



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA ANÁLISE DAS ENCOSTAS DO RIO  
AMAZONAS: UM ESTUDO DE CASO**

**MARIA CAROLINA LIRA DE OLIVEIRA**

**Belém - PA  
Junho/2023**

MARIA CAROLINA LIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA ANÁLISE DAS ENCOSTAS DO RIO  
AMAZONAS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Marcelo Rassy Texeira

**Belém - PA  
Junho/2023**

MARIA CAROLINA LIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA ANÁLISE DAS ENCOSTAS DO RIO  
AMAZONAS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Belém, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Examinadores

---

Professor Dr. Marcelo Teixeira Rassy  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Orientador(a)

---

Professor M.Sc Antônio Malaquias Pereira  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Membro da banca

---

Professor Dr. Tony Carlos Dias da Costa  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Membro da banca

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais José Joaquim e Valderlene Oliveira por todo o apoio, amor, e por serem minha base. A minha mãe e meu namorado Conrado, que estão comigo nas pequenas vitórias e desafios do dia-a-dia. As colegas de curso Priciane e Karita, que deixaram a jornada de estagio e faculdade mais leve. Ao professor Marcelo Rassy, pela orientação e apoio na realização desse trabalho.

## RESUMO

Oliveira, M. C. O. **PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA ANÁLISE DAS ENCOSTAS DO RIO AMAZONAS: UM ESTUDO DE CASO**. 2023. 42 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

O fenômeno terras caídas é um tipo de deslizamento de encostas que acontece nas margens de rios amazônicos de águas brancas. Os efeitos desses deslizamentos podem ser devastadores, prejudicando o dia a dia e trazendo riscos para a população local. Diante dos malefícios causados por esse fenômeno é notório a necessidade de investigação das causas e identificação dos locais que sujeitos a esse deslizamento de terra. O caso do deslizamento de terra ocorrido na cidade de Santana/AP relaciona o fenômeno terras caídas com a ocorrência de sensibilidade no solo. Este trabalho é uma pesquisa bibliográfica, com o objetivo geral de propor um protocolo de análise para encostas do rio Amazonas; e objetivos específicos de identificar as possíveis causas desse fenômeno; compreender quais ensaios são necessários para o mapeamento de áreas de risco; e analisar os resultados do ensaio de Piezocone (CPTU) e eletrorresistividade. O protocolo proposto é composto por ensaios de campo e laboratório e dividido em 3 etapas: ensaio de eletrorresistividade; ensaio de Piezocone (CPTU); e, difratometria de raio x (DRX).

Palavras-chave: terras caídas; deslizamento de terra; CPTU; Eletrorresistividade, sensibilidade.

## ABSTRACT

Oliveira, M. C. O. **Protocol Proposal For Analysis Of the Riverbanks Of Amazonas River: Case Study**. 2023. 42 f. Undergraduate final project (Civil Engineering Graduation) – Faculty of civil Engineering, universidade federal do Pará, Belém.

The “terras caídas” phenomenon is a type of landslide that happens mostly at riverside and riverbank areas of Amazon rivers classified as “água branca”. The consequences of those landslides can be harmful and affecting the everyday lives of the locals. Considering the risk that this phenomenon can cause, it is noticeable the necessity of investigation of its causes, and identification of the spots that the “terras caídas” is more likely to happen. The landslide case that happened in Santana/AP relates the phenomenon with the sensibility of the soil. This Project is a bibliographical research, with the main objective of propose a protocol for analysis of the Riverbanks Of Amazonas River and specific objectives of identify the possible causes for this phenomenon; understand which tests are necessary to locate the risky areas; analyse the results of the piezocone test (CPTU), eletrorresistivity. The protocol proposed is composed of 3 stages: eletrorresistivity test; piezocone test (CPTU); and, ray-x diffractometry.

Palavras-chave: Terras caídas; Landslide; CPTU; eletrorresistivity, sensitivity.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1:** Rua destruída em São Paulo de Olivença.

**Figura 2:** Deslizamento de terra em São Paulo de Olivença.

**Figura 3:** Pontos críticos da orla da cidade (A, B, C e D) atingidos pela erosão lateral.

**Figura 4:** Locais da cidade de Paritins atingidos pelas terras caídas.

**Figura 5:** Localização das zonas 3 (ilha A, B e C) delimitadas no estudo.

**Figura 6:** Argila de alta sensibilidade, a direita no estado indeformado; e, a esquerda, no estado amolgado

**Figura 7:** Escala de classificação de argilas sensíveis de Skempton e Northey (1952).

**Figura 8:** Escala de classificação de argilas sensíveis de ROSENQVIST (1953).

**Figura 9:** Tipo de estruturas de agregados flocoados

**Figura 10:** Efeito causado pela lixiviação na estrutura de uma argila

**Figura 11:** Valores característicos de CTC para cada argilomineral.

**Figura 12:** estrutura de duas lamelas de montmorilonita.

**Figura 15:** Ábaco de Robertson (1990) de identificação do comportamento típico de solos

**Figura 16:** Classificação de Robertson (1990) dos solos por tipo de comportamento

**Figura 17:** representação esquemática de um difratômetro de raio X

**Figura 18:** Exemplo de difratograma.

**Figura 19:** local do estudo geofísico

**Figura 20:** Legenda do modelo de interpretação do perfil geoeletrico.

**Figura 20:** Perfil geoeletrico L16.

**Figura 21:** Modelo de resistividade real do perfil L3.

**Figura 22:** Perfil geoeletrico L3. Fonte: Teixeira (2021) p. 22

**Figura 23:** Modelo de resistividade real do perfil L28

**Figura 24:** Perfil geoeletrico L28.

**Figura 25:** Ábacos SBT baseados nos parâmetros obtidos pelo ensaio de CPTU na ilha A. (a) Robertson  $Q_t \times F_r$  (1990); (b) Robertson (2016)

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CPRM – da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

CPTU – Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurment.

DRX – difratometria de raio-X.

TUP – Terminal de uso privativo.

IL – Índice de liquidez

LL – Limite de liquidez

Sur – resistência ao cisalhamento na condição amolgada

Su – resistência ao cisalhamento na condição indeformada

St – Sensibilidade

IA – índice de atividade

CTC – capacidade de troca catiônica

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Motivação .....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Terras caídas e a erosão fluvial.....	15
2.2 Caso de terras caídas - Parintins/am .....	16
2.3 Caso do terminal de uso privativo (TUP) do Porto de Santana.....	18
2.4 Sensibilidade das argilas moles.....	20
2.5 Causas da sensibilidade no solo .....	22
2.5.1 Comportamento metaestável da argila.....	22
2.5.2 Lixiviação .....	23
2.5.2 Presença de matéria orgânica .....	24
2.5.3 Outros fatores.....	24
2.6 Identificação de solos sensíveis .....	25
2.7 Capacidade de troca catiônica (ctc) e o índice de atividade das argilas (IA).....	25
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 Eletrorresistividade.....	29
3.2 CPTU .....	29
3.3 Caracterização química do solo (difratometria de raio x) .....	32
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	33
4.1 Ensaio de eletrorresistividade realizado no terminal de uso privativo (tup) do Porto de Santana.....	33
4.2 Ensaio CPTU realizado no Tup do Porto de Santana .....	37
5. CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	42

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de deslizamento de terra, proveniente de erosão fluvial lateral, é um evento comum observado ao longo das margens dos rios amazônicos e é conhecido popularmente como fenômeno "terras caídas". Esse fenômeno é de origem natural, causado principalmente pelas interações de fatores geomorfológicos e fluviais. Os efeitos das terras caídas variam de intensidade, podendo ser imperceptíveis ou devastadores e chegar a erodir grandes volumes de terra. Os transtornos causados a população ribeirinha afetam a circulação de vias, o embarque e circulação de embarcações, causando até evacuação de zonas de risco e perda de propriedades. (FREITAS, 2008)

Um caso de terras caídas observado na literatura foi o deslizamento de terra ocorrido no terminal de uso privativo (TUP) de minérios de ferro do Porto de Santana, que está localizado no município de Santana/AP, na região de foz do rio Amazonas. É o principal porto do Amapá, responsável pela exportação de commodities e outros bens. O local é alvo de investigação geotécnica e geológica devido aos sinistros ocorridos em duas ocasiões, 1993 e 2013. O estudo realizado por Goncalves (2019) revelou que o perfil geológico da região do TUP é caracterizado como depósitos flúvio-marinhos holocênicos, sendo composto por sedimentos argilo-arenosos e argilo-siltosos. No mesmo estudo foram detectados dois fatores de instabilidade para o substrato de acordo com parâmetros geotécnicos: a heterogeneidade do pacote argiloso do substrato, que é intercalado com material orgânico; e, a grande extensão dos depósitos sedimentares de argila mole da região, que em alguns pontos chega a atingir 50 metros de espessura. Conclui-se no estudo que mais de 50% dessa argila apresenta sensibilidade.

Um relatório técnico publicado pelo governo do estado do Amazonas, em 2011, revelou que 18 municípios do estado do Amazonas estavam sendo atingidos pelas terras caídas. Dentre esses, os municípios de Parintins e de São Paulo de Olivença foram classificados como de alto risco.

**Figura 1:** Rua destruída em São Paulo de Olivença.



Fonte: Marques, 2017. pág. 96.

**Figura 2:** Deslizamento de terra em São Paulo de Olivença.



Fonte: Globo notícia, 2010.

Diante dos prejuízos causados à população por esse fenômeno, é indispensável o desenvolvimento de processos de identificação de áreas suscetíveis ao fenômeno de terras caídas, com o intuito de mitigar o risco a vida e a propriedade que a população ribeirinha está sujeita, além de possibilitar uma ocupação mais ordenada das margens do rio Amazonas. O objetivo geral deste trabalho é propor um protocolo de análise das encostas do rio Amazonas, através dos objetivos

específicos: identificar as possíveis causas desse fenômeno; compreender quais ensaios são necessários para o mapeamento; e analisar os resultados do ensaio de Piezocone (CPTU), eletrorresistividade, e difratometria de raio X (DRX).

