informações contínuas. A discussão fundamentada das diferenças reforçou a compreensão das capacidades e limitações de cada técnica, contribuindo para a aplicabilidade futura dos métodos em diferentes contextos geotécnicos

A análise dos perfis revelou a predominância de solos argilosos de consistência mole a muito mole, indicando ambientes de deposição de baixa energia, como planícies fluviais. A identificação de solos residuais associados à Formação Resende acrescenta uma camada de complexidade ao perfil estratigráfico, evidenciando uma transição entre sedimentos fluviais recentes e materiais de origem residual. Esse aspecto ressalta a importância do conhecimento da geologia local e da seleção cuidadosa do método de ensaio, uma vez que cada tipo de solo responde de forma distinta às técnicas aplicadas, impactando diretamente na interpretação e na segurança do projeto.

A integração entre SPT e CPTu mostrou-se vantajosa, confirmando que o uso conjunto desses métodos resulta em uma caracterização geotécnica mais completa e confiável. Este estudo conclui que, em projetos onde a economia é uma prioridade e as camadas de solo são relativamente homogêneas, o SPT pode ser uma opção prática, além do fato de que a norma de fundações NBR 6122 (2020) exige este ensaio para projetos de fundações. Entretanto, para solos com baixa resistência ou onde são esperadas variações finas, o investimento no CPTu se justifica pela precisão e pela segurança que proporciona ao projeto, sendo especialmente útil na previsão de recalques e na detecção do nível d'água.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT: NBR 12069- MB 3406, (1991). Ensaio de Penetração de Cone In Situ (CPT) – Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT: NBR 6122 (2022). Projeto de execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT: NBR 6484 (2020). Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT: NBR 6502 (2022). Rochas e solos — Terminologia. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Aguiar, L. G. S. de. Mapeamento geológico e análise litofaciológica da Formação Resende na extremidade oeste da Bacia de Resende (RJ). 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- Alves Filho, C. E. S. (2010). Correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos de argilas compressíveis com utilização do penetrômetro dinâmico leve. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO.
- Amador, E.S. Estratigrafia e sedimentação na Bacia de Resende – RJ. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, p. 181-223, 1975.
- ASTM International. (2005). ASTM D3441-05: Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2007). ASTM D5778-07: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2012). ASTM D5778-12: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Begemann, H. K. S. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proceedings of the 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Montreal, v. 1, p. 17- 20. 1965.
- Costa, G. F., Caetani, B. C., Jesus, J. J., Sampa, N. C., & Alves, P. E. O. Interpretação dos Resultados de Ensaios SPT e CPTu Realizados no Município de Biguaçu – SC. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens, XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia. Campinas-SP: 2022.

- Escobar, I. Estudo regional da Bacia de Resende com base no método gravimétrico. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – MODESTHI, Relatório Final, 26 p., 1999
- Houlsby, G. T.; Teh, C. I. Analysis of the piezocone in clay. In: DE RUITER, J. (ed.). Penetration Testing 1988, ISOPT-1. Rotterdam: Balkema, 1988. ISBN 90 6191 801 4.
- Lunne, T.; ROBERTSON, P. K. & POWELL, J.J.M. Cone Penetration Testing. Londres: Blackie Academic & Professional. 1997.
- Mayne, P. W. Regional Report for North America. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA USA. 1995.
- Melo, M.S.; RICCOMINI, C.; CAMPANHA, G.A.C.; MIOTO, J.A.; ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; GIMENEZ, A.F. Estudos geológico-tectônicos na Bacia de Resende (RJ) e sedimentos terciários de Volta Redonda (RJ) e Bacia de Taubaté (área de Cruzeiro – SP). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Relatório, n. 17.737, 124 p., 1983.
- Melo, M.S.; RICCOMINI, C.; ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. Sedimentação e tectônica da Bacia de Resende – RJ. Anais da Academia Brasileira Ciências, v. 57, n. 4, p. 467-479, 1985.
- Miall, A.D. Architectural elements analysis: a new method on facies analysis applied to fluvial deposits. Earth Science Reviews, v. 22, n. 4, p. 261-308, 1985.
- Miall, A.D. The geology of fluvial deposits. Berlin: Springer-Verlag, 582 p., 1996.
- Ramos, R.R.C. Sistemas aluviais terciários da Bacia de Resende, Estado do Rio de Janeiro, Brasil: análise de fácies e revisão estratigráfica. Rio de Janeiro, 2003. 221 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Ramos R.R.C., Mello C.L., Sanson M.S.R. 2006. Revisão Estratigráfica da Bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, Estado do Rio de Janeiro. São Paulo, UNESP, Geociências., 25:59-69.
- Riccomini, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo, 1989. 256 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Departamento de Geologia, Universidade de São Paulo.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G.; & Wightman, A. (1983). “SPT-CPT correlations”, in: J. Geotech. Engng, 109 (11), 1449-1459. New York: ASCE.
- Robertson, P. K. “Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc. 2010.

- Robertson, P.K., SULLY, J.P., WOELLER, D.J., LUNNE, T., POWELL, J.J.M., AND GILLESPIE, D.G. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests. Canadian Geotechnical Journal. 1992.
- Robertson, P.K., WRIDE, C.E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal 35 (3): 442-459. 1998.
- Schmertmann, J.H. Guidelines for cone penetration test, performance and design, US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report FHW-TS-78- 209. 1978.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. ISBN: 978-85-7975-059-5. eISBN: 978-97-8857-975-9.
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2000). *Ensaios De Campo - E Suas Aplicações À Engenharia*. (s.n.). ISBN: 8586238139.
- Souza, L. M. (2017). *Software para análise e interpretação de resultados de ensaios CPT e CPTu*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Wroth, C.P. The Interpretation of In Situ Soil Tests. Twenty Fourth Rankine Lecture, GÉOTECHNIQUE 34, NO. 4, PP 449-489. 1984