



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



RAFAEL VIANA AGUIAR CAMPOS

**ANÁLISE DE INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS DE  
BARRAGENS UTILIZANDO O CPT<sub>u</sub> EM UMA MINA DE  
FERRO**

OURO PRETO  
2021

RAFAEL VIANA AGUIAR CAMPOS

**ANÁLISE DE INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS DE  
BARRAGENS UTILIZANDO O CPT<sub>u</sub> EM UMA MINA DE  
FERRO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

OURO PRETO  
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C198a Campos, Rafael Viana Aguiar.  
Análise de investigações geotécnicas de barragens utilizando o CPTu em uma mina de ferro. [manuscrito] / Rafael Viana Aguiar Campos. - 2021.  
84 f.: il.: color., gráf., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Geotecnia. 2. Barragens de rejeitos. 3. Solos - Análise - Piezocone.  
I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.  
Título.

CDU 624.136

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezanove dias do mês de abril de 2021, às 16h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Rafael Viana Aguiar Campos**, matrícula 15.2.1355, intitulado: **ANÁLISES DE INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS DE BARRAGENS UTILIZANDO CPTu EM UMA MINA DE FERRO**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, Eng<sup>a</sup> Geóloga Laís de Carvalho Faria Lima Lopes e Prof. Dr. Hernani Mota de Lima. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro à Eng.<sup>a</sup> de Minas Laís de Carvalho Faria Lima Lopes, segundo, ao Prof. Dr. Hernani Mota de Lima e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota 9,5 (nove vírgula cinco pontos), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 19 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Membro: Eng.<sup>a</sup> de Minas Laís de Carvalho Faria Lima Lopes

Membro: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Discente: Rafael Viana Aguiar Campos

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço e dedico esta conquista a Deus por iluminar e guiar meus passos;

Minha Mãe, obrigado por todo amor, amizade e apoio e por me ensinar a ser independente desde cedo e correr atrás dos meus objetivos;

Ao meu pai, pelo carinho e esforço empreendido para que eu chegasse aqui e permanecesse, e por não medir esforços para que tudo isso acontecesse;

A Fundação Gorceix;

Ao professor Carlos Arroyo, pela orientação e por contribuir com meu crescimento pessoal e profissional;

À toda equipe do DEMIN, professores, técnicos e servidores pelo enriquecimento acadêmico, profissional e pessoal;

Aos amigos que fiz durante a graduação e por fazerem os anos vividos em Ouro Preto serem os melhores possíveis;

A empresa Pattrol Investigações Geotécnicas, por ter fornecido todos os dados necessários para realização deste trabalho e pela oportunidade de estágio;

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado de bom grado este convite;

Por fim, à Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino gratuito e qualidade.

E viva a Escola de Minas!

*“Sua tarefa é descobrir o seu trabalho e, então, com todo o coração, dedicar-se a ele”. Buda*

## RESUMO

Acidentes envolvendo barragens de rejeitos tem grande repercussão, principalmente pelo fato de ter um potencial catastrófico, podendo expor a sociedade e o meio ambiente a riscos. Uma das causas envolvendo acidentes de barragem é a liquefação, como ocorreu em Mariana no ano de 2015 e em Brumadinho em 2019. É um modo de fratura que ocorre em condições sem drenagem, onde o solo perde resistência e rigidez devido a um aumento repentino da poropressão. Neste caso, observa-se a necessidade de pesquisas sobre a segurança das barragens. A avaliação de engenharia e os métodos de qualidade são práticas comuns, mas não cobrem todo o processo de falha e sua incerteza. Portanto, o objetivo deste estudo envolve a avaliação de barragens de rejeitos de minério de ferro através de investigações geotécnicas utilizando ensaios de piezocone (CPTu). As análises dos comportamentos da barragem foram divididas em praia e talude para verificar o comportamento geotécnico e estratigráfico de cada estrutura estas análises tiveram por finalidade avaliar o perfil estratigráfico do rejeito e do talude, sua composição e a distribuição granulométrica ao longo da profundidade e a determinação dos parâmetros de resistência e das condições de fluxo dos depósitos de rejeitos. Como resultados, são analisados que a barragem possui uma drenagem eficiente. Para a praia notou-se um solo mais silte-argiloso, enquanto no talude um solo mais silto-arenoso à arenoso-siltos. Na pratica a segregação hidráulica na barragem apresentou pouco contraste de material arenoso na área analisada, o que justifica uma ineficiência na formação de praias durante as etapas de deposição dos rejeitos, esse fato pode ser fundamentado pelo modelo de segregação hidráulica em depósitos de minérios de ferro. No talude foram observadas resistências de pontas superiores a 20 MPa, indicando que os taludes então bem compactados dando uma maior estabilidade para a barragem. Por fim conclui-se que os ensaios de CPTu são de maneira geral equipamentos de alta precisão que auxiliam nos estudos de investigações geotécnicas principalmente pela rapidez na qual são gerados os dados e servem como complemento dos ensaios de laboratório.

**Palavras-chave:** Barragem de Rejeito, Investigações Geotécnicas, Piezocone, CPTu.

## ABSTRACT

Accidents involving tailings dams have great repercussions, mainly due to the fact that they have a catastrophic potential, which may expose society and the environment to risks. One of the causes involving dam accidents is liquefaction, as occurred in Mariana in 2015 and in Brumadinho in 2019. It is a fracture mode that occurs in conditions without drainage, where the soil loses strength and stiffness due to a sudden increase in poropressure. In this case, there is a need for research on dam safety. Engineering assessment and quality methods are common practices, but they do not cover the entire failure process and its uncertainty. Therefore, the objective of this study involves the assessment of iron ore tailings dams through geotechnical investigations using piezocone tests (CPTu). The analyzes of the dam's behavior were divided into beach and embankment to verify the geotechnical and stratigraphic behavior of each structure. These analyzes were aimed at evaluating the stratigraphic profile of the tailings and the embankment, its composition and the granulometric distribution along the depth and the determination the resistance parameters and the flow conditions of the tailings deposits. As a result, it is analyzed that the dam has an efficient drainage. For the beach, a more silt-clay soil was noted, while on the slope, a more silt-sandy soil with sandy-silt. In practice, the hydraulic segregation in the dam showed little contrast of sandy material in the analyzed area, which justifies an inefficiency in the formation of beaches during the tailings deposition stages, this fact can be substantiated by the hydraulic segregation model in iron ore deposits. . In the embankment, tip resistances greater than 20 MPa were observed, indicating that the embankments were then well compacted, giving greater stability to the dam. Finally, it is concluded that the CPTu tests are, in general, high precision equipment that help in the studies of geotechnical investigations, mainly due to the speed in which the data are generated and serve as a complement to the laboratory tests.

**Keywords:** Tailings Dam, Geotechnical Investigations, Piezocone, CPTu.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas granulométricas de rejeitos de minérios de ferro.....	19
Figura 2 - Estrutura sedimentar plano paralela presente ao longo das praias de rejeito.....	21
Figura 3 - Segregação em aterro hidráulico.....	22
Figura 4 - Segregação hidráulica em depósitos de minérios de ferro.....	22
Figura 5 – Métodos de descarga usualmente empregados em barragens de rejeitos, único ponto (a) e vários pontos (b).....	23
Figura 6 - Método de barragem alteada para montante.....	25
Figura 7 - Método de barragem alteada para jusante.....	26
Figura 8 - Barragem alteada pela linha de centro.....	27
Figura 9 - Ruptura por galgamento.....	29
Figura 10 - Relação das áreas do piezocone.....	35
Figura 11 - Tipos de ensaio de CPTu.....	37
Figura 12 - Ábacos $Q_t$ versus $F_r(\%)$ e $Q_t$ versus $B_q$ para a identificação dos tipos de solos.....	39
Figura 13 - Classificação dos solos por tipo de comportamento.....	39
Figura 14 – Índice de classificação do material.....	41
Figura 15 - Identificação de solos dilatantes de solos contrativos durante o cisalhamento.....	42
Figura 16 - Proposta de atualização do diagrama SBTn baseado em $Q_{tn}-F_r$ .....	43
Figura 17 - Parâmetros para o coeficiente de permeabilidade.....	44
Figura 18 - Análise do modulo de Young em um ensaio de CPTu.....	45
Figura 19 - Ábaco para a avaliação do módulo de cisalhamento máximo.....	47
Figura 20 - Gráfico de um ensaio de dissipação.....	50
Figura 21 – Localização da área de estudo .....	54
Figura 22 - Seção típica do projeto de alteamento da barragem.....	55
Figura 23 - Fluxograma do processo das etapas da caracterização da barragem.....	58
Figura 24 - Imagens de satélite com a localização dos furos.....	59
Figura 25 - Localização dos furos realizados na praia de rejeitos.....	61
Figura 26 - Resultados dos furos realizados na barragem de rejeitos.....	62
Figura 27 - Análise estratigráfica do CPTU-01 e CPTU-02.....	64
Figura 28 - Análise estratigráfica do CPTU-03 e CPTU-04.....	65

Figura 29 - Análise estratigráfica do CPTU-05 e CPTU-06.....	66
Figura 30 - Localização dos furos realizados no talude da barragem.....	67
Figura 31 - Resultados dos furos realizados no talude da barragem.....	68
Figura 32 – Análise estratigráfica do CPTU-07 E CPTU-08.....	70
Figura 33 - Análise estratigráfica do CPTU-09 e CPTU-10.....	71
Figura 34 - Análise estratigráfica do CPTU-11.....	72
Figura 35 - Perfil da barragem com os furos na praia de rejeitos.....	73
Figura 36 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-01.....	74
Figura 37 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-02.....	75
Figura 38 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-03.....	76
Figura 39 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-04.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Gerais de acordo com o tipo de rejeito.....	20
Tabela 2 - Características físicas de acordo com o tipo de minério.....	20
Tabela 3 - Quadro de resumos da realização dos furos.....	59
Tabela 4 - Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu na praia de rejeitos.....	62
Tabela 5 – Parâmetros estimados estimado para solos coesivos (argilas).....	63
Tabela 6 - Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu no talude da barragem.....	68
Tabela 7 - Parâmetros estimados para solos não coesivos (areias e siltes).....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\sigma'_{vo}$	Tensão efetiva vertical
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$A_L$	Área lateral da luva de atrito
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
$A_{sb}$	Área da base da luva de atrito
$A_{st}$	Área do topo da luva de atrito
$A_T$	Área projetada do cone
$B_q$	Coefficiente de poropressão
CD	Linha que separa solos com comportamento dilatante de solos com comportamento contrátil quando submetidos ao cisalhamento
$C_h$	Coefficiente de adensamento horizontal
CPTu	Ensaio de Piezocone
$C_v$	Coefficiente de adensamento vertical
DH	Dados Hidrometeorológicos
$D_r$	Densidade relativa
E	Modo de deformabilidade ou de Young
$e_1$	Deformação axial
$e_2$ e $e_3$	Condição de liberdade das deformações laterais
$F_r$	Razão de atrito normalizada
$f_s$	Resistência por atrito lateral
$f_T$	Atrito lateral corrigido
$G_0$	Módulo de cisalhamento máximo
$I_c$	Índice de classificação do material
$I_{cRW}$	Índice de classificação do material modificado
K	Coefficiente de permeabilidade
$K_h$	Coefficiente de permeabilidade horizontal
$K_v$	Coefficiente de permeabilidade vertical
M	Módulo de deformação confinado ou oedométrico
$m_h$	Coefficientes de variação volumétrica na direção horizontal

$m_v$	Coeficiente de deformabilidade
$m_v$	Coeficientes de variação volumétrica na direção vertical
$N_{kt}$	Fator de capacidade de carga
OCR	Tensão de pré-adensamento
$Q_c$	Força atuando no cone
$q_c$	Resistência à penetração de ponta
$q_t$	Resistência corrigida
$Q_{n,cs}$	Resistencia de ponta normalizada do cone para a situação de estado crítico
$R_f$	Razão de atrito
SBT	Soil Behaviour Type
$SBT_n$	Soil Behaviour Type normalizado
SCPTu	Ensaio de piezocone com sísmico
$S_t$	Sensibilidade
$S_u$	Resistência ao cisalhamento não drenado
$u$	Poropressão
$u_2$	Poropressões neutras medidas na base do cone
$u_3$	Poropressões neutras medidas no topo da luva
$u_o$	Poropressão de equilíbrio
$V_s$	Velocidade da onda de cisalhamento
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\sigma_1$	Seção transversal do material
$\sigma_{vo}$	Tensão vertical total na profundidade
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo de areias
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\rho$	Densidade da massa do solo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	16
<b>2 OBJETIVO.....</b>	17
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	17
<b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>	17
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	18
<b>3.1 Rejeitos de mineração.....</b>	18
<b>3.2 Processo de segregação das praias de rejeito.....</b>	21
<b>3.3 Barragens de rejeitos.....</b>	24
3.3.1 Tipos de barragens.....	24
3.3.1.1 Barragens alteadas para montante.....	24
3.3.1.2 Barragens alteadas para jusante.....	25
3.3.1.3 Barragens alteadas de linha de centro.....	26
3.3.2 Principais tipos de falhas em barragens.....	27
<b>3.4 Monitoramento de barragens.....</b>	30
<b>3.5 Investigações geotécnicas.....</b>	33
3.5.1 Caracterização tecnológica dos rejeitos e barragem por meio de ensaio de campo com CPTu (Piezocone) .....	33
3.5.1.1 Análise dos dados.....	35
3.5.2 Caracterização e parâmetros geotécnicos de laboratório. ....	52
<b>4 LOCAL DE ESTUDO.....</b>	54
<b>4.1 Local de estudo.....</b>	54
<b>4.2 Geologia Regional.....</b>	56
4.2.1 Características Mineralógicas dos Rejeitos Ferruginosos.....	56
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	57
<b>5.1 Caracterização geotécnica.....</b>	57
<b>5.2 Análise geológico-geotécnico.....</b>	58
<b>5.3 Potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos.....</b>	60
<b>6 RESULTADOS.....</b>	61
<b>6.1 Análise dos resultados de CPTu na praia de rejeitos.....</b>	61
6.1.3 Análise estratigráfica da praia.....	64
<b>6.2 Análise dos resultados de CPTu no talude da barragem.....</b>	67
6.2.1 Análise dos parâmetros geotécnicos no talude da barragem.....	67
6.2.2 Análise estratigráfica do talude da barragem.....	70

<b>6.3 Potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos.....</b>	<b>73</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais importantes da economia do país e um dos principais setores do desenvolvimento nacional. Porém, o aumento da produção de minério principalmente de formações ferríferas tem trazido problemas relacionados à gestão ambiental dos resíduos desta atividade. Nas últimas décadas, o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico levaram ao aumento da atividade mineral e, portanto, ao aumento das áreas exploradas. Ao contrário do passado, a tecnologia de processamento atual pode alcançar uma alta produção. À medida que a demanda mundial por minério de ferro cresce, a busca por minerais com teores mais baixos se torna uma realidade, aumentando assim, a quantidade de rejeitos gerados e o porte das estruturas de contenção de rejeitos.

Os rejeitos de mineração são resíduos gerados no processo de beneficiamento de minérios, o crescente aumento da quantidade de rejeitos gerados por essa atividade, ao mesmo tempo, os atuais requisitos ambientais estão se tornando cada vez mais rigorosos, e é decidido adotar tecnologias que possam transportar, descartar e armazenar esses rejeitos de maneira eficiente, segura e econômica. A implementação de um aterro de rejeitos em qualquer região tem uma série de restrições sociais, ambientais e que desafiam seriamente o modelo de gestão de rejeitos e a segurança do local.

Nos últimos anos, os eventos envolvendo rupturas de barragens foram catastróficos, desde a questões ambientais, sociais e econômicas. Um dos principais problemas relacionados a barragens à montante é a estabilidade da estrutura, “A instabilidade induzida pela liquefação é uma das principais causas que levam à ruptura de barragens, sendo que os reservatórios de rejeitos constituem-se da instalação mais importante para manter a produção da mina.” (LIU *et al.*, 2013 apud SOUZA, 2018).

Devido a essas catástrofes a utilização desse método construtivo vem sendo proibida, principalmente em países que possuem abalos sísmicos, no Brasil devido aos últimos acontecimentos a ANM criou a resolução nº4/2019 que proíbe a construção ou alteamento pelo método a montante. O processo de descaracterização de barragens começou a ser mais frequente, mas ainda não é simples descaracterizar uma barragem. Por isso são necessários estudos de investigações geotécnicas, estudo das estruturas, considerando suas especificidades, com o intuito de agregar conhecimento para melhoria das técnicas de descomissionamento e controle das barragens de mineração.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

É de fundamental importância conhecer os rejeitos de minério de ferro de forma a conter possíveis problemas geotécnicos. O objetivo geral deste trabalho é avaliar as características geotécnicas (parâmetros geotécnicos) obtidas a partir de ensaios de CPTu realizadas na praia de rejeitos e no talude de uma barragem de rejeitos alteada a montante.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Complementarmente ao objetivo geral, estudos e análises intermediárias foram realizadas com foco a apoiar o tema central desta pesquisa:

- Analisar as estratigrafias das estruturas da barragem e os parâmetros geotécnicos de acordo com as características dos solos para a praia e para o talude da barragem;
- Analisar o potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Rejeitos de mineração

Rejeito de mineração é um termo usado para se referir à fonte de resíduos do processo de beneficiamento de minério.

Segundo Souza (2018), a maior parte dos resíduos de mineração é descartada hidraulicamente. Esse processo de formação ou estruturação faz com que o material proveniente dos sedimentos de rejeitos tenha características semelhantes ao transporte natural ou solo sedimentar. Para o projeto da estrutura autodrenante (aterro hidráulico) e a determinação do tamanho do reservatório e o perfil estratigráfico da praia devem ser estudados.

Os rejeitos possuem características diferentes, dependendo do tipo de material e processamento no beneficiamento do minério, portanto, podem ser finos (compostos por siltes e argilas) e depositados sob a forma de lama, ou podem ser granulares, apresentando granulometria mais grossa, formados por materiais não plásticos (areias) (ESPÓSITO, 2000 apud MAGALHÃES 2018).