### **1.1 Motivação**

Segundo Carvalho (2006), “Terras caídas” é a terminologia usada para designar o processo de erosão fluvial lateral das margens de um rio, que ocasionam, indiferentemente, escorregamento, deslizamento, desmoronamento e desabamentos de terra. É um fenômeno complexo, produto de uma série de fatores de origem hidrológica, morfológica, e, em menor escala, antropológica.

O rio Amazonas é classificado como um rio de “água Branca”. Os rios com essa classificação têm origem na região andina e pré andina, onde a alta ocorrência de erosão torna-os carregados de sedimentos em suspensão. Apesar da classificação, a água desses rios tem aparência barrenta e turva. Outros rios amazônicos que também são de água branca são os rios Madeira, Purus e Juruá.

Os cursos dos rios de água branca na Amazônia são muito instáveis, pois estão constantemente divagando em seus sedimentos e remodelando seus leitos, sobretudo na zona de transferência e de deposição, influenciando sobremaneira no modo de vida das populações que habitam suas margens (CARVALHO, 2006). P.34

O fenômeno terras caídas é observado com maior frequência em rios de água branca margeados por planícies de formação holocênicas. Os depósitos sedimentares holocênicos apresentam em sua composição sedimentos finos arenosos pouco coesos, tornando-os mais propícios a agentes erosivos.

De acordo com Marques (2017) “A capacidade de transformação desse fenômeno é amplamente conhecida na região e desde o século XVII já impressionava naturalistas, viajantes e cronistas que navegaram pelos rios amazônicos.” P.17

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 – Terras caídas e a erosão fluvial

Chistofolletti (1981) define erosão fluvial como processo de retirada de material do leito e das margens de um rio, integrando-os a carga sedimentar do curso d'água. Esse processo ocorre em três etapas, corrosão, corrasão ou abrasão e cavitação. A etapa de corrosão engloba os processos químicos que podem ocorrer entre a água e o solo ou rocha que está em contato, causando desgaste e desagregação do solo ou corpo rochoso. A corrosão é mais frequente em regiões de temperatura elevada.

A corrasão ou abrasão está relacionada com o desgaste provocado pelo atrito mecânico das partículas carregadas pela água com o solo ou corpo rochoso das margens e leito dos rios. O tipo de corrasão mais expressivo é aquele em que ocorre o aprofundamento do canal fluvial, ocasionado pelo atrito da carga do leito do rio. O material em solução e suspensão são sedimentos finos e não tem capacidade abrasiva de constituir agente ativo de erosão lateral.

A cavitação ocorre quando a água sofre aumento de velocidade, causada por alteração na declividade do canal, condição que causa variação de pressão e impacto hidráulico sobre as paredes do canal. Chistofolletti (1981, apud Hjulstrom, 1935) afirma que a velocidade mínima para ocorrer a cavitação é de 12m/s. Já Barnes (1956), propõe uma equação para a obtenção da velocidade média necessária para ocorrer a cavitação, onde a velocidade vai depender dos valores do raio hidráulico e declividade, como mostra a equação X.

$$\bar{V} = 97 \cdot r^{0,52} \cdot s^{0,4} \quad (1)$$

onde:

$\bar{V}$  = velocidade média necessária para a cavitação

$r$  = raio hidráulico =  $\frac{\text{área da seção transversal}}{\text{perímetro úmido}}$

$s$  = declividade = seno do ângulo de inclinação

A velocidade do rio Amazonas no seu curso médio e inferior chega, no máximo, a 7km/h e é insuficiente para a cavitação ter um efeito erosivo expressivo. No entanto a sua alta vazão é considerada um dos principais agentes erosivos. Para Carvalho (2009) “É essa vazão descomunal do rio Amazonas e a forma turbulenta

como as correntes se deslocam no canal, associado à pressão vertical, que sem dúvida, é a maior responsável pela erosão fluvial do rio Amazonas.” P.4

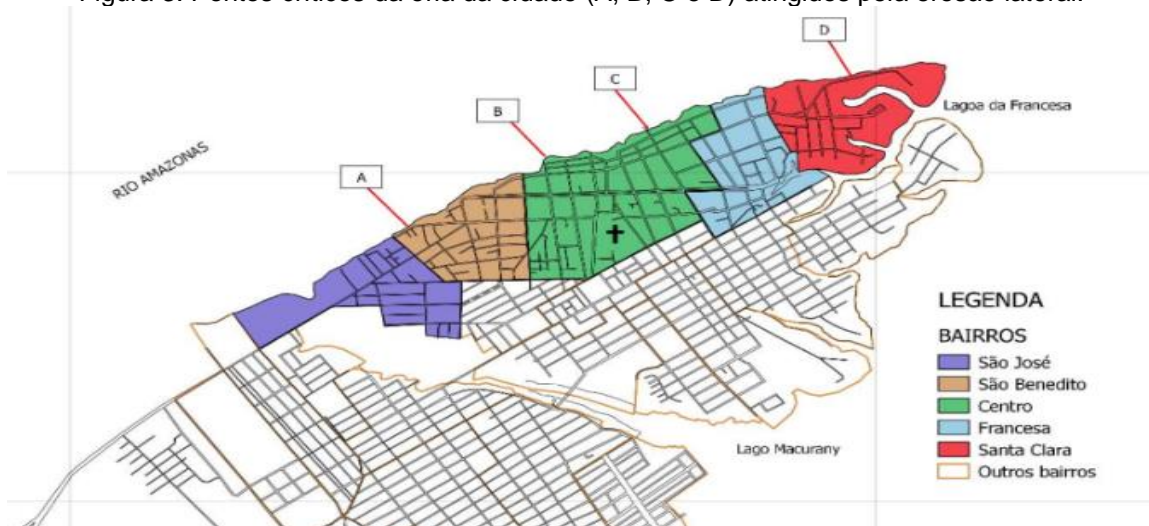
Destaca-se também como fator causador das terras caídas as alterações de pressão hidrostática nas margens, a variação do período de chuva, e, em menor escala, a ação antropogênica. Apesar de ser um fenômeno natural, as ações humanas, como desmatamento de margens e a ação dos banzeiros gerados por embarcações podem acelerar ou intensificar o efeito das terras caídas.

Durante o período de vazante, o nível d'água da margem não consegue acompanhar a velocidade de vazante do nível do rio (24cm/dia). Essa situação deixa água retida no pacote sedimentar, aumentando a pressão hidrostática. A situação é semelhante durante o período chuvoso, que também o pacote sedimentar fica saturado.

## 2.2 - Caso de terras caídas - Parintins/AM

A cidade de Parintins é a segunda cidade mais populosa do estado do Amazonas, depois da capital Manaus. A área de investigação do estudo compreende a extensão de 3,5km de margem, que engloba 5 bairros: São José, Santa Clara, São Benedito, Centro e Francesa. Esses locais apresentam vulnerabilidade ao processo de erosão de margem, um fator de risco para a população. A figura a seguir (3) mostra a região compreendida pelos bairros situados na margem investigada. Os pontos indicados de A até D representam os pontos críticos atingidos pela erosão lateral.

Figura 3: Pontos críticos da orla da cidade (A, B, C e D) atingidos pela erosão lateral.



Fonte: Marques 2017. p 65

A administração pública local tentou conter o processo erosivo com alocação de sacos de areia e cimento, o que se mostrou ineficiente diante do intenso processo erosivo. As ruas Cordovil e Senador Álvaro Maia foram interditadas para a circulação de veículos pela defesa civil do município, por conta do risco de novos desabamentos.

Um trecho da rua Armando Prado, bairro São Benedito, próximo a Colônia dos Pescadores, também foi interditado em cerca de 150 metros, e assim como no local de interdição da rua Caetano Prestes, este foi violado para a passagem de veículos. As propriedades localizadas nesta rua, tiveram vários metros reduzidos pela erosão e a rua Portugal que está localizada no bairro Santa Clara, teve que ser reconstruída alguns metros em relação à antiga via. A intensidade com que a erosão atinge a parte jusante da cidade, fez com que a referida rua voltasse novamente a ser ameaçada e os moradores precisaram se mudar para outros bairros da cidade. (marques, 2017) p. 63 e 64.

Em 2011, o Serviço Geológico do Brasil, através da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM, realizou um dimensionamento dos riscos de erosão de margem na cidade de Parintins. Foi direcionado a prefeitura da cidade, uma série de recomendações de intervenção, sendo uma das principais, a necessidade de construção de muros de contenção com elementos estruturais nas áreas mais suscetíveis a esse fenômeno. no relatório técnico também foi recomendado a retirada de moradores de alguns trechos. (Marques, 2017)

Figura 4: locais da cidade de Parintins atingidos pelas terras caídas.



Fonte: MARQUES (2017) p.66

Segundo dados do CPRM (2010) foram identificadas as seguintes classes de solo na cidade de Parintins: Latossolos Amarelos; Gleissolos Háplicos; Neossolos Flúvicos e Plintossolos Háplicos; sendo os latossolos Amarelos de presença mais expressiva. Essa classe de solo apresenta valor de Ph extremamente a moderadamente ácido; predominância de cargas superficiais líquidas negativas; e, conseqüentemente, valores de capacidade de troca de cátions superiores aos valores de troca de ânions.

A metodologia do trabalho se baseou na obtenção dados batimétricos, análise de dados hidrológicos; análise granulométrica; análise de dados pluviométricos e de velocidade do vento; análise multitemporal por sensoriamento remoto; monitoramento da margem com pinos de erosão e; entrevistas com moradores e instituições públicas.

As medições batimétricas revelaram a profundidade de 98m do talvegue próximo a margem. Uma profundidade elevada, que aumenta a intensidade da pressão hidráulica naquele ponto e dificulta a execução de obras de contenção no local.