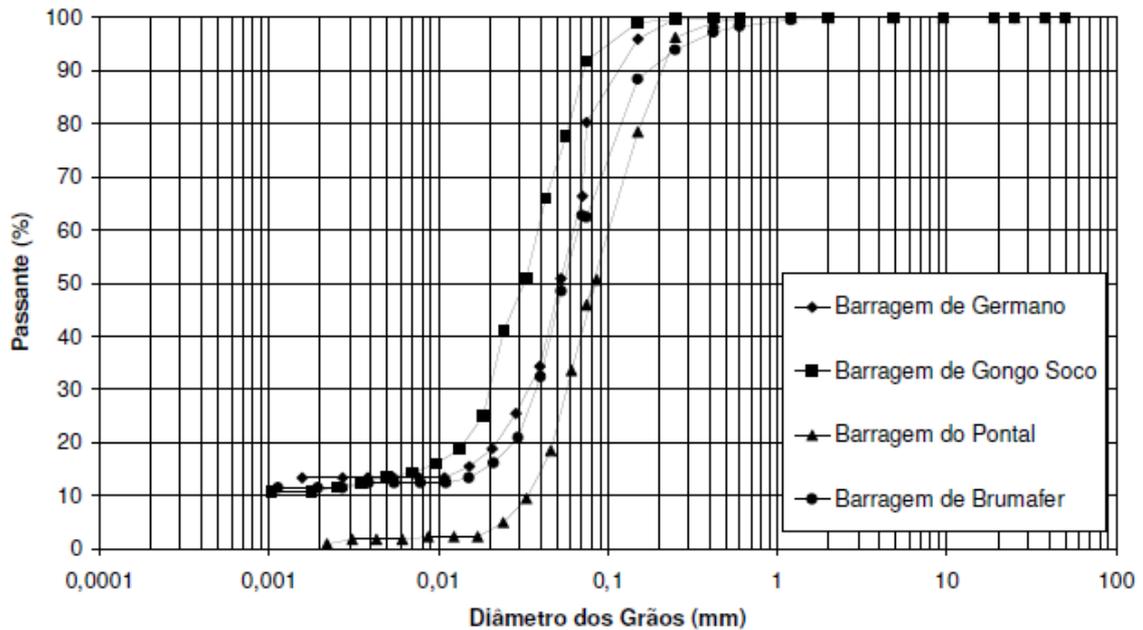
De acordo com Miranda (2018), o comportamento geotécnico dos resíduos de flotação depende da sua natureza, ou seja, da formação geológica da rocha matriz, do tipo de processamento e do método de deposição. Por exemplo, em um sistema de aterro hidráulico, é importante estudar o comportamento ao longo da formação de uma praia de rejeitos, graças ao mecanismo de segregação hidráulica, no qual areias e materiais com propriedades de silte podem ser encontrados em diferentes locais, dependendo das condições de comissionamento e do tipo de resíduo do rejeito.

A parte sólida é composta de partículas com composição granulométrica, mineralogia e físico-química diferentes e se adaptam diretamente ao processo de exploração e processamento do mineral submetido. Portanto, os rejeitos de mineração podem variar de materiais arenosos não plásticos a solos muito finos com alta plasticidade.

Albuquerque Filho (2004), destaca que os chamados rejeitos granulares costumam ter alta permeabilidade e, portanto, a compressibilidade é baixa. Além disso, pode-se dizer que esses parâmetros de resistência ao cisalhamento desses materiais estão na faixa de 25 a 35 °, o ângulo de atrito e o ângulo de coesão são muito pequenos ou nulos. Além disso, a densidade e o tamanho do grão mostram um alto valor e afeta diretamente o minério de ferro remanescente em rejeitos.

Para demonstra as diferentes características relacionadas a granulometria do rejeito de minério de ferro, a figura 1 apresenta a curva granulométrica de diferentes barragens do quadrilátero ferrífero.

Figura 1 - Curvas granulométricas de rejeitos de minérios de ferro



Fonte: Pereira (2001 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Os rejeitos granulares possuem características favoráveis quanto a resistência e condutividade hidráulica, portanto os rejeitos granulares possuem rápida consolidação com liberação imediata da água da polpa, garantindo uma melhor adequação aos equipamentos de terraplanagem utilizados na sua manipulação (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Miranda (2018) ressalta que os parâmetros geotécnicos dos rejeitos não só fornecem suporte para a formulação e avaliação da segurança do projeto, mas também são responsáveis pelo comportamento da barragem, como deformabilidade, infiltração e estabilidade de taludes.

Souza (2018) afirma que as características dos rejeitos estão diretamente relacionadas ao tipo, origem e teor do minério, bem como ao método de extração, ao tratamento escolhido para sua concentração e ao método de disposição, portanto o comportamento geotécnico depende diretamente do tamanho da partícula e da plasticidade dos finos do rejeito.

Fell *et al.* (2014 apud RIBEIRO, 2017) desenvolveram uma tabela com as características gerais de acordo com o tipo de rejeito (Tabela 1).

Tabela 1 – Características Gerais de acordo com o tipo de rejeito

<b>Tipo de Rejeito</b>	<b>Característica Geral</b>
<b>Rejeitos ultra-finos</b> Argilas fosfáticas, lama vermelha de alumina	Argila e silte, plasticidade alta, densidade e permeabilidade baixa.
<b>Rejeitos de plantas de lavagem</b> Carvão, bauxita, alguns ferrosos e níquel	Argila e silte, plasticidade média a alta, densidade e permeabilidade média a baixa.
<b>Rejeitos de mineral oxidado</b> Ouro, cobre, chumbo, zinco e outros	Silte e argila, presença de areia, plasticidade baixa a média, permeabilidade e densidade média
<b>Rejeitos de rochas são ou pouco alterada</b> Ouro, cobre, chumbo, zinco e outros.	Silte e presença de areia, não-plástica, densidade alta, permeabilidade média a alta

Fonte: Fell *et al.* (2014 apud RIBEIRO, 2017).

Vick (1990 apud RIBEIRO, 2017) apresenta quatro categorias de acordo com o tipo de mineral e a características físicas destes (Tabela 2).

Tabela 2 - Características físicas de acordo com o tipo de minério

<b>Categoria</b>	<b>Característica Geral</b>
<b>Rejeitos de rochas brandas</b> Carvão Potássio	Contém fração de areia e finos, mas a fração fina pode dominar as propriedades em geral pela presença de argila.
<b>Rejeitos de Rochas Duras</b> Chumbo-zinco Cobre Ouro-Prata Molibdênio Níquel	Pode conter frações de areias e frações finas, porém as frações finas são geralmente de baixa plasticidade para não plásticas. Frações de areias dominam as propriedades para propósitos de engenharia.
<b>Rejeitos Finos</b> Argilas fosfáticas Bauxita Finos areias betuminosas	Frações de areia geralmente pequenas ou ausentes. Comportamento do material, particularmente, características de sedimentação consolidação, dominadas por partículas e argila e silte e pode apresentar problemas de volume para disposição.
<b>Rejeitos Granulares</b> Areias betuminosas Urânio Gipsita Fosfato	Contém principalmente areia ou partículas de silte não plásticos exibindo comportamento arenoso e geralmente propriedades de engenharia favoráveis.

Fonte: Vick (1990 apud RIBEIRO, 2017)

### 3.2 Processo de segregação das praias de rejeito

Segundo Vick (1990) os rejeitos são depositados hidraulicamente, geralmente através de alguma forma de descarga periférica, método de descarga por spigotting ou rotativo de ponto único. Isto resulta em uma praia de rejeitos e áreas de lama associada a barragem.

No processo de segregação o fluxo da polpa provoca a seleção de partículas, depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo, dependendo do tamanho e densidades dos grãos. Sendo assim, gerando grande variabilidade deposicional e estrutural, gerando estratigrafias importantes para entender parâmetros como resistência, deformabilidade e permeabilidade (D'AGOSTINO, 2018).

Este processo de deposição produz uma praia altamente heterogênea, como pode servir de exemplo a Figura 2:

Figura 2 - Estrutura sedimentar plano paralela presente ao longo das praias de rejeito.

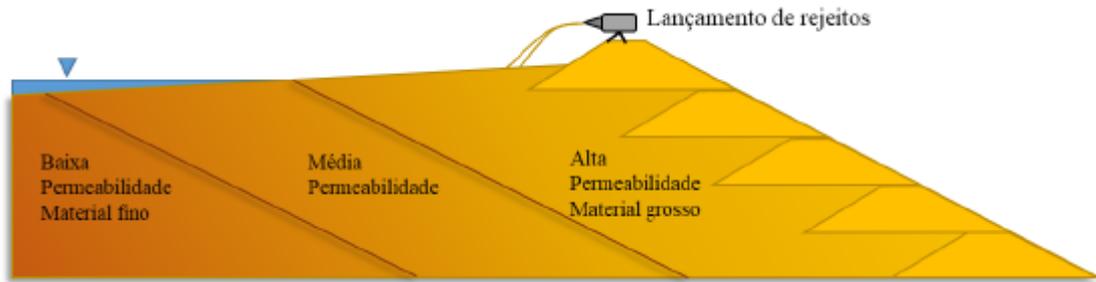


Fonte: D'Agostino (2018).

A permeabilidade média dos rejeitos diminui com o aumento do teor finos (VICK, 1990). É comumente esperado que a permeabilidade varie com a distância do reservatório em relação ao ponto de lançamento do rejeito.

Conforme Vick (1990), o conceito clássico proposto por Kealy & Busch (1971 apud VICK, 1990) prevê a existência de três zonas distintas: O modelo consiste em uma área de alta permeabilidade rejeitos arenosos perto do ponto de lançamento, uma zona de permeabilidade média e uma área de baixa permeabilidade de rejeitos finos depositados em um lago de sedimentação. Conforme a figura 3:

Figura 3 - Segregação em aterro hidráulico



Fonte: Vick (1990 apud SOUZA, 2018).

Nos rejeitos com ferro e outras partículas de alta densidade, essas zonas podem ser alteradas, o que é muito comum nos rejeitos destes minérios. Desta forma, as partículas finas de ferro não recuperadas no processo são depositadas próximo à zona do lançamento de rejeitos, alterando sua permeabilidade, portanto, não é considerada a zona de maior permeabilidade neste modelo como pode ser visto na figura 4:

Figura 4 - Segregação hidráulica em depósitos de minérios de ferro



Fonte: Santos (2004 apud SOUZA, 2018)

Observa-se que o efeito da densidade de partículas de ferro tendem a gerar um processo de seleção baseado no peso das partículas de ferro presentes nesses rejeitos.

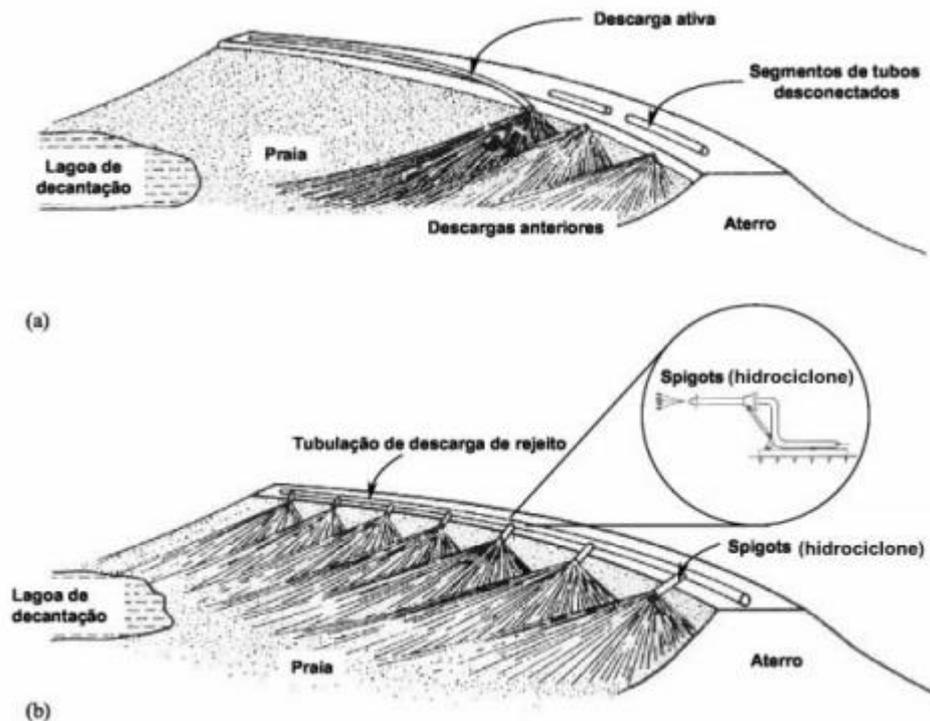
Segundo Santos (2004) a densidade é a medida indireta da estrutura dos solos e, conseqüentemente, de seus parâmetros geotécnicos. O estabelecimento de uma alta densidade é um ponto crítico para ser considerado no projeto de aterros hidráulicos, pelo fato da magnitude de seu valor ter uma influência direta na estabilidade da estrutura.

É importante analisar a densidade no campo associada às diferenças no valor da massa específica dos grãos ao longo do depósito, fator preponderante no caso do rejeito de minério de ferro. Portanto, as tendências da análise das propriedades geotécnicas dos resíduos de minério de ferro estariam ligadas à avaliação das características dos resíduo pós-flotação com base no teor de ferro e na variação de densidade (PRESOTTI, 2002 apud SANTOS, 2004).

Porém, o maior problema ainda está na metodologia ideal de separação de partículas de ferro ou um processo de avaliação racional de vários teores de ferro relacionado à granulometria do rejeito. De uma maneira geral, o alteamento de uma barragem pode assumir várias configurações, cada uma com características, requisitos, vantagens e desvantagens, dependendo principalmente de como o lançamento do rejeito é feito e principalmente a velocidade.

Segundo Vick (1990), a deposição de rejeitos na praia pode ser realizada por descarga de um único ponto ou vários pontos. A descarga de um ponto requer que a extremidade aberta do tubo de descarga de rejeitos seja realocada periodicamente para formam uma série de deltas adjacentes e sobrepostos. A descarga de hidrociclone ou canhões (Spigots) realiza a mesma finalidade, descarregando a lama de rejeitos através de torneiras bem espaçadas, sem a necessidade de realocação frequente do lançador de rejeitos ou desconexão de segmentos de tubo. As pontas são geralmente com válvulas individuais para controle e distribuição de descarga como pode ser visto na figura 5:

Figura 5 - Métodos de descarga usualmente empregados em barragens de rejeitos, único ponto (a) e vários pontos (b)



Fonte: Ribeiro (2000 apud D'AGOSTINO, 2018).

Na prática, a maioria dos dutos de rejeitos operam dentro de uma velocidade na faixa de cerca de 1,5 - 3,05 metros / segundo, dependendo da aspereza e distribuição de tamanho dos rejeitos, a densidade da polpa da pasta e outros fatores. Velocidades excessivamente altas, por outro lado, causam desgaste da tubulação, bem como grande perda de carga (VICK, 1990).

### 3.3 Barragens de rejeitos

#### 3.3.1 Tipos de barragens

Segundo Magalhães (2018), o tratamento e disposição dos resíduos podem ser realizados em cava esvaziada, pilhas em minas subterrâneas, barragens, etc. De acordo com características geológicas e feições topográficas do Quadrilátero Ferrífero, o tratamento através de barragens é a forma mais comum utilizada pelas empresas de mineração nessa região, sendo o rejeito o material usado na construção dessas contenções.

Conforme a Norma Brasileira 13028/2017 (ABNT, 2017), é definido como barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.

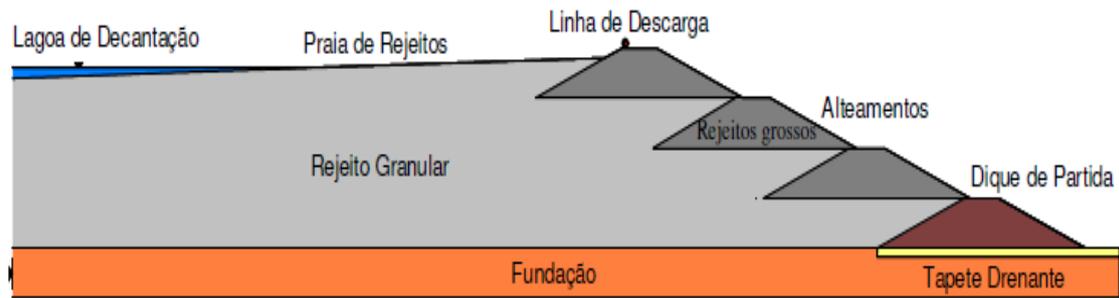
A classificação das barragens de mineração está relacionada aos procedimentos de construção e materiais usados no processo de alteamento, considerando o uso do próprio rejeito como material de construção por meio de tecnologia de aterro hidráulico, três métodos de construção podem ser distinguidos e especificados de acordo com Albuquerque Filho (2004), sendo eles:

- Barragens alteadas para montante;
- Barragens alteadas para jusante;
- Barragens alteadas de linha de centro.

##### 3.3.1.1 Barragens alteadas para montante

O passo inicial para construção deste tipo de barragem, consiste na construção de um dique de partida, geralmente de material argiloso ou rocha compactada. Depois desse estágio, os rejeitos são lançados por canhões, hidrociclones, spigots ou simplesmente pela desconexão de tubulações a montante da linha de simetria do dique, criando uma deposição de praia, que servirá de base e fornecerá material para construção diques subsequentes. Como pode ser visto na Figura 6:

Figura 6 - Método de barragem alteada para montante



Fonte: Albuquerque Filho (2004).

O método a montante apresenta como vantagens:

- O próprio rejeito serve de fundação para os próximos diques;
- Rapidez e a simplicidade na execução dos alteamentos, normalmente realizados pela equipe técnica da própria mineradora;
- A utilização de hidrociclones no processo de disposição de rejeitos representa uma melhoria da característica geotécnica do material de rejeito na praia e conseqüentemente uma otimização na velocidade de construção dos alteamentos;
- Custo para construção relativamente baixo.

Desvantagens:

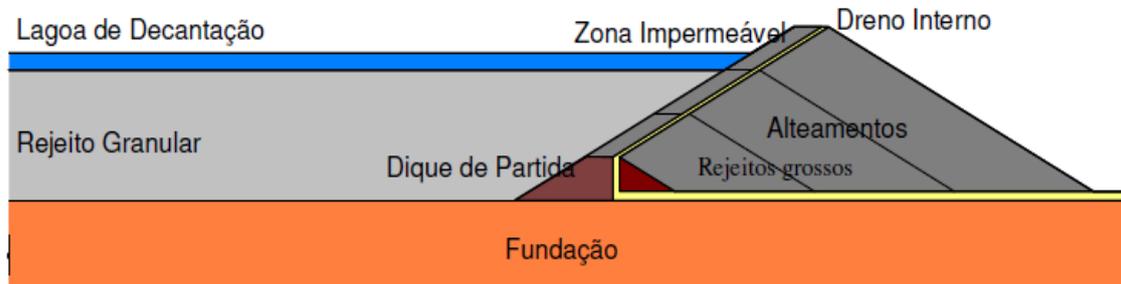
- Baixa segurança;
- Sob condição saturada e estado de compactação fofo, os rejeitos tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação sob cargas dinâmicas ou estáticas;
- Dificuldade na implantação de um sistema eficiente de drenagem interna para controle do nível d'água e da percolação dentro da barragem;
- Susceptibilidade a erosão interna.

### 3.3.1.2 Barragens alteadas para jusante

Neste método, a primeira etapa é construir um dique inicial, geralmente solo ou rocha compactada. Depois que o dique é feito, os rejeitos da flotação são descarregados e compactados a jusante até que a altura do projeto seja atingida. Este método foi desenvolvido com a finalidade de reduzir riscos associados ao método de montante, principalmente no que se diz respeito à susceptibilidade a liquefação. Nesse caso, o dique deve ser dotado de drenagem

interna (filtro vertical e tapete drenante) e o talude a montante é impermeabilizado com argila ou materiais sintéticos. Como pode ser visto na figura 7:

Figura 7 - Método de barragem alteada para jusante



Fonte: Albuquerque Filho (2004).

O método a jusante apresenta como vantagens:

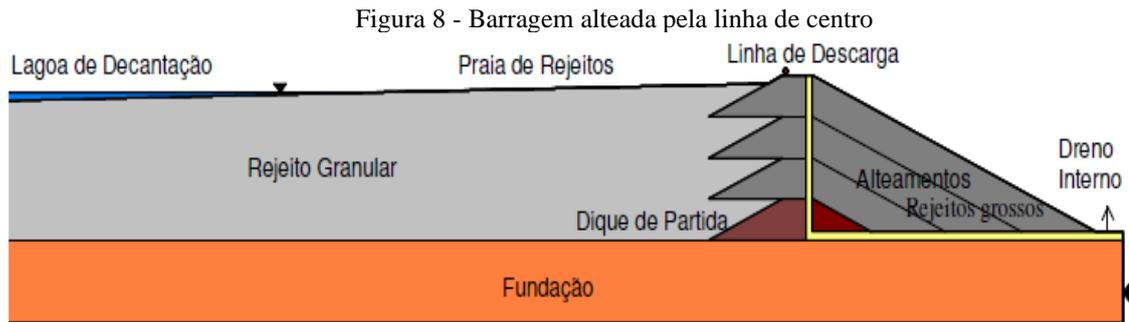
- Melhor controle do lençol freático e do nível d'água;
- Drenagem interna pode ser instalada durante qualquer etapa de expansão;
- Resiste satisfatoriamente a efeitos dinâmicos, como forças sísmicas;
- As atividades de construção da barragem não provocam interferência na operação dos rejeitos;
- Não existe limitação técnica quanto à altura máxima da barragem;
- Melhores condições de estabilidade para as estruturas;
- Maior resistência ao cisalhamento.

Desvantagens:

- Alto custo envolvido na execução destas estruturas;
- Necessidade de grandes volumes de material compactado;
- Não possibilita a proteção com cobertura vegetal;
- Menor velocidade de alteamento.

### 3.3.1.3 Barragens alteadas de linha de centro

No método de barragens por linha de centro é possível a utilização de zonas de drenagem interna ou mesmo núcleos impermeáveis que possibilitam um melhor controle da linha de saturação e da percolação dentro do maciço da barragem. Este método utiliza uma técnica intermediária, que complementa a segurança do método para jusante com o custo e velocidade do alteamento para montante como pode ser visto na figura 8:



Fonte: Albuquerque Filho (2004).

O método de linha de centro apresenta como vantagens:

- Material de alteamento argiloso pode ser oriundo de decapeamento da mina, estéril ou empréstimo;
- Reduz o risco por susceptibilidade a liquefação;
- Resiste satisfatoriamente a efeitos dinâmicos, como forças sísmicas;

Desvantagens:

- Não podem ser construídos com o próprio rejeito;
- Não possibilita a proteção com cobertura vegetal;
- Custo com transporte de material argiloso.

### 3.3.2. Principais tipos de falhas em barragens

Nos últimos anos, ocorreram recorrentes acidentes em barragens de mineração. Entre as causas que causam o colapso dessas estruturas estão as condições de operação, instrumentação e monitoramento inadequados. A Ineficiência de estudos de campo relacionados à falta de manutenção adequada e inércia das empresas de mineração em relação ao conhecimento da real condição de suas barragens em causar falhas nessas estruturas, que na grande maioria dos casos causam deploráveis consequências sociais, econômicas e ambientais (MAGALHÃES, 2018).

O estudo dos acidentes em barragens é de grande importância para a compreensão do mecanismo de dano e sua evolução. Esses estudos podem constituir a entrada mais importante para a melhoria e evolução dos padrões e detalhes de projeto e construção. Apenas a análise de acidentes de barragens pode mostrar claramente quais decisões de projeto, construção e operação são insuficientes e quais podem ser usadas como uma ferramenta para evitar certos modos de falhas.

Arnez (2000), estabeleceu um estudo baseado em uma análise estatística de 45 casos de acidentes ocorridos em todo o mundo e esses acidentes foram identificados devido à infiltração

de fluidos no maciço da barragem, que foram controlados pela mineradora, seja durante a construção ou operação da barragem, ou em abandono. O problema é agravado por barragens de alteamento a montante, método que já representam sérios problemas com aspectos de design e segurança.

Estudos de risco aplicados à segurança de barragens tendem a identificar três tipos de modos de falha: erosão interna, movimento de massa e falhas hidráulicas (LAFITTE, 1993, apud PENNA, etc., 2015, apud SOUZA, 2018)

O fenômeno da erosão interna ocasiona a desestabilização do equilíbrio de forças na matriz do solo. Também conhecida como piping, é uma das principais causas de ruptura em barragens, especialmente em estruturas construídas com núcleo de terra.

Este processo erosivo ocorre quando o solo, maciço ou partículas de fundação das barragens, são transportados pelo fluxo de percolação existente. O carreamento de partícula começa no ponto de partida do escoamento que penetra no maciço, causando erosão regressiva, ou seja, declive de baixo para cima, formando um “tubo” pelo qual o fluxo é contínuo (PIMENTA FILHO, 2013 apud MAGALHÃES, 2018). Segundo ICOLD (2015) esse fenômeno ocorre quando as forças hidráulicas exercidas pela água que escoam pelos poros ou aberturas do maciço ou de sua fundação são suficientes para se desprender e guiar as partículas para fora dessas estruturas.

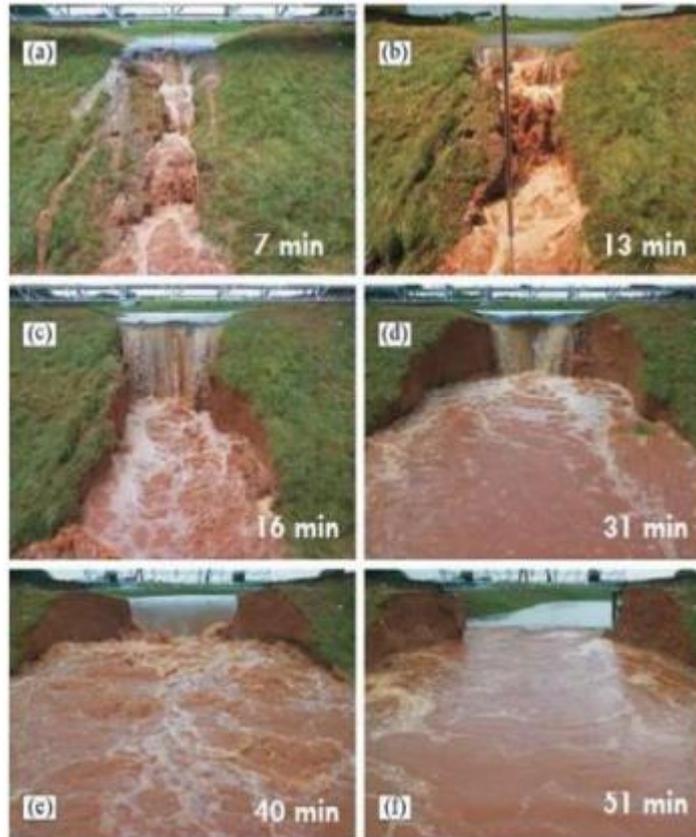
Nas erosões internas as forças de atrito, que tendem a arrastar partículas, geradas por infiltração de água torna-se maior do que aqueles que resistem ao movimento causando um desequilíbrio. É importante notar que o gradiente hidráulico tem uma relação direta com a intensidade dessa força de atrito. O Processo de erosão interna em barragens pode ocorrer através de um aterro, fundação ou aterro para uma fundação (SILVA, 2016).

Os movimentos de massa ocorrem devido a carregamentos especiais, propriedades de materiais diferentes do projeto determinado ou características geológicas não descobertas ou consideradas durante as etapas de projeto e construção. A característica desse modo de ruptura é que o equilíbrio limite da barragem, ombreiras ou fundação, recalques que possibilitam galgamento, liquefação do maciço ou de solos de fundação, ruptura de taludes de montante por rebaixamento rápido do reservatório. (PENNA; ARAGÃO; FUSARO, 2015 apud SOUZA, 2018).

O galgamento ocorre quando o vertedouro não tem capacidade suficiente frente a uma cheia, e a água verte sobre o cume da barragem, iniciando-se a erosão do talude de jusante da estrutura, que pode resultar na formação da brecha de ruptura de forma regressiva e ruptura

global do barramento (ÁVILA *et al.*, 2017 apud MAGALHÃES, 2018). Esse tipo de ruptura ocorre de maneira rápida como pode ser visto na figura 9:

Figura 9 - Ruptura por galgamento



Fonte: Ávila *et al.* (2017 apud MAGALHÃES, 2018).

Falhas hidráulicas segundo Pereira (2005), a liquefação pode ser entendida como um processo em que cada material se comporta como um fluido desde o seu estado natural. No entanto, a ocorrência deste fenômeno deve ocorrer simultaneamente com a redução das tensões efetivas e um aumento da poropressão, transformação esta resultante da aplicação de uma carga, seja de forma dinâmica (por exemplo, terremotos e vibrações) ou estática (subida da linha freática, carregamentos rápidos, etc.).

A liquefação é um processo de fratura que ocorre em solos saturados não coesos e sob condições não drenadas. Durante o carregamento, a porosidade aumenta para um valor igual à tensão de confinamento inicial, a tensão efetiva ou intergranular no esqueleto do material é reduzida a zero, como resultado do qual o material perde toda a sua resistência ao cisalhamento, comportando como para líquido viscoso (CASAGRANDE, 1975; CASTRO, 1969; POULOS, 1981; TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996 apud SOUZA, 2018).

Segundo Freire Neto (2009), o processo de fratura no campo associado à liquefação é caracterizado por movimentos rápidos e de alto alcance causados por gatilho estático ou dinâmico. A massa do solo flui, espalhando-se por tensões cisalhantes atuantes, tornando tão limitados quanto a resistência ao cisalhamento disponível.

De acordo com Davies *et al.* (2002 apud CASTILHO, 2017), a mecânica dos solos clássica propôs uma visão simplificada do carregamento de solos granulares, saturados e sem coesão. Essa visão é de que, ao se definir o ângulo de atrito e a poropressão de uma areia, pode-se determinar a resistência dessa areia, ou seja, sua resistência à drenagem. No entanto, solos sem coesão e saturados, assim como as argilas, podem apresentar queda de resistência, quando em condições não drenadas e submetidas a carregamentos rápidos.

Nem todos os solos podem gerar ou manter a pressão excessiva dos poros necessária para que a liquefação ocorra. Portanto, é importante determinar a susceptibilidade do solo a esse fenômeno.

Na faixa de tamanho de partícula entre silte espesso e areia fina, a liquefação é mais provável de ocorrer. Em sedimentos mais finos, a maior coesão torna a separação de partículas mais difícil, enquanto em sedimentos mais espessos, melhores condições de drenagem tornam a liquefação mais difícil (MORETTI *et al.*, 1999 apud CASTILHO, 2017).

Conclui-se, portanto, que dentre as estruturas geotécnicas comumente encontradas na mineração, estão as barragens de rejeito arenosos erguidas a montante, construídas com a utilização de aterro hidráulico, onde os grãos do solo se assentam livremente e são caracterizados por um nível de água elevado, área com possibilidade de liquefação, ou seja, em uma área com materiais que apresentam tendência de contração mediante o cisalhamento, estão entre as estruturas mais propensas a se liquefazer (CASTILHO, 2017).

### **3.4 Monitoramento de barragens**

A falha de barragem pode ser causada por alguma associação errada, seja ela relacionada à operação do projeto, construção ou finalização do projeto. Essas falhas podem causar grandes desastres. Além do meio ambiente, eles também danificam particularmente a infraestrutura local e, em alguns casos, podem causar vítimas. A literatura registra vários casos históricos de rompimento de barragens de rejeitos causados por liquefação.

Nos últimos anos, o Brasil sofreu com dois grandes rompimentos de barragens, Mariana em 2015 e em Brumadinho em 2019, causando danos econômicos para as mineradoras, desastre

ambiental e várias perdas humanas. Por isso há necessidade de acompanhar o comportamento das obras envolvendo a construção de barragens até o seu descomissionamento.

Para reduzir o risco de acidentes no projeto de barragens devido aos impactos que causam, justifica-se a preocupação atual em instrumentar barragens com tecnologia moderna e sempre que possível. A previsão do desempenho futuro refere-se aos dados obtidos do instrumento que indicam o comportamento futuro da barragem. Tais prevenções devem indicar condições operacionais normais satisfatórias ou indicar riscos potenciais que requerem ações corretivas (MACHADO, 2007).

As inspeções de campo (inspeção visual) e instrumentação de auscultação devem se complementar, as inspeções relacionadas à uma análise cuidadosa dos dados fornecidos pela instrumentação são uma excelente ferramenta para avaliar o desempenho das estruturas de barragens. De acordo com Machado (2007) as inspeções podem ser divididas em cinco tipos: rotineiras, periódicas, formais, especiais e de emergência. A equipe responsável pela inspeção deve ser formada por especialistas em barragem.

Os 5 principais tipos de inspeção segundo Machado (2007):

Inspeções de rotina devem ser realizadas em um curto período de tempo (não mais de uma semana), porque certos fenômenos que ocorrem na barragem podem causar uma destruição extremamente rápida dependendo do estado de deterioração. Por exemplo, rachaduras e erosão interna se desenvolverão rapidamente de acordo com o tipo de rejeito, velocidade de infiltração e tensões confinantes.

Inspeções periódicas deve ser feito em uma data específica, podendo ser realizada pela própria equipe da mineradora ou por terceiros desde que sejam capacitados para a execução do projeto.

Inspeções formais deve ser realizada uma vez por ano, e com a participação de engenheiros e geólogos, a inspeção deve ser rigorosamente verificada por meio de uma lista de fundamentos e elaborada para esse fim e confirmada em relatório técnico. O incidente descoberto deve ser relatado e comprovado em um relatório fotográfico.

Inspeções especiais, as inspeções devem ser realizadas a cada 5 a 10 anos, dependendo da possibilidade de ruptura e da velocidade de alteamento. A inspeção deve ser realizada por consultores e especialistas em barragens com amplo conhecimento técnico, e se possível, descrevendo o histórico da barragem e o status de segurança do empreendimento.

Inspeções de emergência são inspeções em barragens, partes de barragens ou estruturas auxiliares. Isso porque a ocorrência de eventos ou fenômenos anormais (geralmente repentinos)

podem prejudicar a estrutura ou a condição da área a jusante da barragem, podendo ser classificada em épocas de precipitação ou abalos sísmicos.

A instrumentação de auscultação refere-se aos equipamentos inserido na barragem principal e fundações tem como função medir grandezas que podem indicar comportamento estrutural (grau de segurança). Não se deve automatizar todos os instrumentos de auscultação, fazendo com que haja presença obrigatória de um profissional. Sendo que se automatizar algum instrumento deve ter a condição manual de leitura para verificação (ANA, 2019).

A Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sugere de acordo com o princípio de funcionamento, os principais tipos de instrumentação de auscultação para monitoramento e controle de barragens são:

#### Dados hidrometeorológicos DH

Tem como função analisar o nível d'água através de régua limnimétricas e dados hidrométricos, no montante ou jusante, pluviometria, temperatura ambiente máxima/mínima (°C), umidade relativa ambiente máxima/mínima (°C)

#### Inclinômetro

É um indicador de movimentação horizontal, consiste em uma haste cilíndrica com sensor de inclinação embutido e duas ou quatro rodas distribuídas lateralmente. As rodas são instaladas em ranhuras no tubo flexível enterrado no solo, de forma que o sensor siga a direção do tubo. É então medido a inclinação da tubulação em intervalos constantes e calculado o deslocamento de cada segmento da tubulação com base no ângulo de inclinação. As medições de deslocamento são feitas ao longo do tempo para monitorar o deslocamento do solo.

#### Medidor de Recalque

É um indicador de movimento vertical, mede a distância entre posições com a utilização de sensores hidráulicos, mecânicos e magnéticos. Sendo esses medidores:

- BR - Barra e hastes telescópicas;
- CS - Caixa Suéca;
- KM - Komezú-Matuoka;
- MH - Medidor de Hastes;
- MM - Medidor Magnético;
- MR - Medidor de Placas e Tubos Telescópicos;
- EN – Eletronível.

#### Medidor de Vazão

Sistema com medição da quantidade de água, permite o cálculo do fluxo de água que sai da barragem. Tipos de medidor de vazão:

- Tipo 1 – Calha Parshall;
- Tipo 2 – Medidor de Placa Delgada / Corte Triangular;
- Tipo 3 – Medidor de Placa Delgada / Corte Trapezoidal;
- Tipo 4 – Medidor de Placa Delgada / Corte Retangular;
- Tipo 5 – Medidor Tipo Tubo ou Tanque.

#### Medidor do Nível d'água

Permite a determinação da linha freática existente. Sistema com medição da influência de artesianismo da água de percolação.

#### Piezômetro

Sistema, com medição da influência de artesianismo da água de percolação, permite a determinação da Pressão existente ou sua Cota Piezométrica equivalente. Tipos de Piezômetros:

- PE – Piezômetro Elétrico;
- PH – Piezômetro Hidráulico;
- PN – Piezômetro Pneumático;
- PZ – Piezômetro de Tubo.

#### Célula de tensão total para solos

Sistema, com medição da influência de empuxo, permite a determinação da pressão ou tensão existente. Podendo existir célula de tensão total pneumática, hidráulica e elétrica.

### **3.5 Investigações geotécnicas**

#### 3.5.1 Caracterização tecnológica dos rejeitos e barragem por meio de ensaio de campo com CPTu (Piezocone)

Os testes geotécnicos no local provaram ser uma ferramenta interessante para determinar as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade do solo, principalmente no caso de solos arenoso podendo causar mudanças significativas no comportamento tensão-deformação dos materiais testados (WROTH, 1984 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

A caracterização de solos sedimentares, especialmente solos intermediários (areias siltosas, siltes não plásticos, argilas siltosas e rejeitos de granulometria fina) é muitas vezes

desafiadora devido à dificuldade de amostragem, teste e interpretação de dados de campo. Os resultados dos testes de penetração (CPTu) podem ser usados para traçar perfis estratigráficos bem detalhados e estimar parâmetros geotécnicos em comparação com amostragem e testes de laboratório (SOUZA, 2018).

Segundo Dornas (2008), o ensaio de CPTu consiste na cravação de um terreno com uma ponteira cônica ( $60^\circ$  de ápice) a uma velocidade constante de 2 cm/s. A seção transversal do cone pode ser de  $10 \text{ cm}^2$  ou  $15 \text{ cm}^2$ , e a área da luva de atrito lateral é de  $150 \text{ cm}^2$ . O equipamento de cravação possui uma estrutura de reação e um sistema de aplicação de carga. A penetração é obtida através do acionamento contínuo de hastes com comprimento de 1 m, mediante a operação de um pistão hidráulico.

O cone possui um elemento poroso com objetivo garantir a medição correta da poro-pressão no solo com tempo mínimo de resposta do sensor de pressão. De acordo com Campanella & Robertson (1988) a utilização de dois grupos distintos de materiais como filtro a cerâmica e aço geram uma permeabilidade reduzida e polipropileno uma maior permeabilidade. Deve-se utilizar um fluido para saturar o elemento poroso, geralmente são utilizados óleos de silicone ou glicerina, devido a viscosidade e baixa compressibilidade. Esta metodologia, proposta por Robertson (1988), tem por finalidade garantir que o elemento poroso se mantenha saturado até atingir o nível d'água.

Na cravação do ensaio de CPTu a cada 2 cm de profundidade, a aquisição automática das informações de resistência à penetração da ponta ( $q_c$ ), resistência por atrito lateral ( $f_s$ ), e poro-pressão ( $u_2$ ) são gerados.

Dornas (2018) ressalta que com uma calibração do cone adequada é possível obter um registro contínuo da resistência à penetração, tendo como resultado uma estratificação detalhada do solo, pelo fato dos dados serem transmitidos por ondas acústicas, elimina qualquer influência do operador na obtenção dos dados.