Os dados de medições hidrológicas apontados no estudo apontam alta vazão no canal, especialmente em época de cheia, quando o valor médio de vazão chega a 182.180 m<sup>3</sup>/s. Esse fator, associado a maneira turbulenta em que a água se desloca dentro do canal e a posição da margem em um ponto de inflexão do canal fluvial são apontados como as principais causas das erosões analisadas na cidade de Parintins.

É importante também mencionar o efeito da grande concentração de chuva da região nos primeiros quatro meses do ano, que causa infiltração do pacote sedimentar das margens. O índice médio pluviométrico nos meses de março é 380mm, o mais alto registrado no ano, chega a ser 6x maior que o índice pluviométrico mais baixo, registrado nos meses de setembro. "o período de maior índice pluviométrico registrado em Parintins coincide com a subida de nível do rio Amazonas e, assim, associa-se o efeito erosivo causado pelas chuvas [...]" (Marques, 2017) p.119

### **2.3 - Caso do terminal de uso privativo (TUP) do porto de Santana**

O TUP do porto de Santana, no estado do Amapá, está localizado na foz do rio Amazonas. O local sofreu deslizamentos de massa de solo em duas ocasiões, em

1993 e em 2013. O último deslizamento foi caracterizado como um deslizamento de massa rápido e abrupto, pois se deu em poucos segundos e não apresentou sinais prévios no terreno, como rupturas e fissuras. Esse comportamento é típico de flowslide, um deslizamento retrogressivo de massa causado pela presença de argila de alta sensibilidade, quando amolgada. (Barreto, 2015)

A estratigrafia do local é marcada pela presença de sedimentos fluviomarinhos do período quaternário e sedimentos lateríticos do período terciário. Os sedimentos fluviomarinhos são compostos majoritariamente por argila com alto teor de matéria orgânica. A composição dos sedimentos do terciário inclui arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados.

O estudo realizado por Gonçalves (2022) dividiu o local analisado em três ilhas A, B e C; onde foram realizados primeiramente ensaios de CPTU em cada uma das ilhas de investigação. Amostras de solo foram coletadas na profundidade em que o ensaio de CPTU indicou a presença de argila sensível. A partir das amostras, foram realizados ensaios de compressão simples, análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e umidade da amostra.



Os resultados obtidos pelo ensaio de CPTU revelaram a presença de argila de alta sensibilidade na subsuperfície de cada uma das três ilhas. O ensaio de compressão não confinada corroborou com os resultados do CPTU, que também

detectou a presença de argilas sensíveis. Nas 3 ilhas A, B e C, o valor de sensibilidade obtido pelo ensaio de compressão não confinada variou de 3,3 a 12,7, sendo a média aritmética de 7,06. De acordo com a NBR 6502, esses valores classificam as amostras obtidas como “sensíveis” a “muito sensíveis”. O estudo inferiu que aproximadamente 50% das argilas da região podem ser consideradas sensíveis.

O laudo pericial realizado por TEIXEIRA (2019) revelou o efeito da ação antrópica no sinistro ocorrido na região do TUP. Durante as etapas de atracação e desatracação das embarcações no porto, pode haver efeito erosivo nas margens, ocasionado pelo cilindro de vórtice formado pela hélice dos barcos e navios. Segundo o laudo, essa movimentação das embarcações afetou diretamente ou indiretamente a estabilidade do talude, havendo 25% de chance de que o sinistro tenha sido causado pela ação das embarcações.

Destaca-se também a composição geológica do substrato da região, que se caracteriza pela presença de camadas de sedimentos argilo-arenosos e argilo-siltosos; sendo a sua formação geológica denominada como depósitos fluviomarinhas holocênicos. O resultado das sondagens realizadas revelou a presença intercalada de material orgânico nas camadas argilosas, com fragmentos decimétricos e centimétricos, e, também de organismos microscópicos. A análise microscópica indicou porosidade e índice de vazios nos locais com alto índice de matéria orgânica. Essa heterogeneidade no pacote deposicional da região é um indicativo de fragilidade e sensibilidade.

#### **2.4 - Sensibilidade das argilas moles**

A elevada sensibilidade do solo em áreas de encosta é um fator preponderante para a ocorrência do fenômeno de terras caídas, pois solos com essa classificação apresentam baixa tensão admissível quando comparado com outros tipos de solo, além de perda considerável de resistência ao cisalhamento quando amolgado.

A sensibilidade de um solo argiloso é um parâmetro medido pela razão entre a resistência ao cisalhamento não drenada na condição indeformada pela resistência ao cisalhamento não drenada na condição amolgada. Ela mede o quanto de resistência ao cisalhamento o solo perde quando amolgado. (Bertuol, 2009). Essa relação é mostrada pela equação 2.

$$St = \frac{Su}{Su_r} \quad (2)$$

Onde:

$St$  é a sensibilidade.

$Su$  é a resistência ao cisalhamento não drenada na condição indeformada.

$Su_r$  é a resistência ao cisalhamento não drenada na condição amolgada.

**Figura 6:** argila de alta sensibilidade, a direita no estado indeformado; e, a esquerda, no estado amolgado



**Fonte:** (Barreto, 2015).

Há duas tabelas clássicas de classificação da sensibilidade em argilas. A primeira foi proposta por Skempton e Northey (1952), e a segunda por Rosenqvist (1953). As tabelas são mostradas nas figuras 7 e 8 a seguir:

**Figura 7:** Escala de classificação de argilas sensíveis de Skempton e Northey (1952)

Sensibilidade	Classificação
$S_t = 1$	Argilas insensíveis
$1 < S_t < 2$	Argilas de baixa sensibilidade
$2 < S_t < 4$	Argilas de média sensibilidade
$4 < S_t < 8$	Argilas sensíveis
$S_t > 8$	Argilas extrassensíveis
$S_t > 16$	Argilas rápidas

**Fonte:** (Barreto, 2015). p.40

**Figura 8:** Escala de classificação de argilas sensíveis de ROSENQVIST (1953).

Sensibilidade	Classificação
$S_t = 1$	Argilas insensíveis
$1 < S_t < 2$	Argilas levemente sensíveis
$2 < S_t < 4$	Argilas medianamente sensíveis
$4 < S_t < 8$	Argilas muito sensíveis
$8 < S_t < 16$	Argilas levemente rápidas
$16 < S_t < 32$	Argilas medianamente rápidas
$32 < S_t < 64$	Argilas muito rápidas
$S_t > 64$	Argilas extra-rápidas

Fonte: (Barreto, 2015). p.40

As argilas rápidas ou *quickclays* são argilas com valor de sensibilidade maior que 16, de acordo com a classificação de Skempton e Northey (1952). Elas apresentam comportamento fluido-viscoso quando amolgadas (Barreto, 2015). O fenômeno de deslizamento de terra conhecido como *flowslide*, está associado a presença desse tipo de material. Esse tipo de deslizamento é caracterizado como um ou mais deslizamentos retrogressivos que ocorre em poucos segundos.

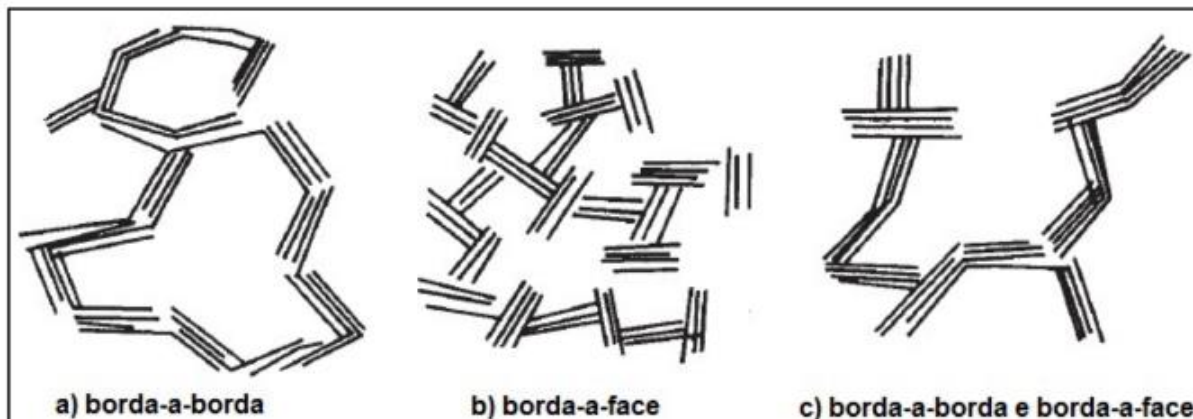
### 2.5.1 – Causas da sensibilidade no solo

Existem fatores que, isolados ou combinados, podem ocasionar sensibilidade em uma argila, são eles: arranjo estrutural metaestável; a ação de agentes dispersante na argila, como a presença de matéria orgânica; a lixiviação sofrida pelo depósito argiloso; e, a presença de agentes cimentantes, como carbonatos e óxidos de ferro. (Barreto, 2015).

### 2.5.2 – Comportamento metaestável da argila

A estrutura de formação de uma argila pode estar arranjada de forma dispersa ou floculada/estruturada. A estrutura de formação floculada/estruturada é característica de ambientes de deposição marinho ou estuarino e apresenta alta quantidade de vazios entre as partículas que formam os agregados (Figura 9). O comportamento associado a esse tipo de argila é de maior resistência à tensão do que as estruturas dispersas, e, no caso de amolgamento do solo, ocorre o rompimento dessa estrutura e dispersão dos agregados, causando diminuição da resistência ao cisalhamento na condição amolgada. Esse tipo de estrutura é denominado metaestável (Bertuol 2009).

**FIGURA 9:** Tipo de estruturas de agregados floculados.



Fonte: Barreto (2015). P.50

O comportamento metaestável é observável em *quick clays* ou argilas classificadas como de alta sensibilidade. Em seu estudo, Barreto (2015) pontua: “A estrutura floculada é condição essencial para o desenvolvimento de argilas de alta sensibilidade.” P.50.