Ao identificar as camadas do solo, os cones mecânicos (CPT) tendem a mostrar um perfil muito homogêneo. Com o desenvolvimento de cones elétricos, o equipamento tornou-se mais sensível, podendo detectar camadas finas, que antes não eram detectadas no resultado estratigráfico, com a incrementação do elemento poroso o CPTu (elétrico) tornou-se uma das ferramentas mais importantes na determinação detalhada da estratificação de solos (SMITS, 1982 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Com o ensaio de CPTu, também é possível avaliar, através de correlações, as seguintes características dos solos: estratigrafia, perfil geotécnico, coeficiente de adensamento ( $C_h$  e  $C_v$ ), densidade relativa ( $D_r$ ), resistência não drenada ( $s_u$ ), ângulo de atrito efetivo de areias ( $\phi'$ ),

história de tensões (tensão de pré-adensamento, OCR), coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), módulo de cisalhamento máximo ( $G_o$ ), coeficiente de deformabilidade ( $m_v$ ), módulo de deformabilidade ou de Young ( $E$ ), ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ), módulo de deformação confinado ou oedométrico ( $M$ ), a sensibilidade ( $S_t$ ), os coeficientes de permeabilidade ( $k_h$  e  $k_v$ ).

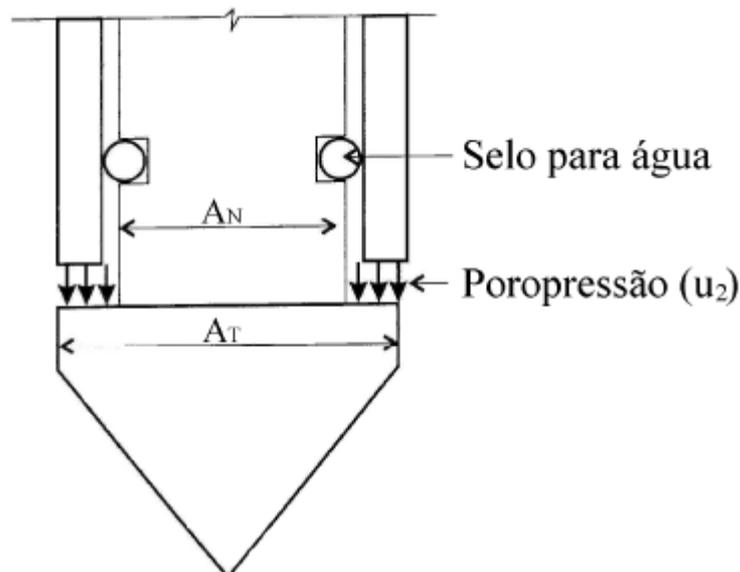
### 3.5.1.1 Análise dos dados

Os resultados dos Cálculos de CPTu são baseados em relações empíricas.

#### Resistencia de Ponta - $q_c$ .

As medidas da resistência de ponta e o atrito lateral são influenciados diretamente pela poropressão exercida em áreas desiguais da geometria do cone (figura 10), principalmente em depósitos argilosos moles, onde a poropressão apresenta valores significativos em relação a resistência de ponta, nesse sentido torna-se importante a correção da resistência de ponta e do atrito lateral (CAMPANELLA *et al.*, 1982 apud ABULQUERQUE FILHO, 2004).

Figura 10 - Relação das áreas do piezocone



Fonte: Adaptado de HACHICH *et al.* (1998 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

No caso da resistência de cone  $q_c$ , a equação é a força atuando no cone  $Q_c$ , dividida pela área projetada do cone  $A_T$ , como pode ser visto na equação (1):

$$q_c = \frac{Q_c}{A_T} \quad (1)$$

Na equação da resistência de ponta corrigida a expressão é dada pela equação (2):

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (2)$$

Onde:

$a$  = Relação das áreas do cone ( $A_N/A_T$ );

$q_t$  = Resistência de ponta real corrigida.

#### Ângulo de Atrito (Sleeve friction) - $f_s$

Segundo (ALBUQUERQUE FILHO, 2004) a correção do ângulo de atrito na engenharia não é muito usual devido à falta de poropressões dinâmicas na região da luva de atrito ( $u_3$ ).

Para correção do atrito lateral, utiliza-se a equação (3), proposta por KONRAD (1987):

$$f_T = f_s - u_2 \left( \frac{A_{sb}}{A_T} \right) + u_3 \left( \frac{A_{st}}{A_L} \right) \quad (3)$$

Onde:

$f_T$  = atrito lateral corrigido;

$f_s$  = resistência por atrito lateral;

$u_2$  = poropressões neutras na base do cone;

$u_3$  = poropressões neutras no topo da luva

$A_{sb}$  = área da base da luva de atrito;

$A_{st}$  = área do topo da luva de atrito;

$A_L$  = área lateral da luva de atrito.

#### Razão de Atrito - $R_f$

Segundo (MELLIA, 20017), no ensaio de CPTu, os resultados são geralmente apresentados na forma de gráficos. Quantidades medidas de razão de atrito ( $R_f$ ), pode ser expressado pela equação (4):

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (4)$$

### Classificação dos Solos

A partir das medidas de poropressões geradas durante o processo de cravação, surge o parâmetro de poro-pressão ( $B_q$ ), representado pela equação (5):

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (5)$$

Onde:

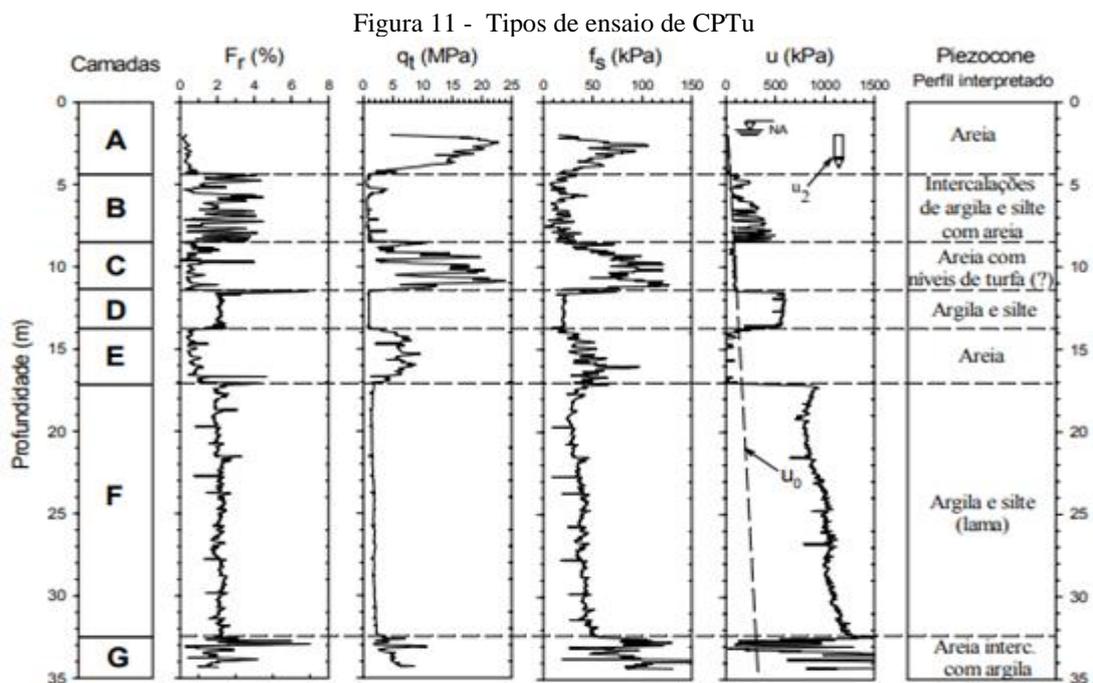
$u_2$  = poro-pressão medida na base da sonda piezométrica;

$u_0$  = poro-pressão de equilíbrio;

$q_t$  = é a resistência real mobilizada;

$\sigma_{v0}$  = tensão vertical total na profundidade.

A Figura 11 mostra um gráfico típico do teste de CPTu, onde as medidas contínuas de resistência e poropressão ( $q_t$ ,  $R_f$ ,  $u_0$ ,  $u$  e  $B_q$ ) são plotadas ao longo da profundidade, sendo usado para identificar com precisão as camadas do solo.



Fonte: Robertson *et al.* (1989 apud Mio, 2005).

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012 apud MELLIA, 2017), uma camada de argila mole é identificada por altos valores de poropressão e baixos valores de  $q_t$ , enquanto que, uma camada de areia é indicada por uma poro-pressão próxima à hidrostática e altos valores de  $q_t$ .

Na figura 11 percebe-se a existência de uma camada de argila mole de 17 a 32,5 metros, caracterizada por valores baixos de resistência de ponta  $q_t$  e excesso de poropressão  $u_2$ . Já na profundidade 13,5 a 17 metros, pode ser entendido como uma camada de areia, pelo aumento significativo da resistência de ponta  $q_t$  e dos baixos valores de poropressão chegando à zero (pressão hidrostática) e de valores altos para o  $f_s$  (MELLIA, 2017).

A classificação dos solos através do ensaio de piezocone é feita, comumente, na forma de ábacos. Segundo (MEDINA, 2007), os primeiros a apresentarem um gráfico baseado em CPTu com a resistência de ponta corrigida pelo parâmetro de poropressão  $B_q$ , medida no topo do cone foram Robertson *et al.* (1986).

A classificação do solo pelo ensaio de CPTu é feita de forma indireta. Os procedimentos de classificação são baseados em padrões de comportamento, o tipo de comportamento do solo é definido pela sigla SBT (Soil Behaviour Type). Existem vários ábacos para a classificação do tipo de solo.

O diagrama para se determinar o perfil do solo proposto por Robertson (1990) identifica áreas numeradas que separam os tipos de solo em 9 zonas. O autor propõe a inclusão do parâmetro de poropressão ( $B_q$ ) e a razão de atrito normalizada ( $F_r$ ) com resultados plotados em dois ábacos,  $Q_t$  versus  $F_r(\%)$  e  $Q_t$  versus  $B_q$  figura 12. Sendo  $Q_t$  e  $F_r$  expressados pelas equações (6) e (7):

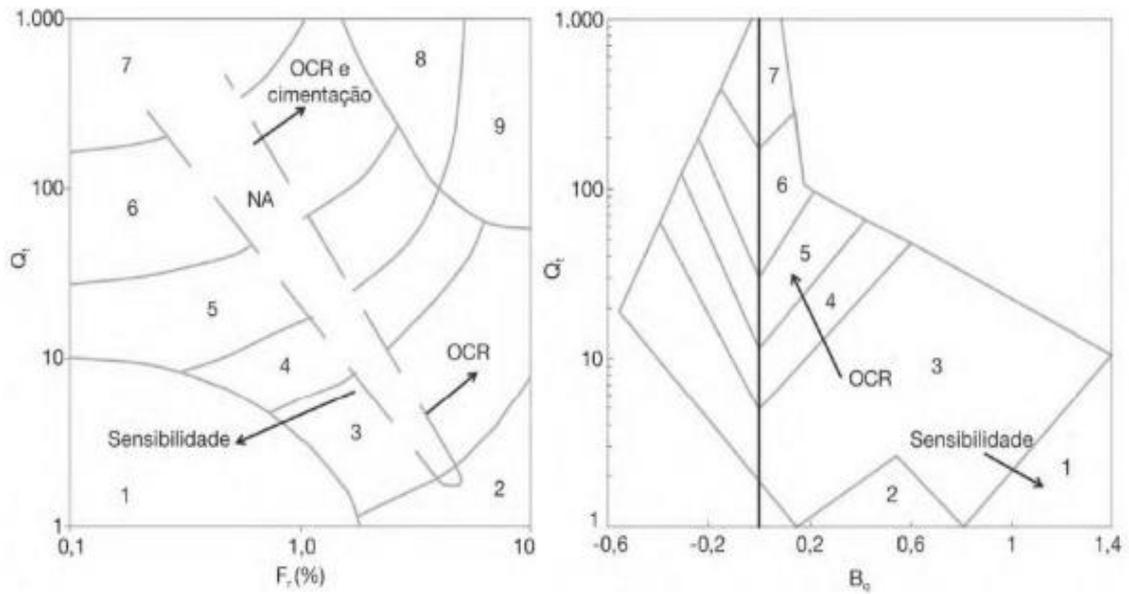
$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad (6)$$

Onde,  $\sigma'_{vo}$  é a tensão efetiva vertical ( $\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u_o$ )

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\% \quad (7)$$

Segundo Robertson *et al.* (1986) destaca que embora as medidas de poropressão sejam importantes no processo de classificação dos solos, ressalta a importância da utilização das três grandezas no ensaio de CPTu. Assim, obtém-se um ensaio relacionando a resistência de ponta corrigida com a razão de atrito e o coeficiente de poropressão.

Figura 12 - Ábacos  $Q_t$  versus  $F_r(\%)$  e  $Q_t$  versus  $B_q$  para a identificação dos tipos de solos



Fonte: Robertson (1990 apud MELLIA, 2017).

A figura 13 mostra a tabela de classificação de acordo com os 9 tipos zonas para identificação dos solos segundo Robertson.

Figura 13 - Classificação dos solos por tipo de comportamento

Tabela 1 - Classificação de solos por tipo de comportamento

Zona	Tipos de Solos
1	Solo fino sensível
2	Solo orgânico e turfas
3	Argilas – argilas siltosas
4	Argilas siltosa – silte argiloso
5	Siltes arenosos – areias siltosas
6	Areias limpas – areias siltosas
7	Areias com pedregulhos – areias
8	Areias – areias limpas
9	Areias finas rígidas

Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012 apud MELLIA, 2017).

### Índice de classificação do material - $I_c$

De acordo com Mellia (2017), O índice de classificação do material (material classification index) foi definido por Jefferies e Davies (1993 apud MELLIA, 2017) com o intuito de ser um outro método de classificação de solos. Schnaid e Odebrecht (2012) relatam

que métodos baseados em valores  $I_c$  podem ser usados também como um guia para determinar as condições de drenagem no projeto, fator importante principalmente em obras de geotécnica de barragens. Portanto, acredita-se que solos com  $I_c < 1,8$  apresentam comportamento de drenagem sendo um tipo de solo mais granulométrico e  $I_c > 2,76$ , comportamento não drenado sendo solos mais coesivos. A equação do índice de classificação do material é dada pela equação (8):

$$I_c = \sqrt{\{3 - \log(Q_t) \cdot [1 - B_q]\}^2 + \{1.5 + 1.3 \cdot \log(F_r)\}^2} \quad (8)$$

Segundo Mellia (2017), Robertson & Wride (1998), modificaram a formula de  $I_c$ , modificando o valor da resistência normalizada da ponta do cone conforme a equação (9):

$$I_{cRW} = \sqrt{\{3.47 \cdot \log(Q_{tn})\}^2 + \{1.22 + \log(F_r)\}^2} \quad (9)$$

Onde  $Q_{tn}$  conforme a equação (10) é igual:

$$Q_{tn} = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma_{atm}} \cdot \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{vo}}\right)^n \quad (10)$$

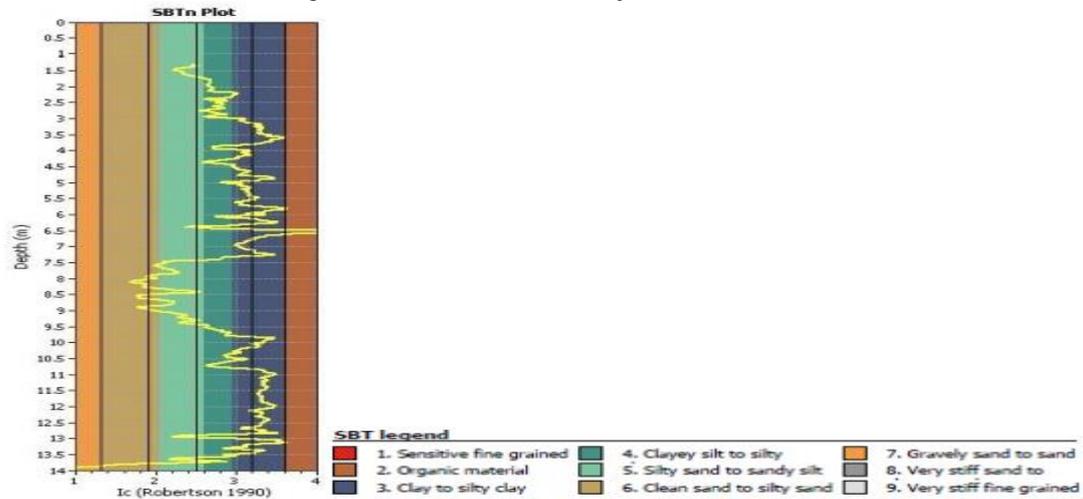
É a nova resistência normalizada de ponta, o  $\sigma_{atm} = 1$  atmosfera ( $\approx 1$  bar 100 kPa) e o expoente  $n = 1$  para argilas ( $I_{cRW} > 2,95$ );  $n = 0,75$  para solos siltosos; e  $n = 0,5$  para areias ( $I_{cRW} < 2,05$ ) ainda segundo Mellia (2017) e Schnaid, Odebrecht (2012) afirmaram que pode utilizar procedimento iterativo para a determinação de  $n$  para solos intermediários, definido pelo próprio valor de  $I_{cRW}$  e para o nível de tensão efetiva normalizada de acordo com a equação (11):

$$n = 0.381 \cdot I_{cRW} + 0.05 \left(\frac{\sigma'_{vo}}{\sigma_{atm}}\right) - 0.15 \leq 1.0 \quad (11)$$

Na figura 14 é possível ver um ensaio usando o  $I_c$ , no início do furo até a profundidade 7.5 metros, pode deduzir que seja um material coesivo, demonstrando um comportamento não drenado, entre 7,5 até 9,5 apresenta um comportamento mais silte arenoso, sendo um material que apresenta um  $I_c$  menor que 2,76 caracterizando um solo mais granular e drenado. Entre 9,5 e 13,5 metros, volta a apresentar como um material não drenado (argila)  $I_c > 2,75$ . Por fim na

profundidade abaixo de 13,5 metros até o final do furo (14 metros) o material apresenta comportamento drenado caracterizado por areias e por um  $I_c < 1,8$ .

Figura 14 –Índice de classificação do material.



Fonte: Veen (2015).

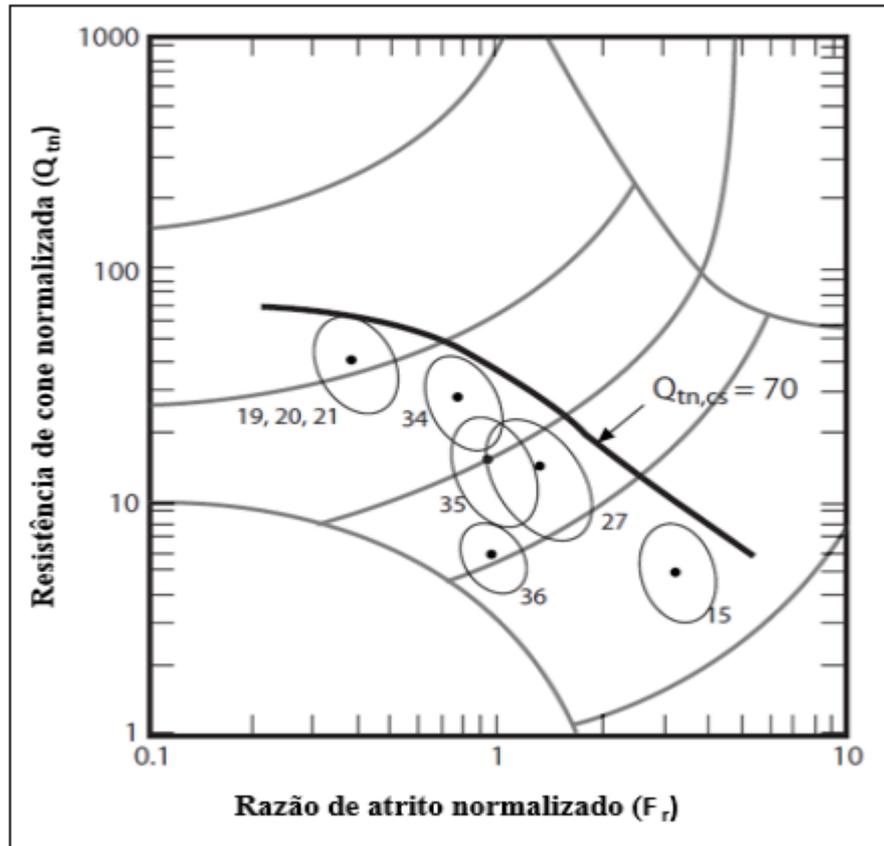
### Potencial de liquefação de solos

Segundo Robertson (2010), o comportamento do solo depende do parâmetro de estado do solo, que é a diferença entre o índice de vazios in-situ e o índice de vazios crítico. A determinação deste parâmetro é muito importante para a avaliação da engenharia geotécnica, em projetos de alto risco como no caso de barragens deve ser definido com o auxílio de testes de laboratório e modelagem numérica. Para projetos de baixo risco, pode ser estimado por meio de testes de campo como CPTu.

Robertson (2010) desenvolveu um gráfico para identificação de solos dilatantes e de solos contrativos durante o cisalhamento, levando em consideração o atrito lateral e resistência de ponta bem como algumas outras normalizações e correções, para definir o potencial de liquefação dos solos. Para isso Robertson avaliou alguns casos de rompimento de barragens por liquefação. (MIRANDA, 2018) destaca que com base em ensaios de CPT (Ensaio de Penetração de Cone), Robertson apresentou uma metodologia de avaliação de susceptibilidade à liquefação por meio de um gráfico onde correlaciona de resistência à penetração corrigido e normalizados com a razão de atrito também normalizada.

Com base na avaliação dos casos de rompimentos de barragem por liquefação Robertson (2010), destacou 6 casos históricos definidos como classe A, definindo um limite  $Q_{tn,cs} \leq 70$  como pode ser visto na figura 15.

Figura 15 - Identificação de solos dilatantes de solos contrativos durante o cisalhamento

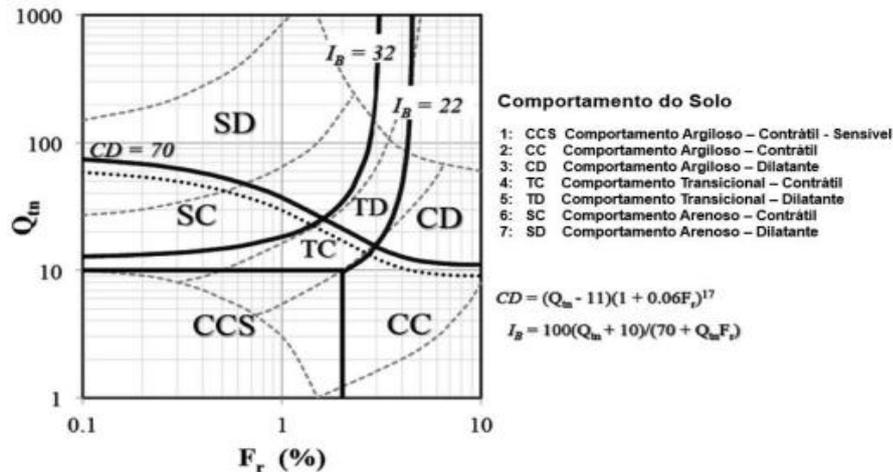


Fonte: Robertson (2010 apud MIRANDA, 2018)

Robertson (2010), dividiu entre a linha de referência ( $Q_{tn,cs} \leq 70$ ) dois grandes grupos, sendo os valores acima da linha de referência não susceptíveis à liquefação, e os abaixo da curva de referência sujeitos a liquefação.

De acordo com Robertson (2016), solos com granulometria fina com OCR maior que 4 apresentam  $Q_t$  maior que 12 e sendo classificados predominantemente como dilatantes quando submetidos a altas tensões de cisalhamento. Na proposta de Robertson (2016) combina-se dois critérios para obter-se o gráfico  $Q_t \times F_r$  (%), neste gráfico é feito a separação de solos com comportamento dilatantes de solos contrativos quando submetidos ao cisalhamento pela linha  $CD=70$  como pode ser visto na figura 16.

Figura 16 - Proposta de atualização do diagrama SBTn baseado em  $Q_{tn}$ - $F_r$



Fonte: Robertson (2016 apud SANTOS JUNIOR *et al.*, 2019)

Os índices  $IB=22$  e  $IB=32$ , foram introduzidos ao gráfico para melhor definição dos solos. O  $IB=22$  foi introduzido para separar solos argilosos correspondentes aos limites 3 e 4 da legenda da figura 16. O  $IB=32$  separa os solos classificados como arenosos, correspondentes aos limites 4 e 5. Entre as duas regiões ficou estabelecido uma zona de transição entre os dois tipos de material.

Segundo Robertson (2016), para uma melhor classificação do tipo de comportamento do solo, usa-se os gráficos SBTn baseado em  $Q_t$ - $F_r$  para promover uma classificação confiável do solo.

### Coeficiente de Permeabilidade – k

A condutividade hidráulica é uma característica do solo e se refere ao comportamento do fluxo de água no meio, sendo representado pelo parâmetro de permeabilidade  $k$  (m/s). Existem vários fatores que afetam a permeabilidade do solo, portanto, afetam a permeabilidade do solo, o comportamento em certas taxas de carregamento, como tamanho de partícula, índice de porosidade, estrutura e grau de saturação do solo.

Solos com permeabilidade na faixa de  $10^{-5}$  a  $10^{-8}$  m/s há uma grande probabilidade de apresentar um comportamento parcialmente drenado quando carregados por ensaios de CPTu em uma velocidade padrão (LUNNE *et al.*, 1997 apud MELLIA, 2017)

De acordo com Robertson (2004 apud MELLIA, 2017), o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) pode ser feita a partir de uma estimativa do comportamento do solo usando gráficos SBT, de acordo com a figura 17.

Figura 17 - Parâmetros para o coeficiente de permeabilidade.  
(SBT)

Zona SBT	Tipos de solos	Intervalo de $k$ (m/s)	Índice $I_{cRW}$
1	Solo fino sensível	$3 \times 10^{-10}$ a $3 \times 10^{-8}$	NA
2	Argilas orgânicas	$1 \times 10^{-10}$ a $1 \times 10^{-8}$	$I_{cRW} > 3,60$
3	Argilas	$1 \times 10^{-10}$ a $1 \times 10^{-9}$	$2,95 < I_{cRW} < 3,60$
4	Misturas de siltes	$3 \times 10^{-9}$ a $3 \times 10^{-7}$	$2,60 < I_{cRW} < 2,95$
5	Misturas de areias	$1 \times 10^{-7}$ a $1 \times 10^{-5}$	$2,05 < I_{cRW} < 2,60$
6	Areias	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-3}$	$1,31 < I_{cRW} < 2,05$
7	Areias com pedregulho	$1 \times 10^{-3}$ a 1	$I_{cRW} < 1,31$
8	Areias – areias limpas*	$1 \times 10^{-8}$ a $1 \times 10^{-3}$	NA
9	Areias finas rígidas*	$1 \times 10^{-9}$ a $1 \times 10^{-7}$	NA

\*Solos pré-adensados e/ou cimentados

Fonte: Robertson (2014 apud MELLIA, 2017)

### Modulo de Deformabilidade ou Young - E

No caso de solos granulares, o módulo de deformabilidade ou de Young (E) pode ser definido como a relação entre a tensão atuante em uma seção transversal do material ( $\sigma_1$ ) e deformação axial ( $\epsilon_1$ ), em uma condição de liberdade das deformações laterais ( $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ ) provocadas pelo carregamento (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). Sendo dada pela equação (12):

$$E = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \quad (12)$$

Onde:

$$\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\nu \epsilon_1$$

Onde,  $\nu$  representa o coeficiente de Poisson.

Segundo Robertson (2014 apud MELLIA, 2017), é impossível que o cone forneça resultados de medição precisa para ensaios de deformabilidade por se tratar de um parâmetro inerente ao material e pelo fato do ensaio de CPTu ter natureza destrutiva. Apesar disso, com o ensaio de SCPTu (ensaio realizado com sísmico) fez com que o modulo de Young tivesse uma melhoria na precisão, tornando possível estimar com uma certa precisão o módulo de Young a pequenas deformações ( $E_0$ ) e o módulo cisalhante também a pequenas deformações ( $G_0$ ) por meio da medida adicional da velocidade da onda de cisalhamento ( $V_s$ ), obtida de forma não

destrutiva durante as pausas de cravação do ensaio. Sendo o módulo expresso pela equação (13):

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (13)$$

Onde,  $\rho$  é a densidade de massa do solo representada por ( $\rho = \gamma/g$ ).

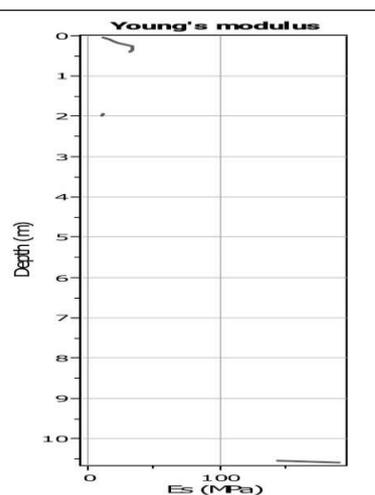
Através da teoria da elasticidade, o módulo de cisalhamento, a rigidez do solo pode ser expressa em termos do módulo de Young (MAYNE, 2007 apud MELLIA, 2007). Expressa pela equação (14):

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu) \quad (14)$$

Onde,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, sendo igual a 0,2 para solos na condição drenada e 0,5 para solos na condição não drenada.

Por se tratar de um método para análise de solos granulares, quando o litotipo não possui solos granulares, o resultado gera apenas resultados onde há possíveis solos granulares como pode ser visto na figura 18.

Figura 18 - Análise do módulo de Young em um ensaio de CPTu.



Fonte: elaboração do autor (2021).

De acordo com a figura 18, pode estimar que possui solos granulares (areias) nas profundidades de 0 a 0,5 metros e no final do furo depois da profundidade de 10,5 metros. Sendo caracterizado por solos coesivos, o solo nas profundidades de 0,5 a 10,5 metros.

### Densidade Relativa e ângulo de atrito de areias - $D_r$ , $\phi'$

Em relação aos rejeitos granulares de minério de ferro, falta correlação de medidas específicas para avaliar a densidade relativa desses materiais, os usos de diferentes métodos são recomendados para solos granulares. Portanto, a análise realizada tenta adaptar essas fórmulas ao encontrados em depósitos de rejeitos, pela necessidade de avaliar a compactação de barragens construídas usando a técnica de aterro hidráulico e justificado principalmente por parâmetros insuficientes em desenvolvimento desses projetos. Assim, representa a variação da densidade relativa uma ferramenta importante no controle construtivo e posterior da análise de estabilidade de estruturas de contenção de rejeito (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Portanto, o objetivo é avaliar a eficácia compactação de superfície de elevações (alteamentos) realizadas com equipamentos de mineração e a densidade relativa das regiões de deposição das praias que servirão de base para elevações subsequentes das barragens de rejeitos.

Em solos granulares, as medidas de resistência à penetração do cone podem ser utilizadas para estimativa do ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) ou da densidade relativa ( $D_r$ ),

Segundo Jamiolkowski *et al.* (1985 apud MELLIA, 2017) a determinação de  $D_r$  pode ser obtida pela equação (15):

$$D_r = -98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{(\sigma'_{vo})^{0,5}} \quad (15)$$

Onde,  $q_c$  e  $\sigma'_{vo}$  são expressos em  $t/m^2$ .

De acordo com Mayne (2007 apud MELLIA, 2017), uma expressão alternativa para obter  $\phi'$  foi proposta por Kulhawa e Mayne (1990 apud MELLIA, 2017), partir de experiências de câmaras de calibração no qual as tensões da ponta do cone foram ajustadas em conformidade com o tamanho relativo da câmara e o diâmetro do cone, sendo expresso pela equação (16):

$$\phi' = 17,6^\circ + 11,0^\circ \cdot \log(Q_{tn}) \quad (16)$$

### Módulo de cisalhamento máximo – $G_o$

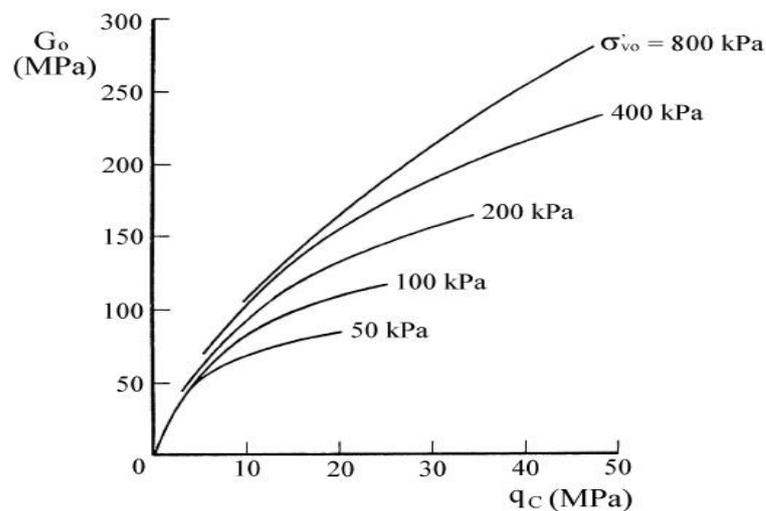
Segundo Albuquerque Filho (2004), módulo de cisalhamento ( $G$ ) de um material pode ser definido como a relação entre a tensão cisalhante aplicada ( $\tau$ ) e a consequente distorção por

ela provocada ( $\gamma$ ). A avaliação da magnitude deste módulo de deformação pode ser realizada por meio de ensaios de laboratório ou de campo como o ensaio de piezocone (CPTu).

Segundo Seed & Idriss (1970, apud ISSMGE, 1999, apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004), o módulo de cisalhamento máximo ( $G_o$ ) está diretamente relacionado a algumas propriedades de índice de solos granulares (índice de vazios, tensão efetiva vertical e porcentagem de finos) permitindo que algumas correlações sejam propostas com base em apenas em estudos de laboratório.

Albuquerque Filho (2004), afirma que Robertson & Campanella (1983), propuseram um ábaco para avaliação do módulo de cisalhamento máximo relacionando a resistência de ponta do cone e a tensão efetiva vertical dos solos conforme a figura 19.

Figura 19 - Ábaco para a avaliação do módulo de cisalhamento máximo



Fonte: Robertson & Campanella (1983 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

### Resistência ao cisalhamento não drenada - $S_u$

Em solos coesivos como o caso de solos argilosos, o ensaio de CPTu mede a resistência à penetração do terreno, esses resultados podem ser usados na estimativa da resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ), de acordo com a equação (17):

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \quad (17)$$

Onde:

$q_t$  = Resistência de ponta do cone corrigida;

$\sigma_{vo}$  = Tensão vertical total:

$N_{kt}$  = Fator de capacidade de carga.

A resistência ao cisalhamento não drenada da argila, depende da execução do teste, em relação à velocidade de carregamento e adensamento e variabilidade do solo correspondente à anisotropia, índice de rigidez e plasticidade. Portanto, o método empírico deve ser usado com cuidado (SCHNAID, 2009 apud MELLIA, 20017).

Segundo Mellia (2017), Robertson (2010) apresentou a equação (18) para determinar a variável  $N_{kt}$ , utilizando ensaios de CPTu, levando em conta a razão de atrito normalizada.

$$N_{kt} = 10,5 + 7 \log(F_r) \quad (18)$$

De acordo Robertson (2014 apud MELLIA, 2017), é importante notar que o valor de  $N_{kt}$  tende a aumentar com o aumento da plasticidade e diminuir com o aumento da sensibilidade do solo.

Os valores de OCR costumam estar relacionados à resistência não drenada. Solos normalmente adensados ( $OCR \approx 1$ ) apresentam a razão  $S_u/\sigma'_{vo}$  na faixa de 0,5, já valores menores correspondem a solos em adensamento e valores maiores que 0,5 são considerados solos pré-adensados (SCHNAID, ODEBRECHT, 2012 apud MELLIA, 2017).

A partir relação a resistência não drenada ( $S_u$ ), é possível determinar a tensão de pré-adensamento e o OCR, de acordo com as equações (19) e (20)

$$S_u = 0,22 \cdot \sigma'_{vm} \quad (19)$$

$$\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = 0,23 \cdot OCR^{0,8} \quad (20)$$

### Tensão de Pré-adensamento – OCR

A história de tensões refletida no perfil de pressão de pré-adensamento e da razão de sobre-adensamento, influenciam significativamente a deformabilidade dos solos. Características essas que se desenvolvem dependendo da história de deposição, processos diagenéticos e pedogênicos que são completamente diferentes dos solos sedimentares de clima frio e outros solos tropicais (ROBERTSON *et al.*, 1986, LUNE *et al.*, 1997 apud MIO, 2005).

De acordo com Schmertmann (1985 apud MIO, 2005) para diversos problemas geotécnicos, a principal variável de controle é a tensão horizontal inicial ( $k_0$ ), incluindo a capacidade de suporte da fundação, estabilidade do talude. A determinação de  $k_0$  é difícil de

obtenção devido estado natural ser perturbado pela inserção de qualquer instrumento, e o valor de  $k_0$  torna-se dependente do método usado.

Compreender a tensão pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) do solo é a base para a análise de solos argilosos, porque em materiais com uma tensão inferior a  $\sigma'_{vm}$ , a deformação será pequena e reversível, e o aumento da tensão maior que  $\sigma'_{vm}$ , a deformação será plástica, grande e irreversível. A tensão de pré-adensamento pode ser feita diretamente pelo ensaio de CPTu, correlacionando a resistência de ponta ou o excesso de poro-pressão gerado durante a cravação (MELLIA, 2017). A tensão de pré-adensamento pode ser expressa pelas seguintes equações (21) e (22):

$$\sigma'_{vm} = k_1(q_t - \sigma_{vo}) \quad (21)$$

$$\sigma'_{vm} = k_2(q_t - u_2) \quad (22)$$

Segundo Chen, Mayne (1996 apud MELLIA, 2017), os valores dos fatores de pré-consolidação  $k_1$  apontam um valor médio de 0.30, enquanto os valores de  $k_2$  um valor entre 0.5 e 0.6.