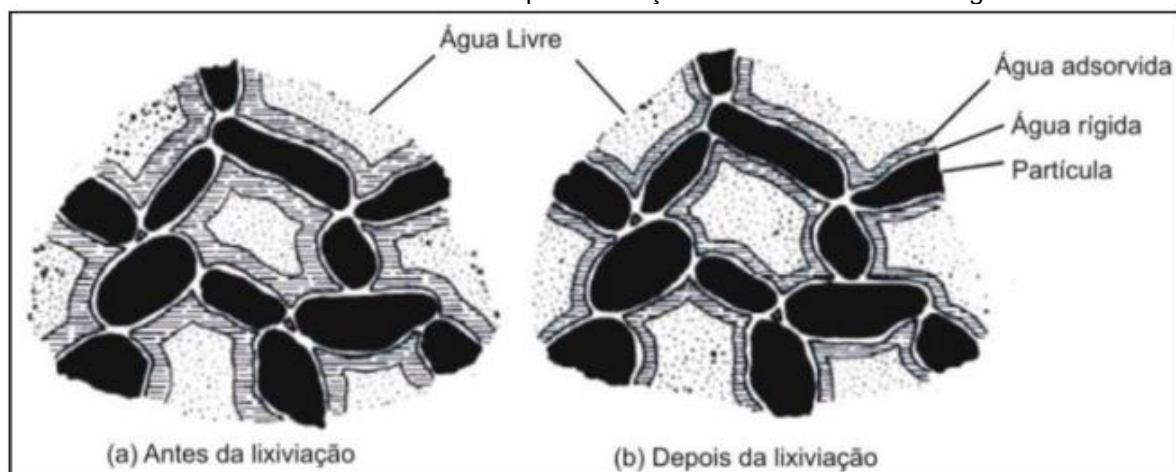
O comportamento das argilas metaestáveis também é descrito por Pinto (2017) p.39:

É característico da estrutura floculada apresentar um elevado índice de vazios, que é preenchido com água na hipótese do solo saturado. Quando a estrutura metaestável das argilas entra em colapso, gera-se poropressão devido à tendência na redução do volume. Segundo Skempton e Northey (1952), a poropressão gerada na defloculação das argilas sensíveis é a principal causa da perda abrupta de resistência. Pelo fato de as argilas marinhas formarem flocos com vazios maiores, este tipo de argila pode desenvolver valores elevados de sensibilidade.

### 2.5.3 – Lixiviação

Outra possível causa de sensibilidade no solo é a lixiviação; processo de redução de sal na água presente nos poros da argila causada pela ação da água doce no depósito. Segundo Barreto, (2015, apud Skempton & Northey, 1952) a lixiviação contribui para a ocorrência de metaestabilidade no solo; a estrutura da argila está envolta por uma película fina chamada “água rígida”; essa película está envolta por uma camada de água mais grossa com presença de sal, chamada “água adsorvida”. O processo de lixiviação diminui a espessura da camada de água adsorvida da estrutura da argila, aumentando o espaço livre nos poros aumentando a presença de água livre nesses poros.

**FIGURA 10:** Efeito causado pela lixiviação na estrutura de uma argila



FONTE: Barreto (2015).

Os principais efeitos observados pela lixiviação são: aumento do índice de liquidez (IL) e da sensibilidade (St) do material; além da redução do limite de liquidez (LL) e da resistência ao cisalhamento na condição amolgada (Sur). Barreto (2015, apud Skempton & Northey, 1952)

#### **2.5.4 – Presença de matéria orgânica**

A matéria orgânica presente no depósito de argila é depositada durante a sedimentação ou junto com a água que percola através do depósito sedimentar. Esse material tem ação dispersante possui efeito de diminuição do limite de liquidez (LL), aumento do índice de liquidez (IL) redução da resistência amolgada (Sur). Esse efeito é mais expressivo em depósitos de água doce.

A matéria orgânica também pode agir como uma gente cimentante em um depósito argiloso, juntamente com carbonatos, óxidos de ferro, óxidos de alumínio e óxidos de manganês. Inicialmente esses agentes cimentantes causam ganho de resistência para a argila, porém, durante o amolgamento, as ligações cimentantes são quebradas, causando queda drástica de resistência do material. Pinto (2017)

#### **2.5.5 – Outros fatores**

A composição mineralógica não compõe fator determinante para a presença de sensibilidade em uma argila, porém, as argilas de alta sensibilidade e *quick clays* estão diretamente relacionadas a presença de argilominerais com baixos valores de índice de atividade (IA). (Barreto, 2015)

Além disso, a espessura da camada de argila influencia na forma em que a água percola por ela. em camadas mais finas a água consegue percolar mais rápido o que facilita o efeito da lixiviação. mais comum que as *quick clay* sejam de camada fina próximas a camadas permeáveis, (Bertuol, 2009).

## **2.6 - Identificação de solos sensíveis**

A sensibilidade do solo pode ser identificada de maneira direta, obtendo os valores de resistência ao cisalhamento ( $S_u$ ), por meio dos seguintes ensaios em campo ou de laboratório: ensaio de compressão confinada, ensaio de palheta (*vane test*) e ensaio de queda do cone sueco (*fall-cone*). É possível identificar a sensibilidade de maneira indireta por meio de correlação empírica do ensaio de Piezocone (CPTu), e, correlação com o Índice de Liquidez dado pelos limites de Atterberg (Barreto, 2015).

## **2.7 – Capacidade de troca catiônica (CTC) e o índice de atividade das argilas (IA)**

O potencial de troca catiônica (CTC) é uma propriedade da argila que determina a sua capacidade de adsorver e trocar cátions no espaço interlamelar de sua estrutura. O valor de CTC representa quantitativamente a presença desses cátions trocáveis e é um parâmetro que pode ser usado na identificação do argilomineral.

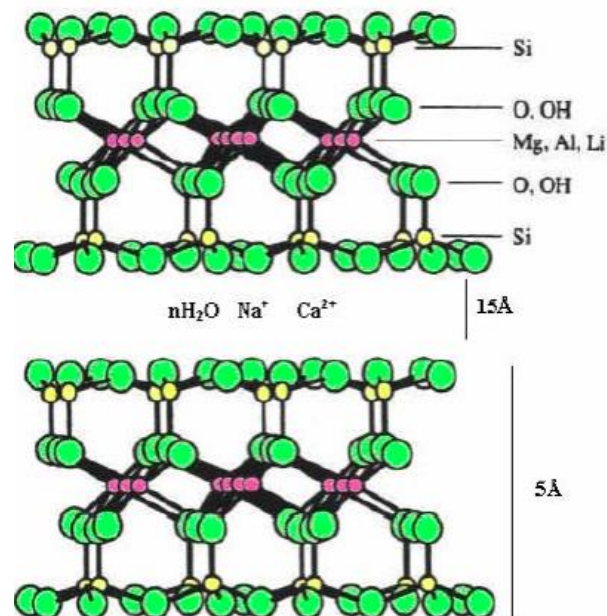
Um dos argilominerais com maiores valores de CTC é o montmorilonita, do grupo das esmectitas, com o valor variando entre 80 e 150 meq/100g. Esses minerais são formados por estruturas lamelares, onde cada lamela é constituída por duas camadas de tetraedro de sílica, unidas por uma camada central de octaedros de alumina. (Miranda, 2014)

**Figura 11:** Valores característicos de CTC para cada argilomineral.

Mineral	CTC (cmol kg <sup>-1</sup> )
Caulinita	2 - 15
Haloisita	10 - 40
Montmorilonita	80 - 150
Vermiculita dioctaédrica	10 - 150
Vermiculita trioctaédrica	100 - 200
Mica muscovita	10 - 40
Mica biotita	10 - 40
Clorita	10 - 40

Fonte: Barreto (2015). P.124

As lamelas da montmorilonita são unidas entre si por forças polares e forças de van der waal. É no espaço interlamelar que íons são adsorvidos. O excesso de carga negativa na superfície de suas unidades estruturais, é o que gera potencial de adsorção de cátion entre suas lamelas. A estrutura de duas lamelas de montmorilonita pode ser observada na figura 12.

**Figura 12:** estrutura de duas lamelas de montmorilonita.

Fonte: silva (2009)

A montmorilonita pode ser cálcica, sódica, policatiônica, dependendo de qual cátion trocável ela possui em sua estrutura. Quando sódica, sofre inchamento interlamelar ao ser exposto à água, ou seja, as moléculas de água são absorvidas

entre as lamelas da estrutura de argila, afastando-as e aumentando seu volume significativamente. (Menezes, 2009) e (silva, 2008).

A CTC pode ser determinada direta ou indiretamente. O processo direto baseia-se na saturação do complexo de troca com um cátion-índice, seguida por sua extração e determinação. Indiretamente, pode-se determinar a CTC pela soma de bases trocáveis, extraídas com um extrator apropriado, com a acidez titulável, extraída por soluções tamponadas. " - citação direta (Camargo, 1982) p.2

A CTC pode ser expressa como "CTC total" quando considerar todos os cátions permutáveis do solo ( $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + H^{+} + Al^{3+}$ ). Quando a CTC é expressa sem considerar o íon  $H^{+}$  ( $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Al^{3+}$ ) a denominação é "CTC efetiva" (Ronquim, 2010). Com a obtenção dos valores de cátions trocáveis por análises químicas do solo é possível obter o valor de CTC efetiva pela equação 3 (Teixeira, 2017):

$$CTC\ efetiva = Al^{3+} + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + k^{+} \quad (3)$$

Em que:

CTC efetiva – capacidade de troca de cátions efetiva, em  $cmolc.kg^{-1}$ .

$Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$  – teor de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis no solo, respectivamente, em  $cmolc.kg^{-1}$ .

O valor do CTC influencia propriedades plásticas das argilas. Ele está diretamente ligado ao índice de atividade de Skempton (IA); quando o CTC é baixo o IA é baixo e vice versa. O índice de atividade é definido como a razão entre o índice de plasticidade e a fração argila (percentagem de material com granulometria inferior a 0,002mm), como mostrado na equação 4. Uma argila é classificada como inativa se  $IA < 0,75$ , normal se  $0,75 < IA < 1,25$  e ativas se  $IA > 1,25$ . (Goncalves, 2022)

$$IA = \frac{IP}{\% < 0,002mm} \quad (4)$$

Segundo Bertuol (2009), o índice atividade e a sensibilidade estão inversamente relacionadas. As argilas rápidas de alta sensibilidade (*quick clays*) podem apresentar valores de  $At = 0,15$ ; um depósito marinho com  $St = 22$

apresentou valor de  $IA = 0,56$ ; o depósito em *Bothkennar*, no Reino Unido, onde a  $St = 5$  apresentou  $IA = 1,34$ .

Os argilominerais mais encontrados em argilas de alta sensibilidade são mica hidratada/ilita e clorita, que possuem baixos valor de CTC e IA; e pouca ou nenhuma presença de argilominerais expansivos de alta atividade, como a montmorilonita. (Barreto, 2015).

### 3. Metodologia

A presença de solos sensíveis na composição das margens deixa o local mais suscetível as terras caídas. Sobre argilas sensíveis Goncalves (2022) afirma: “[...]esses materiais podem exibir fragilidade, perda da resistência e amolecimento por deformação, além de serem mais propensos a deslizamentos de terra”. p.8. É possível identificar e mensurar essa propriedade a partir dos seguintes ensaios:

#### a. Eletrorresistividade

É um método baseado na resistividade elétrica dos materiais, isto é, a dificuldade que um determinado material impõe a passagem de corrente elétrica. São inseridos 4 tipos de eletrodos no solo, 2 para gerar corrente elétrica (A e B) e 2 para medir a diferença de potencial entre eles (M e N). A diferença de potencial é medida por um equipamento chamado resistivímetro. Os valores de resistividade apresentados pelo pacote de solo ou pela rocha no subsolo são registrados de acordo com a profundidade atingida pela corrente elétrica. Os valores obtidos são a resistividade e a espessura de cada pacote de solo, a partir desses dados é possível identificar o corpo rochoso, sua possível composição e espessura (Borges, 2002).

Alguns fatores podem causar alterações no resultado desse ensaio, como o grau de saturação, estado de compactação, quantidade de sal presente, grau de fraturamento ou nível de alteração das estruturas rochosas.

A partir desse ensaio é possível determinar a existência de solo argiloso sensível no substrato investigado, além de estimar a profundidade e espessura dessa camada de solo argiloso. Essas informações são necessárias para iniciar a investigação da análise de estabilidade de encostas.

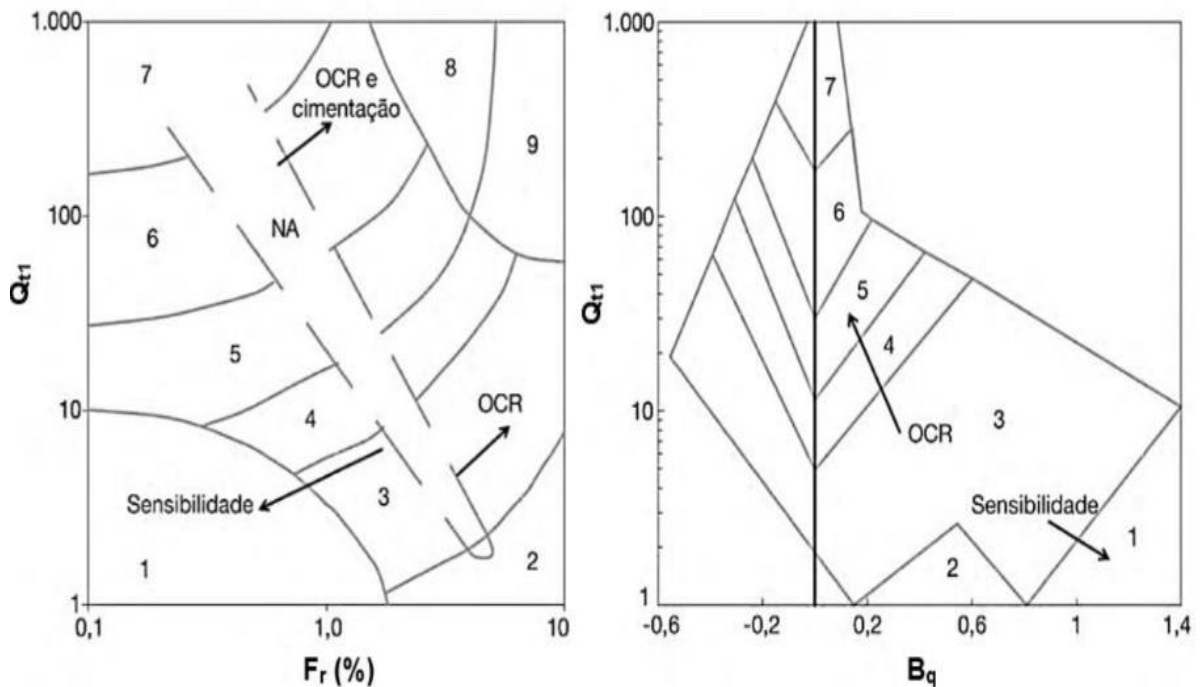
#### b. CPTU

O ensaio de piezocone ou *piezocone penetration test*, conhecido pela sigla CPTU, consiste na cravação do solo com uma ponteira cônica, de seção transversal de 10 cm<sup>2</sup>, e uma luva de atrito cilíndrica, a velocidade padronizada que pode variar de 20 a 5 mm/s. Esse ensaio objetiva a obtenção dos parâmetros de resistência de ponta ( $q_c$ ), de atrito lateral ( $f_s$ ) e poropressões geradas na base do cone ( $u_2$ ). A partir dos valores obtidos é possível calcular a resistência do cone normalizada ( $Q_t$ ), razão de atrito normalizada ( $F_r$ ) e razão de poro-pressão ( $B_q$ ).

Conforme Baroni, (2010) “A simples observação conjunta das medidas de resistência de ponta, atrito lateral e excesso de poro-pressões gerado durante a cravação permitem identificar camadas de subsolo de qualquer consistência e espessura”. P.6

Os parâmetros obtidos de maneira direta ou indireta por meio do ensaio CPTU, podem ser utilizados na obtenção do perfil estratigráfico da camada utilizada, por meio da plotagem desses valores em ábacos SBT (*Soil behaviour test*) e sistemas de classificação, sendo os mais utilizados: *Senneset e Janbu (1984)*, *Robertson et al., (1986)* e *Robertson (1990)*, *Schneider et al., (2008)*. (Baroni, 2016). A figura 15 mostra o ábaco de Robertson (1990), um dos mais utilizados, que relaciona os valores de  $Q_{t1}$  x  $F_r$  e  $Q_{t1}$  x  $B_q$ . o ábaco é dividido em 9 zonas de classificação de solo, como está descrito na figura 16.

**Figura 15:** Ábaco de Robertson (1990) de identificação do comportamento típico de solos



Fonte: Barbosa (2018) p. 185

**Figura 16:** Classificação de Robertson (1990) dos solos por tipo de comportamento.

<b>Zona</b>	<b>Soil Behaviour Type (SBT)</b>
1	Solos finos sensíveis
2	Solos orgânicos e turfas
3	Argila: Argilas – Argilas siltosas
4	Misturas siltosas: Argilas siltosas – siltes argilosos
5	Misturas arenosas: Siltes arenosos – areias siltosas
6	Areias: Areias siltosas - areias
7	Areias - Areias com pedregulho
8	Solos finos muito rijos*
9	Areias argilosas – areias*

\* solos muito pré-adensados ou cimentados.

Fonte: Barbosa (2018) p. 186

Segundo Baroni (2016, apud Schnaid e Odebreth, 2012) valores de  $B_q$  (razão de poro-pressão) maiores que 1 indicam tensão efetiva nula, característica encontrada em solos sensíveis.

Além da utilização de ábacos SBT, é possível obter os valores de sensibilidade a partir dos valores obtidos no ensaio CPTU, com o auxílio de fatores empíricos, obtidos através das correlações com o ensaio de palheta. Segundo BARBOSA (2018), existem 3 métodos de obtenção do valor de resistência ao cisalhamento não drenada na condição indeformada ( $S_u$ ): através da resistência de ponta em termos de tensões totais (equação 5); através da resistência de ponta em termos de tensões efetiva (equação 6); e, através do excesso de poropressão gerado durante a cravação (equação 7).

$$S_u - CPTU = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt} - VST} \quad (5)$$

$$S_u - CPTU = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke} - VST} \quad (6)$$

$$S_u - CPTU = \frac{(u_2 - u_0)}{N_{\Delta u} - VST} \quad (7)$$

Onde:

$S_u - CPTU$ : resistência ao cisalhamento não drenada medida pelo ensaio de palheta, em kPa;

$q_t$ : resistência de ponta corrigida, em kPa;

$\sigma_{v0}$ : tensão total, em kPa;

$N_{kt} - VST$ : fator do cone em termos de tensões totais, como referência o ensaio de palheta.

$N_{ke} - VST$ : fator do cone em termos de tensões efetivas, como referência o ensaio de palheta.

$N_{\Delta u} - VST$ : fator do cone do excesso de poro pressão, como referência o ensaio de palheta;

### c. Caracterização química do solo (difratometria de raio X)

O ensaio de difratometria de raio X (DRX) é um ensaio de laboratório que caracteriza o tipo de mineral a partir das distâncias atômicas interplanares identificadas. A técnica é baseada no fenômeno da difração, em que um feixe de raio X é incidido sobre uma amostra de material sólido e esse feixe é difratado em diferentes direções. O ângulo de dispersão do raio X incidido varia de acordo com a estrutura química do material analisado e a partir dele é possível determinar a distância interplanar dos átomos da amostra pela lei de *Braggs*, que relaciona o ângulo de difração e a distância interplanar da amostra na seguinte equação: (Callister, 2016).