Atualmente o ensaio de CPTu permite calcular o valor de OCR, relacionado a resistência real mobilizada ( $q_t$ ), a tensão vertical total ( $\sigma_{vo}$ ) e atenção vertical efetiva ( $\sigma'_{vo}$ ) de acordo com a equação (23):

$$OCR = k \left( \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (23)$$

De acordo com Robertson (2014 apud MELLIA, 2017), o valor médio de  $K$  é 0,33, sendo valores de  $k$  mais elevados são utilizados em argilas pré-adensadas ou envelhecidas

### Coeficientes de Adensamento

Avaliar as condições de drenagem do solo é extremamente importante em termos de materiais, visto que as presentes condições parcialmente drenadas causam incerteza na interpretação Ensaio (MELLIA, 2017).

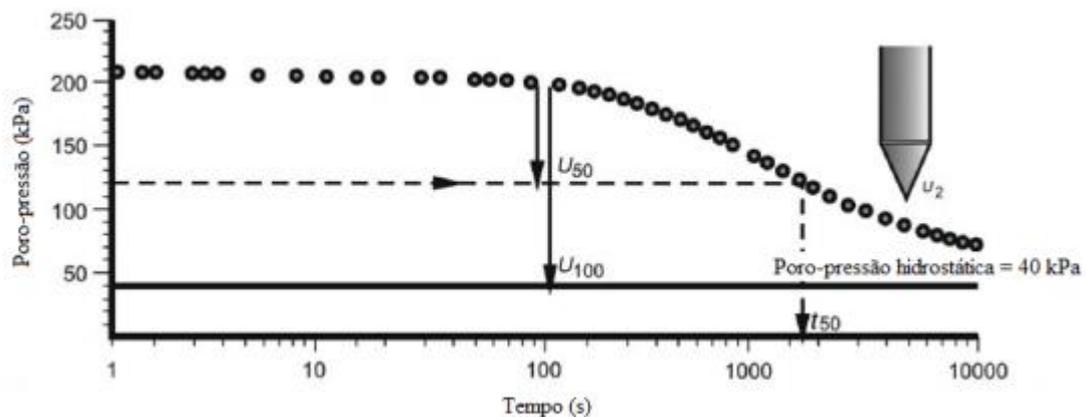
Segundo Albuquerque Filho (2004), a avaliação inicial das condições de fluxo de massa do solo feitas por ensaio de CPTu são basicamente relacionados à determinação do fator de adensamento horizontal ( $C_h$ ) do depósito e a ligação resultante com coeficientes de permeabilidade.

O registro da poropressão dinâmica que surge durante a cravação do cone e seu correspondente a dispersão do tempo em uma profundidade específica permite identificar a densidade e compressibilidade do material (ROBERTSON, CAMPANELLA, 1983b apud ALBUQUERQUE FILHO, 2014).

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012 apud MILLIA, 2017), o teste de dissipação consiste em abortar a condução da sonda piezométrica em profundidades predeterminadas por algum tempo (cerca de uma hora) até que 50% de dissipação do excesso de poropressão tenha sido dissipada, e monitorar a dissipação de pressões neutras durante o mesmo período.

O ensaio de dissipação permite determinar os parâmetros do solo, como os fatores de compactação e permeabilidade dos solos argilosos, além do nível d'água, e indicar a direção do fluxo do lençol freático na maioria dos solos arenosos. Segundo Mio (2005) o perfil de pressão dos poros desenvolvido durante a condução do CPTu é baseado no conceito de que a poropressão gerada durante a condução do CPTu em solos com grãos finos saturados é geralmente alta e se dissipa lentamente, em solos granulares densamente saturados é baixa chegando a valores negativos, refletindo a alta permeabilidade. O sensor de poro-pressão tem alta sensibilidade para detectar camadas drenadas (areias) muito finas e muito permeáveis no centro de solos pouco permeáveis com comportamento não drenado, bem como camadas finas de argila no meio das areias.

Figura 20 - Gráfico de um ensaio de dissipação.



Fonte: Schnaid (2009 apud MELLIA, 2017).

Segundo Houlsby & Teh (1988 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2004) propuseram a determinação do coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ) através da equação (24):

$$c_h = \frac{T^* R^2 \sqrt{I_R}}{t} \quad (24)$$

Onde,  $T^*$  representa o fator tempo,  $R$  o raio do piezocone,  $I_R$  o índice de rigidez do material e  $t$  o tempo de dissipação.

De acordo com Millia (2017),  $T^*$  é o fator de tempo adimensional proposto por Houlsby e Teh (1988 apud MILLIA, 2017), seu valor é uma função a posição do elemento poroso na haste do chanfro, base ou cone. Por exemplo, mostra um valor de 0,245 quando o corpo poroso está na base do cone (posição  $u_2$ ) e existe 50% de dispersão.

Ainda segundo Millia (2017), é possível estimar o coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) no estado normalmente adensado obter graças à proposta de Jamiołkowski *et al.* (1985 apud MILLIA, 2017) pela equação (25):

$$c_v = \frac{RR}{CR} \cdot \frac{k_v}{k_h} \cdot c_h \quad (25)$$

Onde,  $RR/CR$  é a correção dos efeitos de pré-adensamento causados pela cravação da sonda piezométrica, em que valores experimentais medidos variam entre 0,13 e 0,15 (JAMIOLKOWSKI *et al.*, 1985 apud MELLIA, 2017);  $k_h$  e  $k_v$ , são os coeficientes de permeabilidade dos materiais na direção horizontal e vertical.

De acordo com Albuquerque Filho (2004), o coeficiente de permeabilidade dos materiais ( $k_h$  e  $k_v$ ) pode ser obtida através das características de adensamento e compressibilidade dos depósitos por meio das equações (26) e (27):

$$k_v = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (26)$$

$$k_h = c_h \cdot m_h \cdot \gamma_w \quad (27)$$

Onde,  $m_v$  e  $m_h$  representam os coeficientes de variação volumétrica nas direções vertical e horizontal e  $\gamma_w$  o peso específico da água.

### 3.5.2 Caracterização e parâmetros geotécnicos de laboratório.

#### Análise granulométrica

O ensaio é normatizado pela NBR 7181:2016 - Análise Granulométrica por Peneiramento e Sedimentação. O teste é realizado peneirando e sedimentando a amostra, a fim

de obter a faixa de tamanho de partícula presente no material, expressa como uma porcentagem do peso total seco.

### Limites de Atterberg

Os ensaios são normalizados pelas NBR 6459:2016 - Solo - Determinação do limite de liquidez e a NBR 7180:2016 - Solo - Determinação do limite de plasticidade. Para determinar os limites de consistência do material, o dispositivo utilizado é o aparelho de Casagrande no qual se determina o limite de liquidez, isto é, o teor de umidade para qual o sulco formado na massa de material se fecha com 25 golpes. Esse teor de umidade representa o valor de umidade no qual o solo muda do estado líquido para o plástico. O limite de plasticidade é determinado através do procedimento de moldagem, é feito rolando-se a massa de solo em uma placa de vidro fosco até o surgimento de fissuras. O limite de plasticidade é indicado quando o teor de umidade no solo começa a se fraturar, isto é, o ponto no qual o solo passa do estado plástico para o semi-sólido.

### Ensaio Triaxial CIU

Para o ensaio Triaxial CIU, os corpos de prova podem ser moldados por meio da compactação de amostras deformadas ou talhados a partir de amostras indeformadas, logo após, devem ser isoladas por papel filtro e posteriormente por uma membrana de látex. Seguidamente são inseridas em células de confinamento e submetidas a saturação por percolação e por contrapressão, realizadas comumente por prensas controladas.

A norma técnica usada para este ensaio é a estabelecida pela ASTM D4767:20. Para saturação dos corpos por saturação por contrapressão o volume de água deve ser controlado até atingir um parâmetro B maior ou igual a 0.95. Já a saturação por percolação é monitorada o volume de água absorvido pela amostra.

Na etapa de adensamento, com a ajuda de um sensor de pressão conectando à válvula ao topo do corpo de prova é obtido a leitura da resposta aplicada a poropressão à aplicação de uma tensão resultante dos acréscimos das pressões totais de adensamento da amostra. Com as válvulas de drenagem vedadas para constatar o parâmetro B de saturação, e assim, adquirir uma referência de leitura para o acompanhamento desta fase e posteriormente um segundo estágio de adensamento com a aplicação da tensão confinante obtida.

Com os valores de adensamento obtidos, são calculados os tempos  $t_{50}$  e  $t_{100}$ . Para obter a velocidade do carregamento na fase cisalhante a válvula de drenagem deve ser mantida fechada para gerar poropressões. A partir dos dados obtidos é realizado o círculo de Mohr

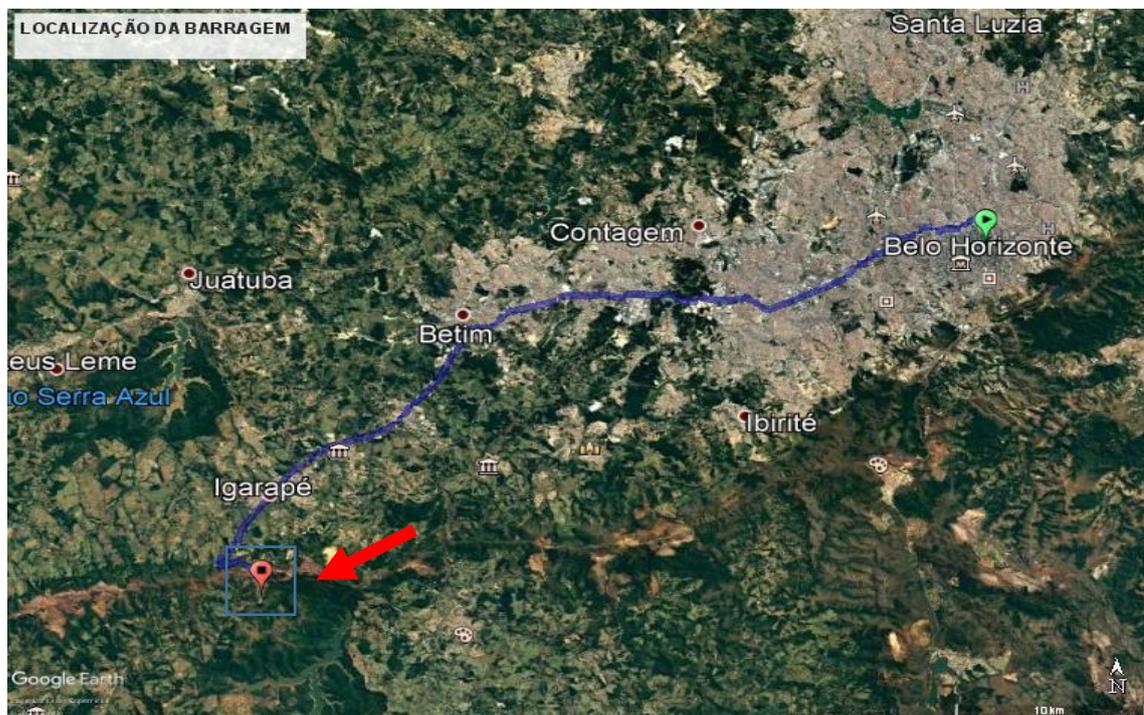
equivalente ao estado de ruptura e posteriormente a envoltória de resistência. Obtendo parâmetros de resistência de solos como tensão-deformação.

## 4 LOCAL DE ESTUDO

### 4.1 Local de estudo

A barragem está inserida no Quadrilátero Ferrífero, na Serra Azul, importante região produtora de minério de ferro, onde os ensaios foram realizados, situa-se, aproximadamente 60 Km de Belo Horizonte, como pode ser vista na figura 21. A empresa iniciou suas atividades em 2007 progressivamente até 2012, quando começou a crise econômica mundial e consequentemente ocorreu a queda no valor do minério de ferro, tendo uma produção de 6,0 milhões de toneladas em 2013 (MELO, 2013).

Figura 21 – Localização da área de estudo



Fonte: Google Earth (2021).

A produção de minério de ferro foi paralisada em 2014, mantendo apenas pessoas para segurança e qualidade ambiental, manutenção geral das instalações operacionais e da propriedade. A produção foi retomada em 2017, promovendo uma readequação ambiental e estrutural melhorando o processo operacional de produção quando outra empresa do ramo assumiu os ativos da mineradora.

A barragem em questão possui uma altura atual de 68,00 metros, com um volume aproximado de 657.575,00 m<sup>3</sup>, sendo construída a partir o método construtivo a montante, na

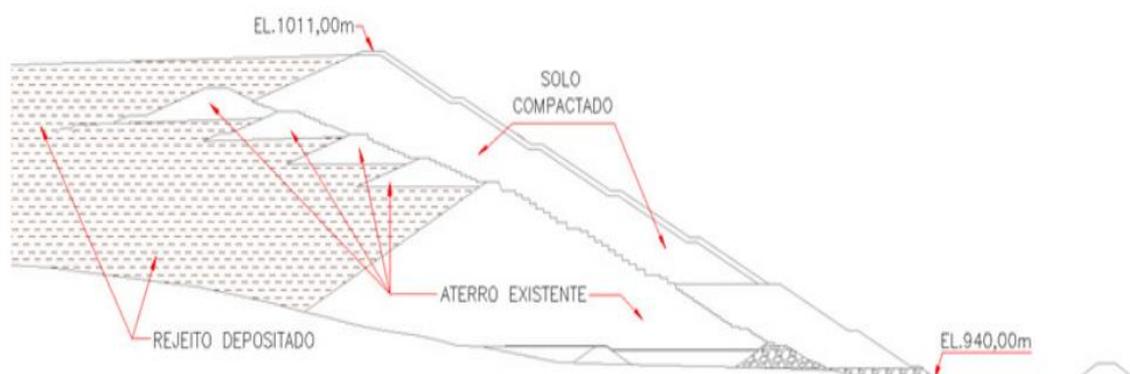
categoria de risco baixo e dano potencial associado alto, de acordo com a ANM (Agência Nacional de Mineração, 2019).

Hoje a mineradora investe em alternativas tecnológicas para lidar com a disposição de rejeitos através da técnica de filtragem de rejeitos e sua disposição em pilhas de estéril, fazendo a descaracterização e descomissionamento da barragem. Consequentemente estão sendo desenvolvidos estudos para facilitar o desaguamento de rejeitos e permitir a disposição conjunta de estéril e rejeitos em pilhas, eliminando o uso de barragens a montante.

A barragem em questão teve seu primeiro dique de partida construído em 2007, sendo construída com aterro compactado com material argiloso com crista na elevação 963,0 m. O primeiro alteamento a jusante no aterro compactado foi realizado no final de 2008, utilizou solo residual de filito no corpo e material argiloso na face de montante, chegando à elevação de 983,00m. Ao final do ano de 2010 foi executado um alteamento à montante em aterro compactado também com solo residual de filito reaproveitado das escavações realizadas para a implantação do vertedouro de emergência.

Posteriormente, foram realizados outros quatro alteamentos à montante da barragem antes de ser desativada, nas seguintes elevações: 988,00 m, 993,00 m, 998,00 m, e 1003,00 m e um alteamento à jusante a elevação de 1011,00m (MELO, 2013). Os alteamentos e perfil da barragem pode ser visto na figura 22.

Figura 22 - Seção típica do projeto de alteamento da barragem



Fonte: Melo (2013).

Atualmente a barragem encontra-se desativada, a mineradora interrompeu a disposição de rejeitos na barragem adotando o método de sistema de filtragem de rejeitos para a disposição de rejeitos secos em pilhas. Como a barragem não está mais em operação, apenas são realizadas auditorias e monitoramento periódico da estabilidade para inicialização da descaracterização.

## 4.2 Geologia Regional

Segundo Borinski *et al.*, (2008), O Grupo Caraça é representado por rochas filíticas marrons da Formação Batatal. A Formação Batatal está recoberta pela Formação Cauê do Grupo Itabira. O contato entre a Formação Cauê e a Formação Batatal, mergulha cerca de 40°S. A Formação Cauê é composta por itabiritos friáveis, semi-compactos e compactos. Os itabiritos friáveis têm um alto teor de Fe enquanto os itabiritos semi-compactos têm um teor de Fe inferior a 40%. Nos itabiritos silicificados, o bandamento, quando presente, está completamente obliterado e a rocha é muito dura. Geralmente os itabiritos silicificados têm uma ocorrência limitada associada com zonas de fratura e tem contatos claros com o itabirito friável. Dentro dos itabiritos, existem lentes de hematita cinza compacta com intercalações friáveis. Uma Parte das Formações Ferríferas Cauê é recoberta por cangas lateríticas. Devido à resistência da canga, o grupo Cauê formou cristas localmente. A Formação Gandarela aparece diretamente acima da Formação Cauê e é composta de dolomitos friáveis, altamente alterados e finamente bandados.

### 4.2.1 Características Mineralógicas dos Rejeitos Ferruginosos

As propriedades ópticas das fases minerais, como cor, reflexão, isotropia, anisotropia e birrefringência, bem como estruturas especiais (lamelas e maclas), são identificadas por meio de um microscópio. O peneiramento a seco, a pesagem e a análise química de diferentes frações granulométricas complementam a pesquisa. O maior componente mineral é a hematita granular, que aparece principalmente na forma de cristais mistos, exceto para partes com uma granulometria inferior a 325 mesh (0,045 mm), nas quais os cristais livres dominam. A hematita especular ocorre em todas as frações de tamanho de partícula, principalmente em cristais livres. Cristais de martita e magnetita existem apenas na forma de partículas misturadas. O quartzo aparece principalmente na forma de cristais livres, principalmente em partes mais finas do que 325 mesh (-0,045 mm). Outros minerais incluem rutilo, pirita e óxido de manganês. As frações do tamanho das partículas interferem na presença e a porcentagem desses minerais (BORINSKI *et al.*, 2008).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Caracterização geotécnica

Os ensaios de CPTu realizados no depósito de rejeitos de minério de ferro correspondem à campanha de ensaios realizada pela empresa Pattrol Investigações Geotécnicas Ltda, e os ensaios cedidos para auxiliar o desenvolvimento desse trabalho.

O presente capítulo apresenta os procedimentos utilizados nas amostragens dos solos, as técnicas experimentais de execução dos ensaios de campo e os equipamentos utilizados para a realização dos mesmos. O programa experimental do presente trabalho compreende: (a) os ensaios de CPTu *in situ* e caracterização estratigráfica e geotécnica. (b) potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos.

As normas utilizadas para os ensaios de CPTU foram:

- ASTM D5778 - Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone testing of soils;
- ASTM D3441 - Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil; Penetration Testing of Soils.

Os Ensaios CPTu, ensaios de cone com medida de poropressão, foram utilizados para a determinação estratigráfica de perfis dos solos, avaliação de propriedades dos materiais investigados e previsão da capacidade de liquefação dos solos.

O ensaio consiste na cravação do solo com uma ponteira cônica ( $60^\circ$  de ápice) a uma velocidade constante de 2,0 cm/s. A seção transversal do cone é de  $10 \text{ cm}^2$  e a área da luva de atrito lateral é de  $150 \text{ cm}^2$ . O equipamento de cravação possui uma estrutura de reação e um sistema de aplicação de carga. A penetração é obtida através do acionamento contínuo de hastes com comprimento de 1,00 m, mediante a operação de um pistão hidráulico.