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta \quad (8)$$

Onde:

$n$ : número inteiro

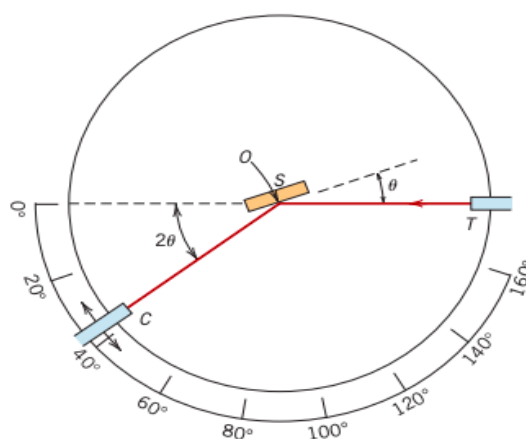
$\lambda$ : comprimento de onda dos raios X incidentes.

$d$ : distância interplanar

$\theta$ : ângulo de difração

Para a realizar o ensaio de difratometria de raio X é utilizado o difratômetro, um aparelho usado para determinar os ângulos de difração do raio x para a amostra analisada. A figura 17 mostra os elementos presentes neste aparelho, sendo eles: a amostra pulverizada S, no formato de uma chapa plana; eixo de rotação O; o feixe de raio X é incidido no ponto T; e os feixes difratados são detectados pelo contador no ponto C.

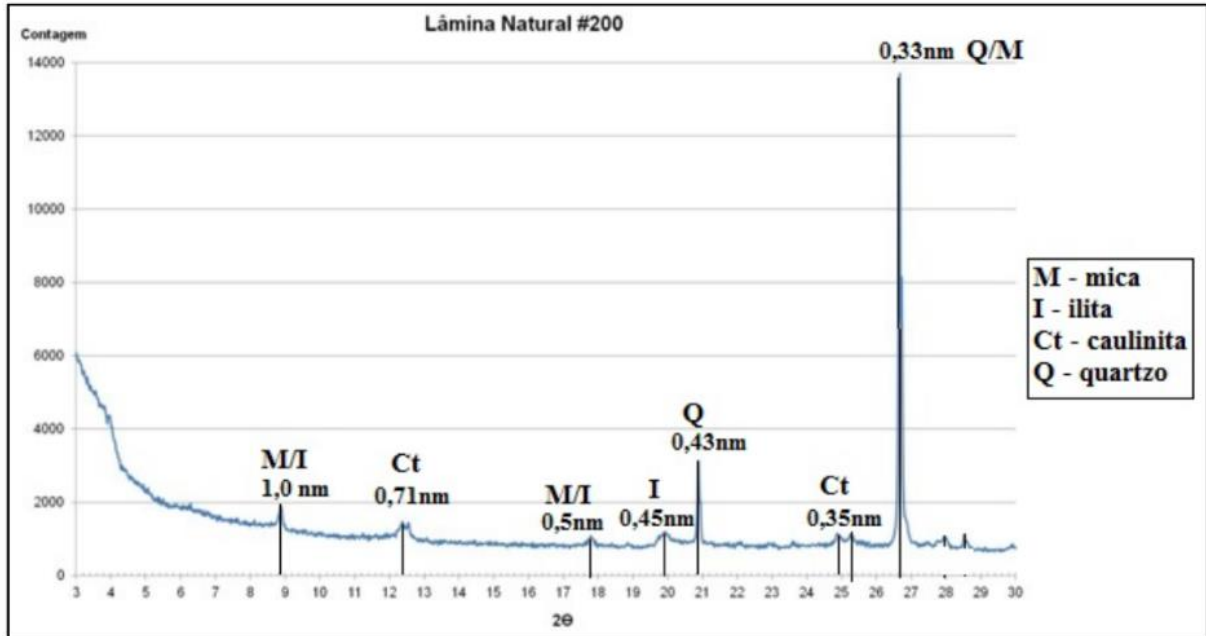
**Figura 17:** representação esquemática de um difratômetro de raio X



**Fonte:** Callister, 2016.

Como resultado do ensaio obtém-se o difratograma, que é um gráfico de intensidade do pico versus  $2\Theta$  (ângulo de difração). Os difratogramas devem ser analisados com ênfase na posição dos picos, forma e amplitude.

**Figura 18:** Exemplo de difratograma.



Fonte: Barreto (2015).

## 4. Análise dos resultados

4.1 - Ensaio de eletrorresistividade realizado no terminal de uso privativo (TUP) do porto de Santana.

O ensaio foi realizado pela empresa EEG consultoria geofísica, entre 09 e 17 de fevereiro de 2021, e solicitado como parte do embasamento técnico do laudo judicial referente ao sinistro ocorrido no TUP do porto de Santana em 2013. Foram executadas 28 linhas de caminhamento elétrico posicionadas em ao longo do local de estudo, formando uma malha (figura 19).

**Figura 19:** local do estudo geofísico.



**Fonte:** Geofísica EEG (2021) p. 4

A metodologia utilizada foi a 2D/3D com o objetivo de compreender os tipos litológicos e estruturas geológicas presentes na subsuperfície da região. A técnica adotada foi a polo-dipolo, com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos e 28 linhas de caminhamento elétrico. Os valores foram obtidos para uma profundidade de aproximadamente 50 metros. O principal enfoque do ensaio para esse caso é a identificação de camadas de argilas sensíveis.






No ensaio, primeiramente são obtidos os dados brutos de resistividade aparente das linhas geométricas, que precisam ser tratados em softwares para a obtenção do modelo 3D, e, a partir dele, os perfis geoeletricos 2D são extraídos.

Para complementar o resultado do ensaio, foram realizadas também as sondagens mecânicas SB1, SB2, SB3, SA1, SA2 e SA3 para mensurar os valores de sensibilidade da camada de argila. O resultado dos 28 perfis geoeletricos são uma interpretação dos dados obtidos no ensaio e mostram as possíveis camadas estratigráficas presentes na superfície.

Foi detectada a presença de argila de alta sensibilidade logo abaixo de uma camada de argila, em 26 dos 28 perfis geoeletricos obtidos. A camada de argila sensível possui formato de cunha, aumentando sua espessura em direção à margem do rio. A linha preta tracejada representa possíveis descontinuidades estruturais e estão presentes nos perfis geoeletricos L16, L17, L18, L19, L20, L21, L22, L25, L26, L27.

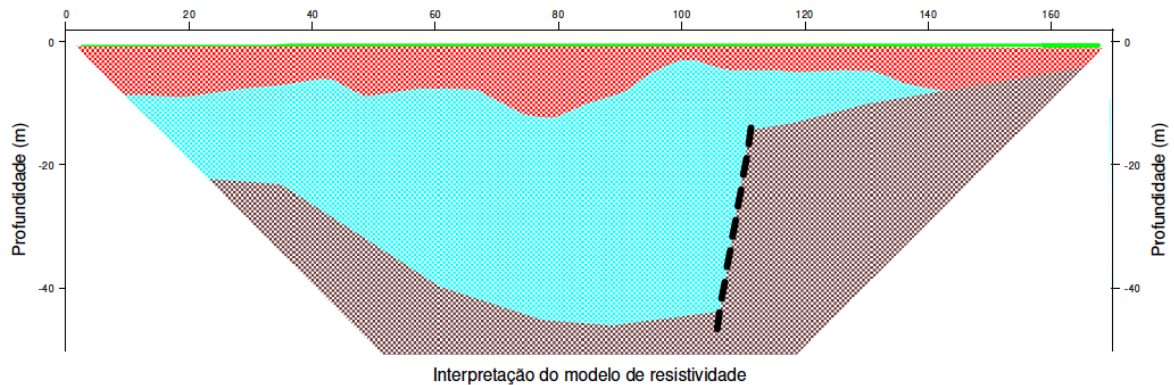
Todos os 28 perfis possuem, da base para a superfície, substrato; argila de alta sensibilidade; camada intermediária de argila; e camada superficial de aterro na superfície. Com a exceção dos perfis L16 e L17 que não possuem camada de argila de alta sensibilidade, além da ausência dessa camada, esses dois perfis também tem a presença de descontinuidade estrutural.

Figura 20: Legenda do modelo de interpretação do perfil geoeletrico.

<b>LEGENDA</b>	
	Camada superficial de aterro
	Camada intermediaria: argila
	Argila de alta sensibilidade
	Substrato
	Descontinuidade estrutural

Fonte: Teixeira (2021).

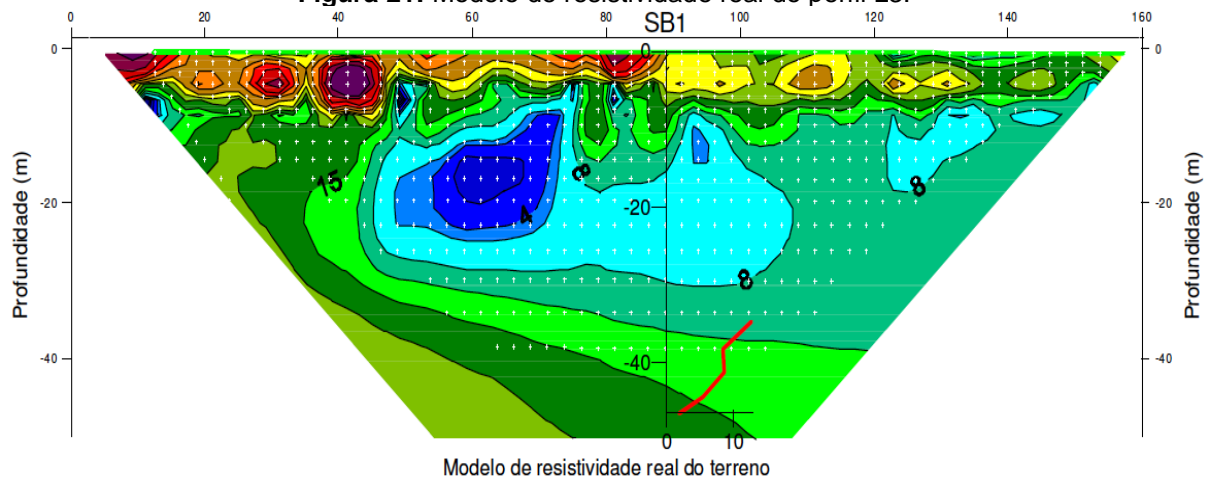
**Figura 20:** Perfil geoeletrico L16.



**Fonte:** Teixeira (2021).

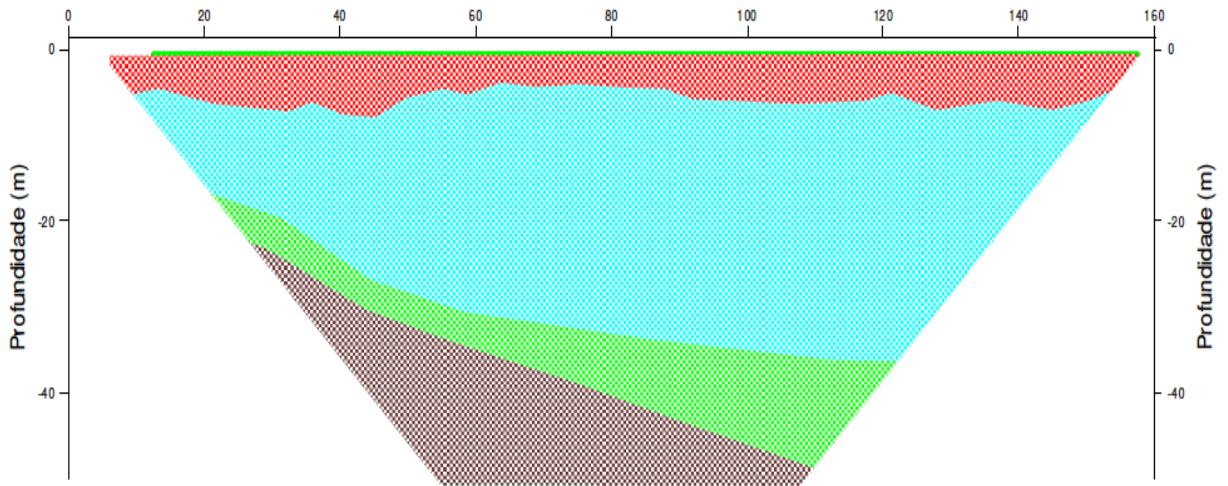
Os valores de sensibilidades obtidos pelas sondagens mecânicas são mostrados nos perfis L3, L9, L14, L24, L25 e L28. O valor de sensibilidade obtido pode ser visualizado no modelo de resistividade de cada perfil, em L3 foi um pouco maior de 10 próximo a profundidade de 40 metros. No perfil L9 o valor de sensibilidade foi próximo a 5 em 4 profundidades diferentes, variando de 10 a 30 metros. No perfil L14 e L28 o valor de sensibilidade atingiu 30 na profundidade de 35 metros; a outra obteve valor aproximado de 10 em 3 profundidades diferentes. Os valores de sensibilidade dos perfis L24 e L25 foram semelhantes, se aproximaram de 10 em profundidades menores de 20 metros e acima de 30 metros.

**Figura 21:** Modelo de resistividade real do perfil L3.



**Fonte:** Teixeira (2021).

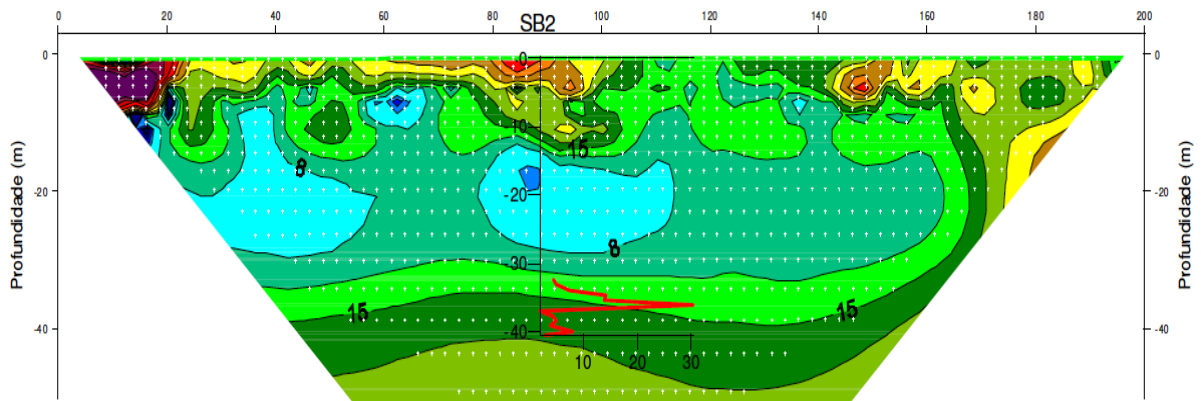
**Figura 22:** Perfil geoeletrico L3. Fonte: Teixeira (2021) p. 22



Interpretação do modelo de resistividade

**Fonte:** Teixeira (2021)

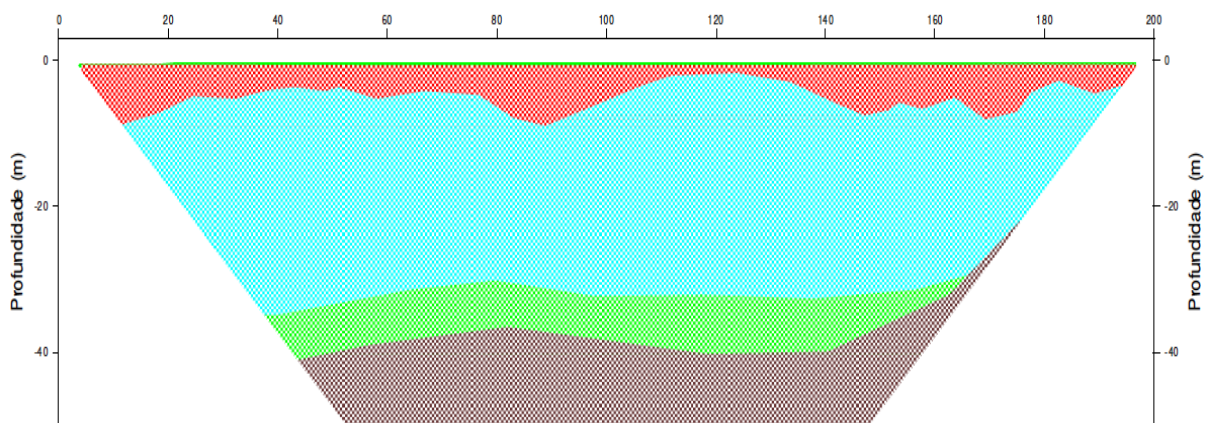
**Figura 23:** Modelo de resistividade real do perfil L28



Modelo de resistividade real do terreno

**Fonte:** Teixeira (2021)

**Figura 24:** Perfil geoeletrico L28.



Interpretação do modelo de resistividade

**Fonte:** Teixeira (2021)

#### 4.2 - Ensaio CPTU realizado no TUP do porto de Santana

Em Gonçalves (2022) o local de estudo foi dividido em ilhas A, B e C, onde foi realizado um ensaio de CPTU em cada uma das ilhas. As coordenadas geográficas de cada ilha são: 9993776N e 479536E para A; 9993809N e 479586E para B; e 9993860N e 479634E para C.

O tipo de cone utilizado no ensaio foi o *A. P. van Den Berg*, com seção transversal de 10 cm<sup>2</sup>, área de superfície da luva de atrito cilíndrica de 120 cm<sup>2</sup> e 60 graus de ângulo de ponta. A profundidade alcançada foi de aproximadamente 50 metros. Durante o ensaio a penetração do cone se manteve a velocidade de 2 cm por segundo, com leitura de dados a cada 2 cm. Os testes foram feitos de acordo com as normas ISO 22476-1 e ISO 22476-12.

Para classificação das camadas de solo na subsuperfície com base nos dados obtidos pelo teste de CPTU, foram utilizados ábacos SBT (*soil behaviour type*) em 2 métodos diferentes classificação: *Robertson Qt x Fr* (1990) e *Robertson* (2016).