À medida que é inserida as hastes no solo, efetua-se a cada 2,0cm de profundidade a aquisição automática das seguintes informações:

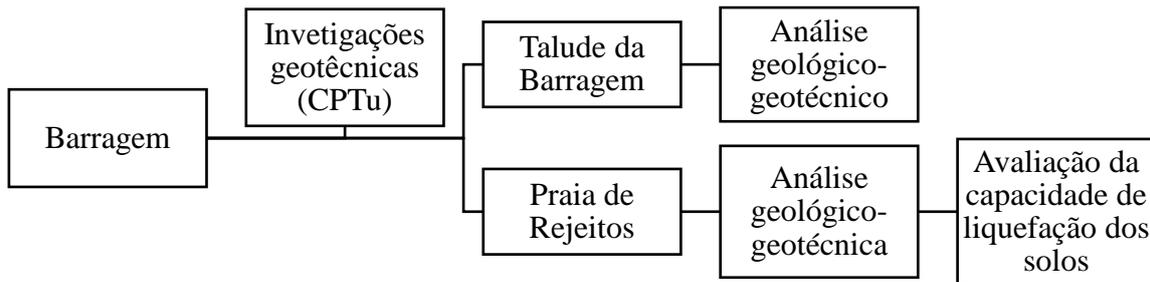
- Resistência à penetração da ponta ( $q_c$ );
- Resistência por atrito lateral ( $f_s$ );
- Poro-pressão ( $u_2$ ).

Essas informações são medidas por instrumentos de precisão (calibrados corretamente) instalados na parte inferior do equipamento. Os dados são transmitidos para a superfície por meio de um sistema de ondas acústicas ou cabo, eliminando assim qualquer influência do

operador no teste. O computador coleta, transmite e armazena as informações, e os resultados podem ser visualizados em tempo real.

As etapas e processo da caracterização da barragem estão descritas no fluxograma apresentado na figura 23:

Figura 23 - Fluxograma do processo das etapas da caracterização da barragem.



Fonte: elaboração do autor (2021).

A partir dos arquivos originais armazenados nos ensaios de CPTu no campo, foram feitos os tratamentos dos dados e utilizou-se o software CPeT-IT v.3.0 da GeoLogismiki®. Com base nos bancos de dados gerados e do relatório do CPeT-IT foram analisados os parâmetros geotécnicos e estratigráficos da barragem. Os parâmetros geotécnicos foram estabelecidos de acordo com as formulas utilizadas no CPeT-IT e podem ser encontradas no manual do software e na revisão bibliográfica deste trabalho.

## 5.2 Apresentação dos ensaios realizados

Na presente pesquisa foram avaliados 11 ensaios de CPTu realizados num depósito de rejeitos de mineração de ferro, cuja planta de locação dos pontos será apresentada através da figura 24 onde os furos foram realizados.

Figura 24 - Imagens de satélite com a localização dos furos



Fonte: Google Earth (2021).

A Tabela 3 apresenta a profundidade, cota e período em que os ensaios foram realizados.

Tabela 3 - Quadro de resumos da realização dos furos

<b>QUADRO DE RESUMO - ENSAIOS DE CPTU</b>				
<b>N° Furo</b>	<b>Data</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Localização do furo</b>
CPTU-01	16/04/2019	31,65	1007,70	Praia
CPTU-02	08/04/2019	44,55	1007,82	Praia
CPTU-03	09/04/2019	45,35	1008,26	Praia
CPTU-04	22/04/2019	56,00	1008,48	Praia
CPTU-05	11/04/2019	53,35	1008,47	Praia
CPTU-06	12/04/2019	44,25	1008,20	Praia
CPTU-07	17/04/2019	37,00	1000,10	Talude
CPTU-08	18/01/2021	54,00	1011,23	Talude
CPTU-09	15/01/2021	59,35	1011,24	Talude
CPTU-10	02/12/2020	36,75	1000,13	Talude
CPTU-11	09/02/2021	7,45	961,27	Talude

Fonte: elaboração do autor (2021).

Foram realizados 6 furos na campanha de 2019 ao longo da praia de rejeitos, tendo um distanciamento médio de 50 metros entre os furos CPTU-01, CPTU-2, CPTU-3 e CPTU-04.

Ao longo do talude da barragem foram realizados outros 5 furos sendo o CPTU-07 realizado em 2019 e os outros furos realizados entre o final de 2020 e início de 2021. A partir dos dados gerados pelos ensaios de CPTu foram estimados parâmetros geotécnicos tanto para praia de rejeitos quanto para o talude além da determinação da estratigrafia e classificação dos solos.

### **5.3 Potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos**

Foram utilizados os resultados de 4 ensaios da praia de rejeito para a análise de potencial de liquefação, e uma análise de onde possui os maiores riscos de liquefação em relação ao distanciamento da crista da barragem para o interior da praia, também foi usado o gráfico SBTn para análise de cimentação e uma relação do nível d'água da barragem com os pontos onde possuem uma maior chance de liquefação.

Além disso, para a análise do potencial de susceptibilidade à liquefação, será levado em consideração alguns parâmetros observados no Relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem BI do Córrego do Feijão (2019).

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Análise dos resultados de CPTu na praia de rejeitos

Os ensaios de CPTu foram divididos em duas partes, sendo eles os ensaios realizados na praia de rejeitos e os ensaios realizados no corpo da barragem (talude).

#### 6.1.2 Análise dos parâmetros geotécnicos na praia de rejeitos

Neste item será analisado o tipo de comportamento do solo através proposta de Robertson *et al.* (1986) e modificada por ele em 2010. Descritos ao longo do capítulo 3. A princípio será analisado os valores corrigidos da resistência de ponta, relação de atrito lateral e poro pressão. Além da estratigrafia normalizada (SBT) de acordo com os últimos parâmetros citados. Os ensaios de CPTu utilizados para essa análise foram os ensaios CPTU-01, CPTU-02, CPTU-03, CPTU-4, CPTU-05 e CPTU-06. A figura 25 mostra a localização dos furos.

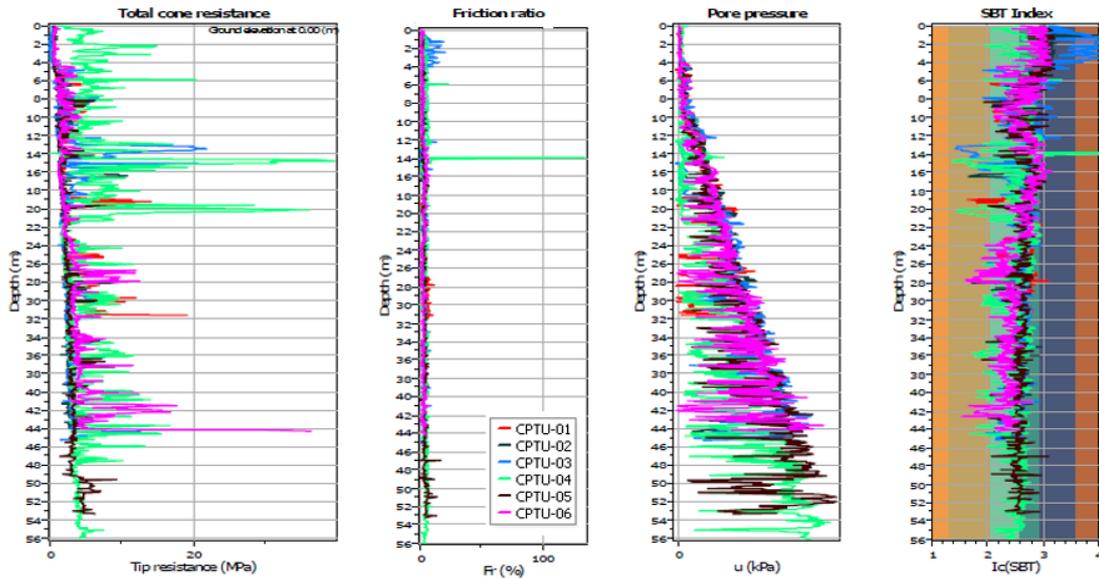
Figura 25 - Localização dos furos realizados na praia de rejeitos



Fonte: Google Earth® (2021).

Os resultados dos valores corrigidos da resistência de ponta, relação de atrito lateral e poropressão foram e podem ser vistos na figura 26.

Figura 26 - Resultados dos furos realizados na barragem de rejeitos



Fonte: elaboração do autor (2021).

Por meio do parâmetro de SBT index pode-se perceber que o solo tem um comportamento mais siltoso, tendo o índice de classificação do material ( $I_c$ ) entre 1,8 e 2,76.

Através dos valores obtidos na figura 26 foi feita uma tabela com as principais características relacionadas aos resultados do CPTu, para um melhor entendimento será dividido cada furo em 3 três profundidades para melhor caracterização dos furos conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu na praia de rejeitos

Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu na praia de rejeitos									
Identificação do ensaios		Resistência de Ponta			Razão de Atrito (%)		Poro- Pressão		Característica Granulométrica
Nº do furo	Camada	Profundidade (m)	Tendência	Valor Representativo (Mpa)	Tendência	Valor Representativo	Tendência	Valor Representativo (kPa)	
CPTU-01	1	0,00 a 10,00	crescente	0,6 a 1,35	constante	1,90	constante	0,8	argiloso
	2	10,00 a 20,00	constante	2,41	constante	2,09	crescente	35,00 a 650,00	silte-arenoso
	3	20,00 a 31,65	crescente	2,00 a 3,37	crescente	1,5 a 4,5	decréscante	650,00 a 419,7	silte-argiloso
CPTU-2	1	0,00 a 15,00	crescente	0,4 a 1,38	constante	1,68	crescente	0,23 a 120	argiloso
	2	15,00 a 30,00	constante	2,41	constante	2,00	crescente	130 a 620,30	silte-argiloso
	3	30,00 a 44,55	constante	2,9	constante	2,0 a 2,17	crescente	635 a 1022,50	silte-argiloso
CPTU-3	1	0,00 a 12,00	crescente	0,2 a 1,27	decréscante	8,0 a 3,5	crescente	70 a 210,00	argiloso
	2	12,00 a 18,00	decréscante	6,35 a 2,85	crescente	0,6 a 2,72	decréscante	260 a 66,2	silte-arenoso
	3	18,00 a 45,35	constante	2,9	constante	2,57	crescente	70,5 a 1450	silte-argiloso
CPTU-04	1	00,00 a 14,00	constante	5,39	constante	4,92	constante	28	silte-argiloso
	2	14,00 a 20,00	constante	9,73	constante	4,26	crescente	30 a 520	silte-arenoso
	3	20,00 a 56,00	constante	4,8	constante	3,04	crescente	60 a 1700	silte-argiloso
CPTU-05	1	0,00 a 10,00	crescente	0,62 a 1,37	constante	1,90	crescente	0,9 a 31,7	argiloso
	2	10,00 a 48,00	crescente	2,81 a 3,65	constante	2,61	crescente	82 a 1500	silte-argiloso
	3	48 a 53,35	constante	1,79 a 4,60	crescente	2,00 a 3,90	decréscante	1473 a 90 / 1700 a 450	silte-argiloso/silte-argiloso
CPTU-06	1	0,00 a 10,00	constante	0,6 a 1,49	constante	1,36	crescente	0,56 a 30,00	silte-arenoso
	2	10,00 a 26,00	constante	1,36 a 2,2	decréscante	6,00 a 1,00	crescente	51 a 606	silte-argiloso/argiloso
	3	26,00 a 44,25	crescente	5,26 a 11,5	constante	1,92	variando	21 a 1600	silte-arenoso/silte-argiloso

Fonte: elaboração do autor (2021).

Através da tabela 4 pode-se observar melhor os resultados da cravação do ensaio de CPTu, em relação a poropressão, quanto mais profundo o furo, maiores são os valores

representativos, os valores altos gerados nas profundidades superiores a 40 metros podem indicar que o cone chegou no fundo da barragem e entrou em contato com o solo de origem. Outra observação é que quando a resistência de ponta está crescente, a razão de atrito tende a estar constante, isto se deve ao fato de quando a resistência de atrito esta alta tende a ser um material menos coesivos (silte, areia) então logo a razão de atrito terá um valor menor e constante.

Através dos valores de  $I_c$  da figura 26, observou-se que os solos se comportam como siltes argiloso/arenosos, por isso optou-se em analisar os parâmetros geotécnicos para solos coesivos. Foram feitos uma média através dos valores gerados para os parâmetros geotécnicos ao longo do furo, essa média foi plotada em relação aos principais parâmetros geotécnicos estabelecidos para a análise geotécnica na praia para solos coesivos (argila) são eles coeficiente de permeabilidade (K), resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ), tensão de pré-adensamento (OCR), módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) e sensibilidade ( $S_t$ ). A tabela 5 apresenta os dados obtidos pela média ao longo do ensaio de CPTu para cada furo.

Tabela 5 – Parâmetros estimados para solos coesivos (argilosos)

Parâmetros Estimados Para Solos Coesivos (argilosos)					
Nº do furo	K (m/s)	$S_u$ (kPa)	OCR	$G_0$ (MPa)	$S_t$
CPTU-01	1,93E-07	123,48	3,59	79,75	2,31
CPTU-02	1,34E-07	124,85	2,89	76,44	3,02
CPTU-03	1,67E-06	136,83	2,72	92,4	2,23
CPTU-04	1,20E-06	254,6	6,51	172,85	1,72
CPTU-05	7,14E-08	151,83	2,95	102,84	2,46
CPTU-06	3,82E-07	171,77	3,43	94,94	2,87

Fonte: elaboração do autor (2021).

Com os valores obtidos na tabela 5, pode-se analisar alguns parâmetros:

Os valores obtidos nas medias dos furos foram relativamente próximos para todos os ensaios de CPTu, exceto para o CPTU-04 onde teve uma tensão de cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) superior a 250 KPa, modulo cisalhante médio ( $G_0$ ) maior que 150 kPa e obtendo um OCR superior a 4. Segundo Robertson (2012) argilas com alto OCR ( $OCR > 4$ ) irão geralmente dilatar em grandes deformações em cisalhamento e argilas com ( $OCR < 2$ ) geralmente se contraem em cisalhamento em grandes cepas.

Na figura 12, o ábaco  $Q_t$  versus  $F_r$  (%), estabelece que são mais sensíveis materiais próximos do  $S_t = 1$ , já o OCR superior a 6 pode indicar uma cimentação. Esta cimentação pode

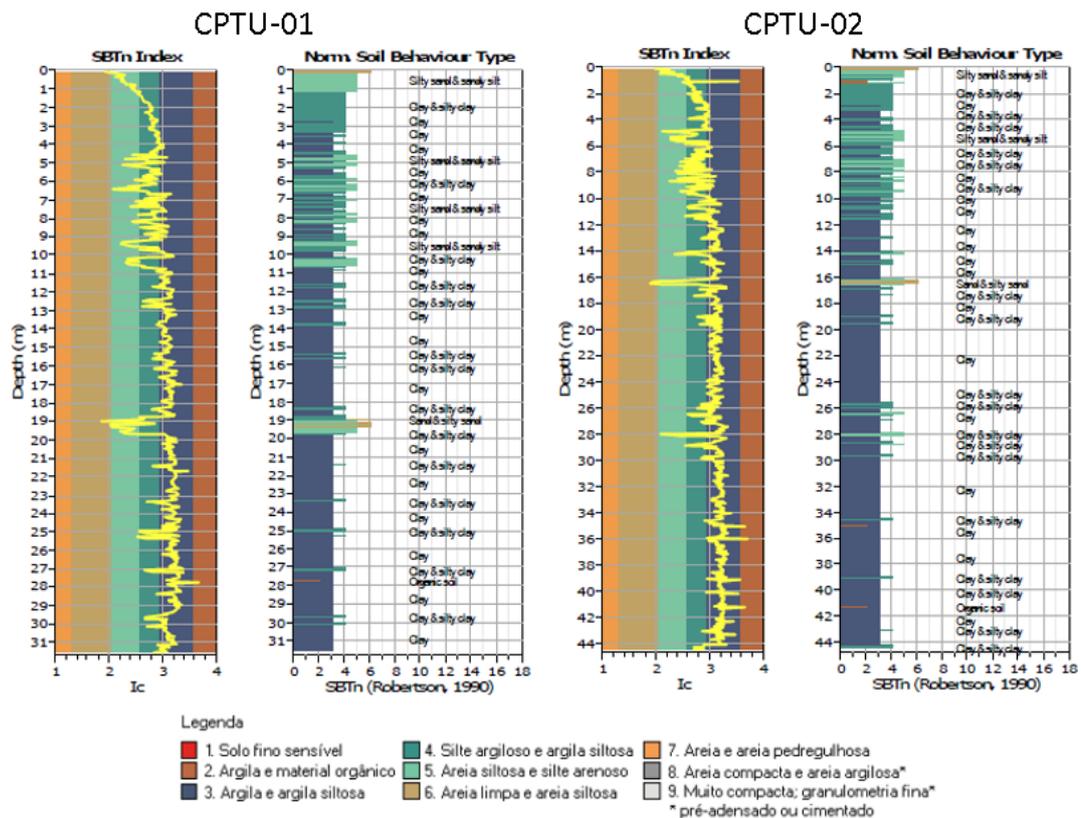
ocorrer principalmente por ter finos de magnetita no rejeito de minério de ferro, um dos efeitos que está diretamente ligado a sensibilidade do solo.

Agentes cimentantes como carbonatos, matéria orgânica e óxidos de ferro geram ligações entre partículas, que rompidas fazem com que o solo perca a resistência ao cisalhamento. A cimentação é associada a valores de resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) *in situ* muito elevadas (MITCHELL, 1976 apud BERTUOL, 2009).

### 6.1.3 Análise estratigráfica da praia de rejeitos

Para os parâmetros de estratigrafia dos solos foram utilizados os parâmetros SBT e Soil Behaviour Type. Como pode ser visto na figura 27, a esquerda estão os resultados para o furo CPTU-01 e a direita para o CPTU-02.

Figura 27 - Análise estratigráfica do CPTU-01 e CPTU-02



Fonte: elaboração do autor (2021).

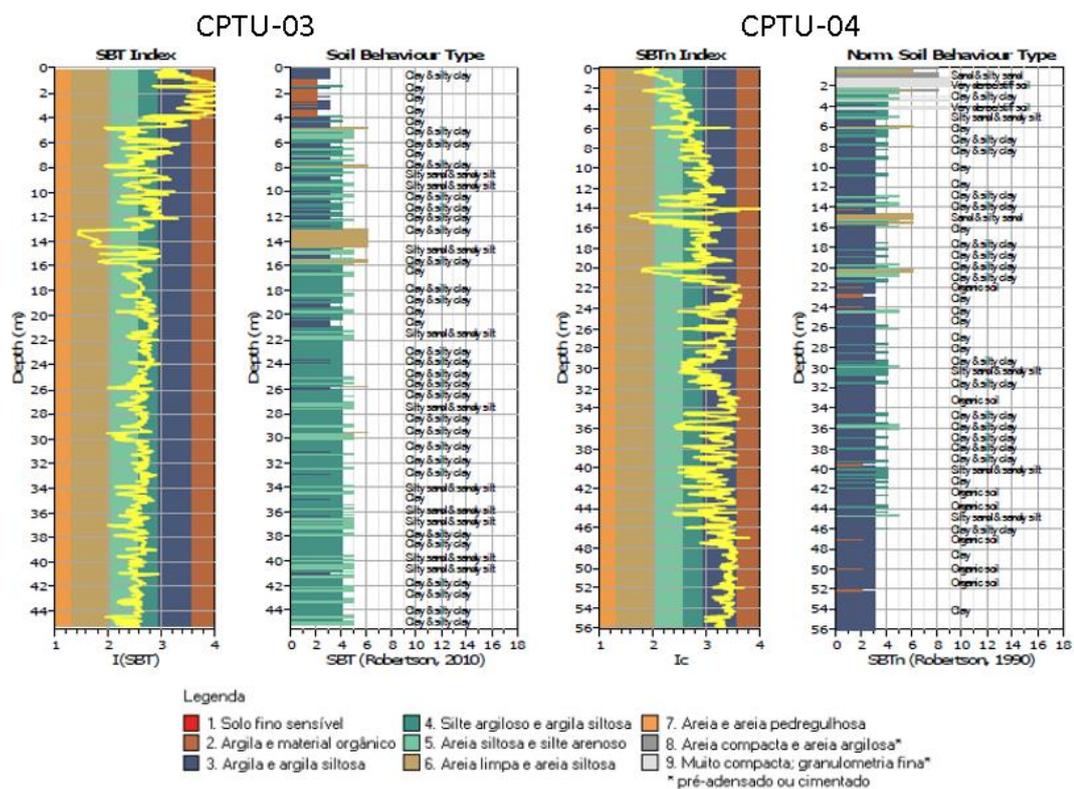
Conforme a figura 27, no CPTU-01, nota-se que no início do furo na profundidade 0 a 2 metros, o solo sai de uma areia siltosa, indo para um silte arenoso e posteriormente uma argila

siltosa, onde permanece em praticamente todo o furo. Podemos ressaltar também uma lente entre areia siltosa e silte arenoso na profundidade de 19 a 20 metros.