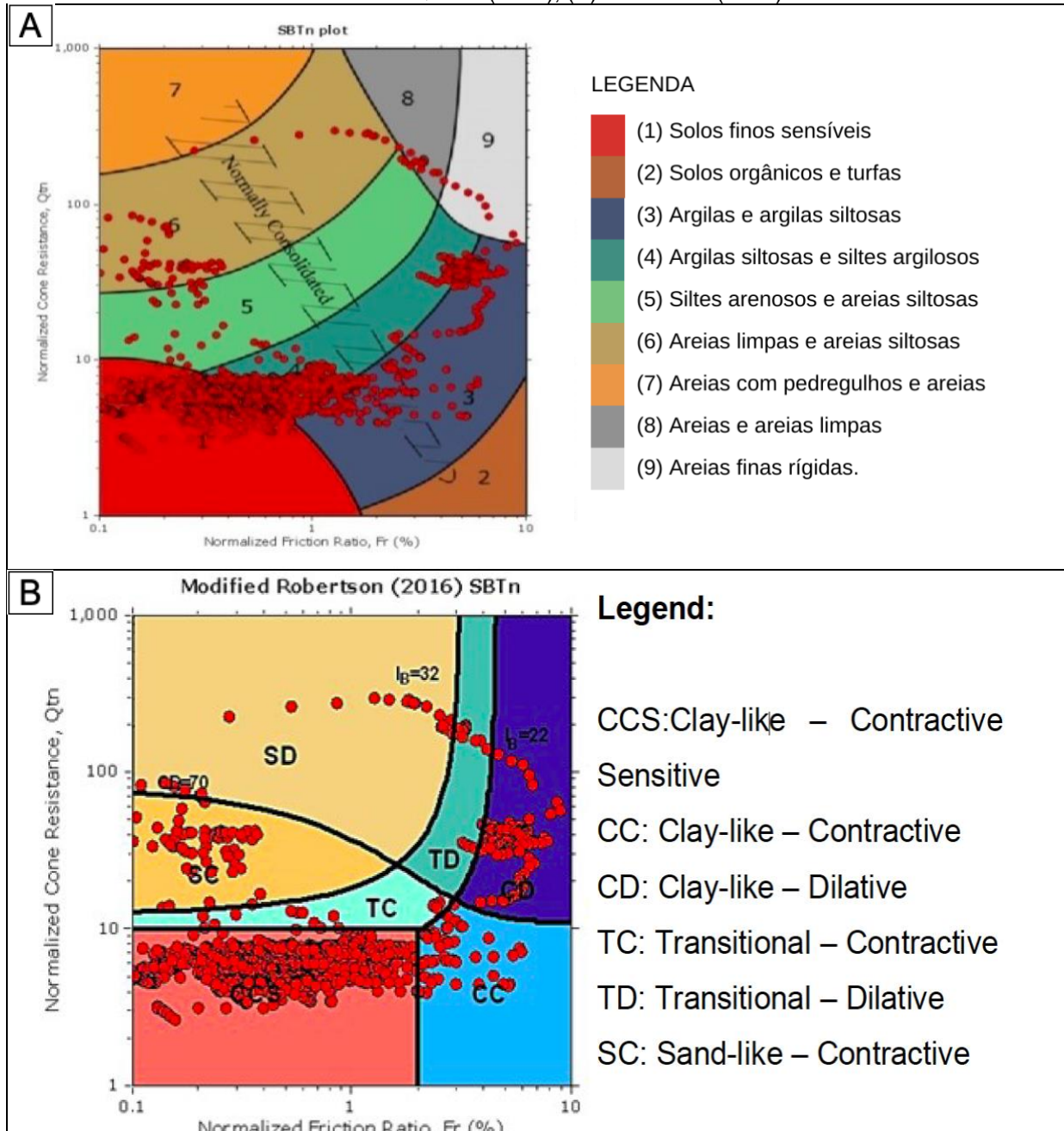
O ábaco de *Robertson Qt x Fr* (1990) relaciona os valores de resistência à penetração normalizada e Razão de atrito normalizada ( $Q_t \times F_r$ ). Nos ábacos são definidas 9 zonas de classificação do comportamento do solo: (1) Solos finos sensíveis; (2) Solos orgânicos e turfas; (3) Argilas e argilas siltosas; (4) Argilas siltosas e siltes argilosos; (5) Siltes arenosos e areias siltosas; (6) Areias limpas e areias siltosas; (7) Areias com pedregulhos e areias; (8) Areias e areias limpas; (9) Areias finas rígidas.

O método de classificação SBT, proposto por *Robertson* (2016), se baseou em características físicas e comportamentais correlacionadas. Essa classificação divide o solo em 7 zonas: “(1) CCS: *Clay-like – Contractive - Sensitive*, (2) CC: *Clay-like - Contractive*, (3) CD: *Clay-like - Dilative*, (4) TC: *Transitional - Contractive*, (5) TD: *Transitional - Dilative*, (6) SC: *Sand-like - Contractive* e (7) SD: *Sand-like - Dilative*.”

Os dados obtidos na ilha A apresentam baixos valores de resistência do cone normalizada ( $q_t$ ), variando de 2 a 3 MPa; e valores de atrito lateral  $f_s$  abaixo de 10 kpa. O solo do local se mostrou altamente saturado, com nível de água a aproximadamente 1 metro da superfície. Os parâmetros citados são indicativos de baixa capacidade de resistência do solo.

A figura a seguir (25) mostra os ábacos SBT de *Robertson Qt x Fr* (1990) e *Robertson* (2016) do ensaio CPTU realizado na ilha A. Ambos os ábacos mostraram resultado similar na identificação de solo sensível.

**Figura 25:** Ábacos SBT baseados nos parâmetros obtidos pelo ensaio de CPTU na ilha A. (A) *Robertson Qt x Fr* (1990); (B) *Robertson* (2016).



Fonte: GONCALVES, 2022.

Para comprovar a confiabilidade dos valores de sensibilidade obtidos pelo ensaio CPTU, o autor Goncalves (2022) comparou-os com os valores de sensibilidade obtidos a partir do ensaio de compressão confinada. A comparação

dos valores apresentou similaridades satisfatórias, comprovando a confiabilidade dos resultados.

## 5. Conclusão

Após a análise de características relevantes das encostas margeadas por rios amazônicos e as principais causas dos deslizamentos de terra nesses locais, é possível propor um protocolo de análise dessas encostas baseado em 2 ensaios de campo e 1 de laboratório. Os ensaios de campo selecionados são minimamente invasivos, devido a possível instabilidade apresentada pela encosta a ser analisada. O protocolo de análise será dividido em 3 etapas:

- Eletrorresistividade:

A etapa inicial da análise é a realização do ensaio de eletrorresistividade, a partir dele é possível identificar a presença de solo sensível e sua profundidade. O ensaio é ideal para um mapeamento inicial, pois possui grande abrangência de área, dependendo da forma como os eletrodos e as linhas de caminhamento elétrico são posicionados.

- Ensaio Piezocone (CPTU):

Nos locais onde foi detectado a presença expressiva de solo sensível devem ser realizados furos de ensaio CPTU. O resultado desse ensaio fornece as propriedades mecânicas e a identificação estratigráfica do perfil de solo analisado. Os valores obtidos no ensaio podem ser plotados em ábacos SBT (*Soil Behaviour Type*), que são ábacos de classificação do solo quanto a sua composição e comportamento.

Para obter valores mais precisos de acordo com a profundidade alcançada na penetração do cone, é possível calcular o valor de sensibilidade através de correlação teórica ou empírica dos valores obtidos no ensaio.

- Difractometria de raio x (DRX):

A última etapa do protocolo de análise é a caracterização de amostras do local a ser analisado através do ensaio de difratometria de raio x. A partir desse ensaio obtemos o tipo de mineral presente na amostra de solo analisado. A caracterização de argilominerais de baixa atividade pode indicar ambiente de solo sensível ou sujeito a desenvolver essa característica quando exposto a ação de lixiviação ou agentes dispersantes (Barreto, 2015).

O protocolo proposto nesse trabalho fornece informações essenciais a compreensão das características físicas e mineralógicas da encosta a ser analisada. A partir desses dados é possível determinar o risco de erosão da região e se há a necessidade, ou não, de intervenção pública.

## REFERÊNCIAS

BARBOSA, H, T. **Banco de dados geotécnico das argilas moles da Região Metropolitana do Recife (RMRecife)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2018. 302p.

BARONI, M. **Investigação geotécnica em argilas orgânicas muito compressíveis em depósitos da Barra da Tijuca**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010. 249p.

BARRETO, E, C, G. **Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica do solo mole do Porto de Santana, no Amapá**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015. 207p.

BERTUOL, F. **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA SENSIBILIDADE DE UM DEPÓSITO SEDIMENTAR DO RIO GRANDE DO SUL COM O USO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2009.

BORGES, W, R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. 2002**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

CALLISTER, W, D. **Ciência e engenharia de materiais, uma introdução**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMARGO, O, A. **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE D E TROCA D E CÁTIONS EM SOLOS UTILIZANDO O MÉTODO DO TAMPÃO SMP**. BRAGANTIA – revista científica do instituto agrônomo, campinas. V.41, n12. Junho de 1982.

CARVALHO, J, A, L.; CUNHA, S. B.; IGREJA, H.L.S.; CARNEIRO, D. de S. **Episódio de Terras Caídas no Rio Amazonas: caso Costa da Águia, Parintins–Am**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18, 2009, Campo Grande. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

CARVALHO, J, A, L. **Terras caídas e conseqüências sociais: Costa do Miracauera – Paraná da Trindade, Município de Itacoatiara – Am, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas - UFAM. Manaus, 2006. 141p.

CHRISTOFOLETTI, A. **A Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. vol. 1. 313 p.

FREITAS, F, T, de. **Análise multitemporal da modalidade erosiva do tipo terras caídas na Região do Médio Solimões – Coari/AM**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2008. 125p.

GONÇALVES, A, D. **Avaliação da sensibilidade de uma argila mole do amapá por meio da correlação entre ensaios de cptu e de laboratório**. Dissertação de Mestrado – Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2022. 81p.

MARQUES, R, O. **Erosão nas margens do rio Amazonas: o fenômeno das terras caídas e as implicações para a cidade de Parintins-AM**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017. 175p.

MENEZES, R, R. **Argilas bentoníticas de Cubati, Paraíba, Brasil: caracterização física-mineralógica**. Cerâmica. V. 55. 163-169. São Paulo. 2009

MIRANDA, E, S. **Argila caulinita da região norte do brasil: caracterização e aplicação como adsorvente de compostos orgânicos (btx) e oxiânions de cromo hexavalente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belém, 2014. 78p.

PINTO, G, P. **A influência da sensibilidade na estabilidade de solos moles brasileiros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 252p.

RONQUIM, C, C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 1ed. V.8. Embrapa Monitoramento por Satélite. Campinas. Novembro de 2010.

SILVA A. R. V.; FERREIRA H. C. **Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.2 (2008) 26-35.

TEIXEIRA, M, R. **Laudo Pericial**. Núcleo De Desenvolvimento Amazônico Em Engenharia – UFPA. Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2019.

TEIXEIRA, P, C. et. Al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos. Brasília: 2017. 574p.