Ainda na figura 27, no CPTU-02, o início do furo tem-se um comportamento semelhante ao encontrado na estratigrafia do CPTU-01. Pode-se perceber uma pequena lente arenosa próximo à profundidade de 16 metros, e posteriormente mantendo-se como um solo argilo siltoso.

Na figura 28 estão os resultados obtidos para os furos CPTU-03 a esquerda e CPTU-04 a direita, como pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 28 - Análise estratigráfica do CPTU-03 e CPTU-04



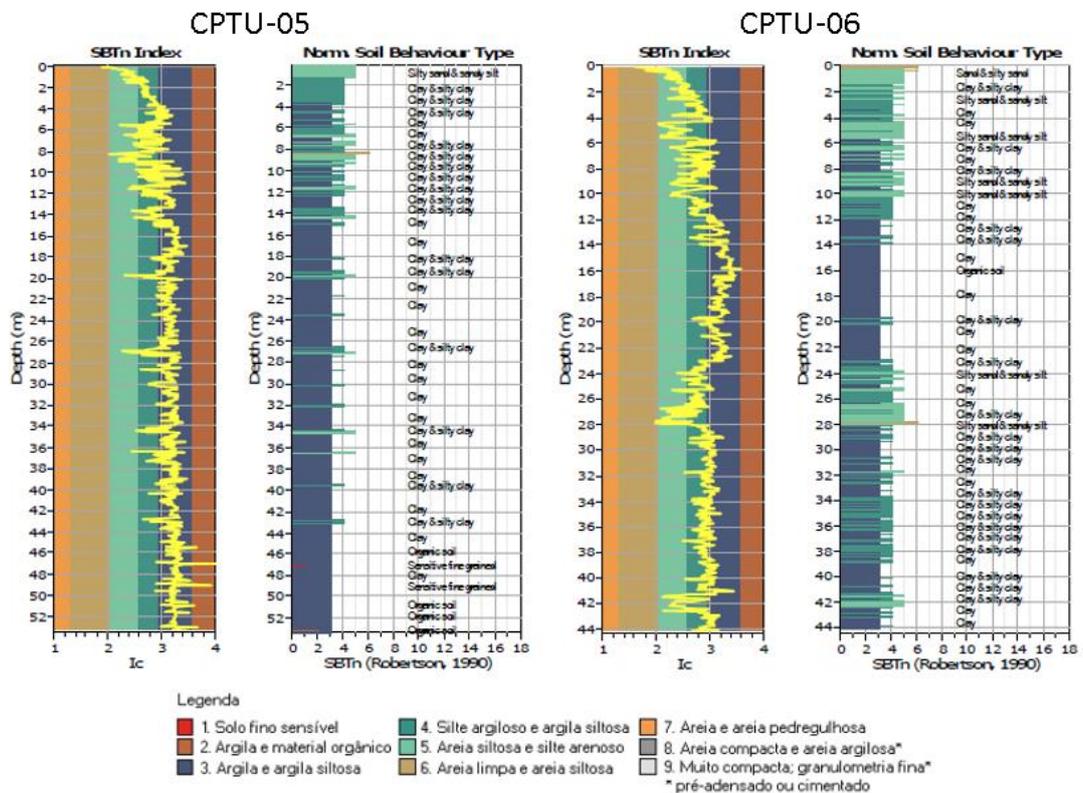
Fonte: elaboração do autor (2021).

Na figura 28 do lado esquerdo, o CPTU-03 começa a se comportando como um solo argiloso até aproximadamente 1 metro, de 2 a 4 metros ele tem um comportamento de um solo fino sensível, de 4 a 13,5 metros ele intercala entre argila siltosa e silte arenoso, na profundidade de 13,5 a 14,3 metros apresenta uma lente de areia siltosa e depois volta a intercalar entre argila siltosa e silte argiloso até o final do furo.

No CPTU-04, figura 28, lado direito, começa com uma fina camada de areia siltosa e posteriormente comporta como um solo muito compacto, de granulometria fina pré-adensado ou cimentado até a profundidade de 2,5 metros, posteriormente comporta como um solo argilo siltoso a argiloso tendo algumas lentes muito fina de silte argiloso e solo sensível, e uma pequena lente de areia entre as profundidades de 14 a 16 metros.

Na figura 29 estão os resultados obtidos para os furos CPTU-05 lado esquerdo e CPTU-06 lado direito, como pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 29 - Análise estratigráfica do CPTU-05 e CPTU-06



Fonte: elaboração do autor (2021).

Na figura 29, lado esquerdo, a estratigrafia do CPTU-05 começa entre silte arenoso até a profundidade de 1 metro, passando para uma argila siltosa até a profundidade de 4 metros. Posteriormente uma intercalação entre silte argiloso e areia siltosa até aproximadamente 14 metros onde passa a se comportar como um solo argiloso com pequenas lentes argilo siltosas no decorrer do furo.

No CPTU-06, figura 29, lado direito, nota-se uma pequena camada de areia siltosa no início do furo, passando de areia siltosa para silte arenoso até a profundidade de 2 metros. Da profundidade de 2 a 12 metros tem uma intercalação ente silte argiloso e argila siltosa. Na

profundidade de 14 a 24 metros comportasse como um solo argiloso e posteriormente volta a ter intercalações entre silte arenoso e argila siltosa.

## 6.2 Análise dos resultados de CPTu no talude da barragem

### 6.2.1 Análise dos parâmetros geotécnicos no talude da barragem

Neste item será analisado o tipo de comportamento do solo através proposta de Robertson *et al.* (1986) e modificada por ele em 2010. Descritos ao longo da revisão bibliográfica. A princípio será analisado os valores corrigidos da resistência de ponta, relação de atrito lateral e poro pressão. Além da estratigrafia normalizada (SBT) de acordo com os últimos parâmetros citados. Os ensaios de CPTu utilizados para essa análise foram os ensaios CPTU-07, CPTU-08, CPTU-09, CPTU-10, CPTU-11. A figura 30 mostra a localização dos furos.

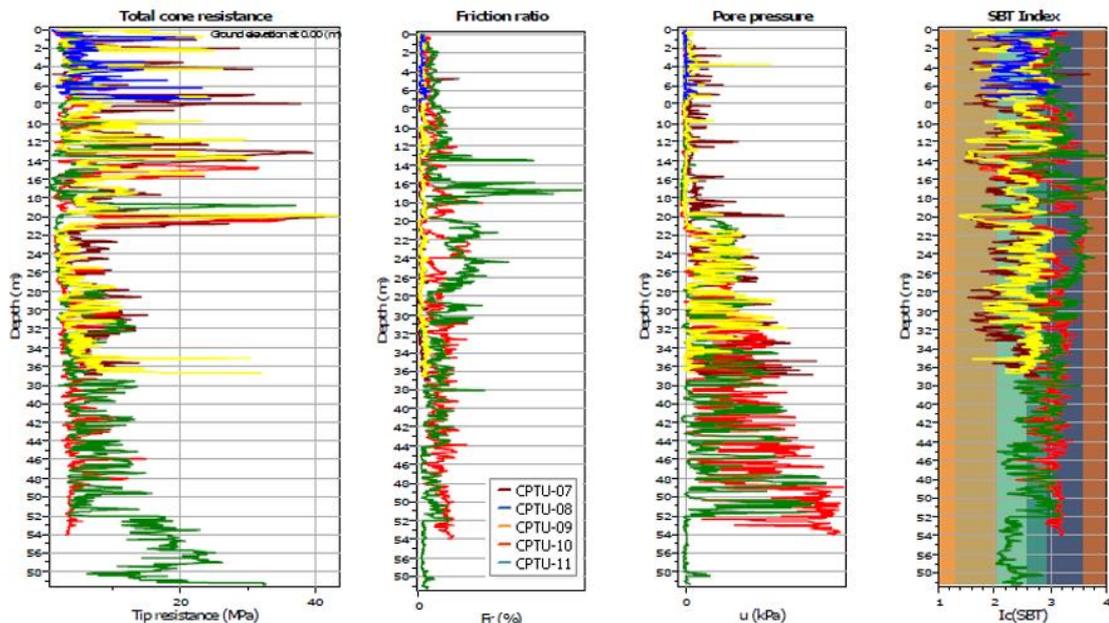
Figura 30 - Localização dos furos realizados no talude da barragem



Fonte: Google Earth® (2021).

Os resultados dos valores corrigidos da resistência de ponta, relação de atrito lateral e poropressão podem ser vistos na figura 31.

Figura 31 - Resultados dos furos realizados no talude da barragem.



Fonte: elaboração do autor (2021).

Por meio do parâmetro de SBT index da figura 31, pode-se perceber que o solo tem um comportamento bem variado, tendendo para um comportamento silto-arenoso.

Através dos valores obtidos na figura 31 foi feito uma tabela com as principais características relacionadas aos resultados do CPTu assim, como foi feito para a praia, para um melhor entendimento será dividido cada furo em 3 três profundidades para melhor caracterização dos furos conforme a tabela 6.

Tabela 6 - Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu no talude da barragem

Análise do comportamento geotécnico dos ensaios de CPTu no talude da barragem									
Identificação do ensaios			Resistência de Ponta		Razão de Atrito (%)		Poro- Pressão		Característica Granulométrica
Nº do furo	Camada	Profundidade (m)	Tendência	Valor Representativo (Mpa)	Tendência	Valor Representativo	Tendência	Valor Representativo (kPa)	
CPTU-07	1	0,00 a 10,00	variação alta	3,0 a 28,0	variação alta	2,0 a 8,0	constante	62,4	areno-siltoso
	2	10,00 a 20,00	variação alta	4,0 a 30,0	variação alta	1,0 a 7,5	constante	97	siltos-arenoso
	3	20,00 a 37,00	constante	4,00 a 15,00	crescente	2,0 a 8,0	crescente	100 a 1300	siltos-argiloso
CPTU-8	1	0,00 a 14,00	constante	4,24	crescente	4,34 a 18,5	constante	0,00 a 11,00	siltos-arenoso
	2	14,00 a 20,00	variando	2,5 a 6,48	variando	2,45 a 29,32	constante	465 a 620	siltos-arenoso/siltos-argiloso
	3	20,00 a 54,00	decréscante	19,4 a 4,37	constante	16,25	crescente	300 a 1553	argiloso
CPTU-9	1	0,00 a 19,00	constante	4,45	crescente	4 a 67,2	constante	0,00 a 44,00	siltos-argiloso
	2	19,00 a 52,00	decréscante	22,33 a 5,43	decréscante	40 a 16	variando	5 a 1000	argiloso
	3	52,00 a 59,35	crescente	9 a 17	constante	5,00	constante	0,00 a 14,00	siltos-arenoso
CPTU-10	1	0,00 a 22,00	variação alta	2,5 a 20	variação alta	1,5 a 6	constante	33	siltos-arenoso
	2	22,00 a 29,00	decréscante	6,5 a 1,5	decréscante	4,5 a 1,5	constante	316	siltos-argiloso
	3	29,00 a 36,75	constante	6,5	crescente	6,0 a 1,5	decréscante	600 a 75	siltos-arenoso
CPTU-11	1	0,00 a 2,00	variando	0,80 a 22,00	variando	1,1 a 7,00	variando	0,5 a 25	siltos-arenoso
	2	2,00 a 4,00	variando	2,5 a 14	variando	1,00 a 7,5	constante	0,00 a 87,00	siltos-argiloso
	3	4,00 a 7,45	variando	1,5 a 2,5	variando	0,95 a 10,00	variando	0,00 a 120	argilo-siltoso

Fonte: elaboração do autor (2021).

Através da tabela 6 podemos analisar algumas tendências, principalmente em relação a resistência de ponta onde teve grande variação indicando ser um material mais arenoso. Nota-se que a partir do CPTU-09 até o CPTU-11 os valores das poropressões nas camadas 3 tem um valor representativo baixo, indicando ter uma camada mais arenosa.

O aparecimento de areias compressíveis, pode ser identificada através do parâmetro razão de atrito ( $R_f$ ), em virtude que este parâmetro estende com o aumento da compressibilidade, ou seja quanto maior os valores da razão de atrito, maior a compressibilidade do solo. (ROBERTSON, CAMPELLA, 1983 apud KHAHOLD, 2013).

Pode ser determinada a compacidade de solos a partir da resistência de ponta, solos muito fofos variam de 0 a 2,5 MPa, fofos de 2,5 a 5,0 MPa, médio de 5,0 a 10,0MPa, compacto de 10 a 20,00 MPa e maiores de 20,00 MPa são considerados muito compactos (EUROCODE 7, 1997 apud SANTOS, 2017). Desta forma podemos caracterizar o talude da barragem de compacto a muito compacto.

Pelo fato do  $I_c$  na figura 31, apresentar um comportamento tendendo para um solo mais arenoso, foram realizados uma média através dos valores gerados para os parâmetros geotécnicos ao longo do furo, essa média foi plotada em relação aos principais parâmetros geotécnicos estabelecidos para a análise geotécnica no talude da barragem para solos não coesivos (silte, areia) são eles o coeficiente de permeabilidade ( $K$ ), módulo de deformabilidade ( $E$ ), densidade relativa ( $D_r$ ), parâmetro de estado ( $\Psi$ ), módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ). A tabela 7 ilustra a os dados obtidos pela média ao longo do ensaio de CPTu para cada furo.

Tabela 7 - Parâmetros estimados para solos não coesivos (areias e siltes)

Parâmetros Estimados Para Solos Não Coesivos (areias e siltes)						
Nº do furo	K (m/s)	E (Mpa)	$D_r$	$\Psi$	$G_0$	$\phi'$
CPTU-07	7,28E-06	158,72	48,68	-0,12	189,11	35,89
CPTU-08	1,03E-07	254,05	56,57	-0,75	256,7	40,41
CPTU-09	9,85E-08	169,36	70,66	-0,23	306,8	43,4
CPTU-10	1,26E-05	140,84	58,65	-0,16	176,1	39,44
CPTU-11	6,81E-06	83,74	60,11	-0,18	96,28	40,86

Fonte: elaboração do autor (2021).

Com os valores obtidos na tabela 7, pode-se analisar alguns parâmetros:

Como no talude possui grande variedade de solos, foram utilizados a média do dado apenas dos parâmetros geotécnicos nas profundidades onde possuíam solos não coesivos.

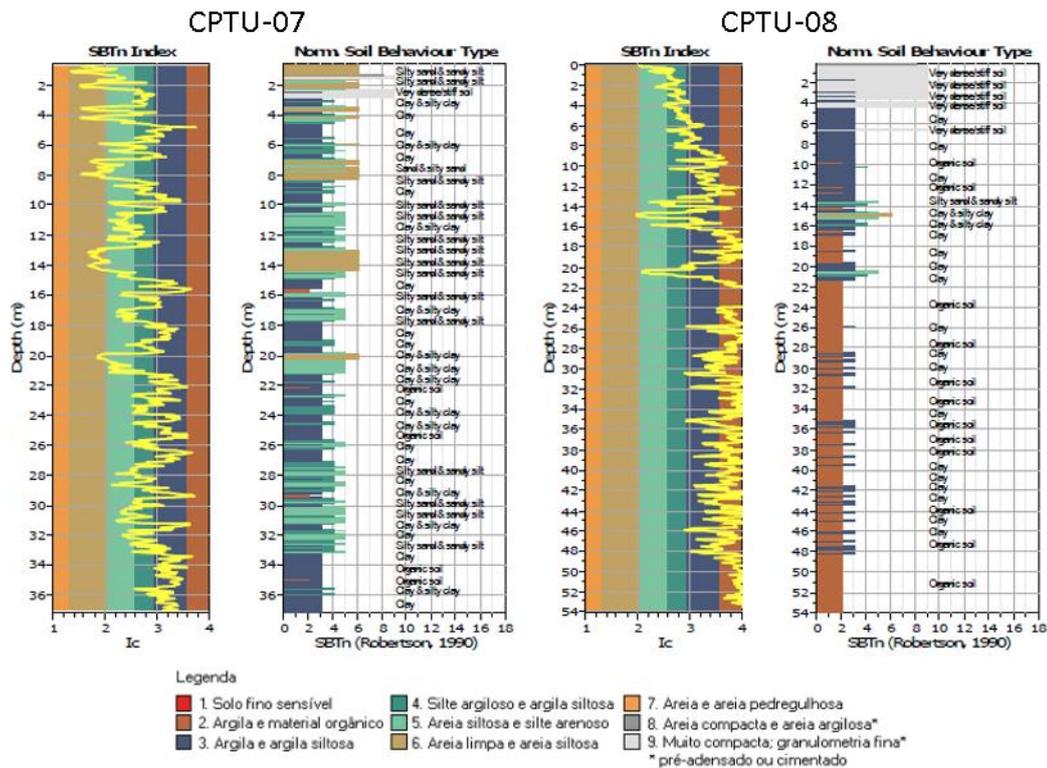
Os CPTU-08 possui o maior modulo de deformabilidade ( $E$ ), enquanto o CPTU-11 possui o menor valor para esse parâmetro. Pode-se analisar que em relação ao modulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ), que o CPTU-11 possui um menor valor em relação aos outros furos enquanto o CPTU-09 possui o maior valor de cisalhamento máximo.

De acordo com a pesquisa de Robertson (2010), o comportamento do solo depende do parâmetro de estado ( $\Psi$ ), sendo a diferença entre o índice de vazios *in situ* e o índice de vazios crítico. Sendo de grande importância para a avaliação geotécnica, principalmente em projetos de grande risco, que deve ser definido com a ajuda da modelagem numérica e de ensaios laboratoriais. Em ensaios de baixo risco podem até ser estimados com ensaios de campo.

### 6.2.2 Análise estratigráfica do talude da barragem

Os parâmetros para a estratigrafia do talude foram os mesmos utilizados na praia da barragem, foram utilizados os parâmetros SBT e Soil Behaviour Type. Como pode ser visto na figura 32, os resultados do CPTU-07 estão do lado esquerdo da imagem, e os resultados para o CPTU-8 do lado direito da imagem, como pode ser visto a seguir.

Figura 32 – Análise estratigráfica do CPTU-07 e CPTU-08 .



Fonte: elaboração do autor (2021).

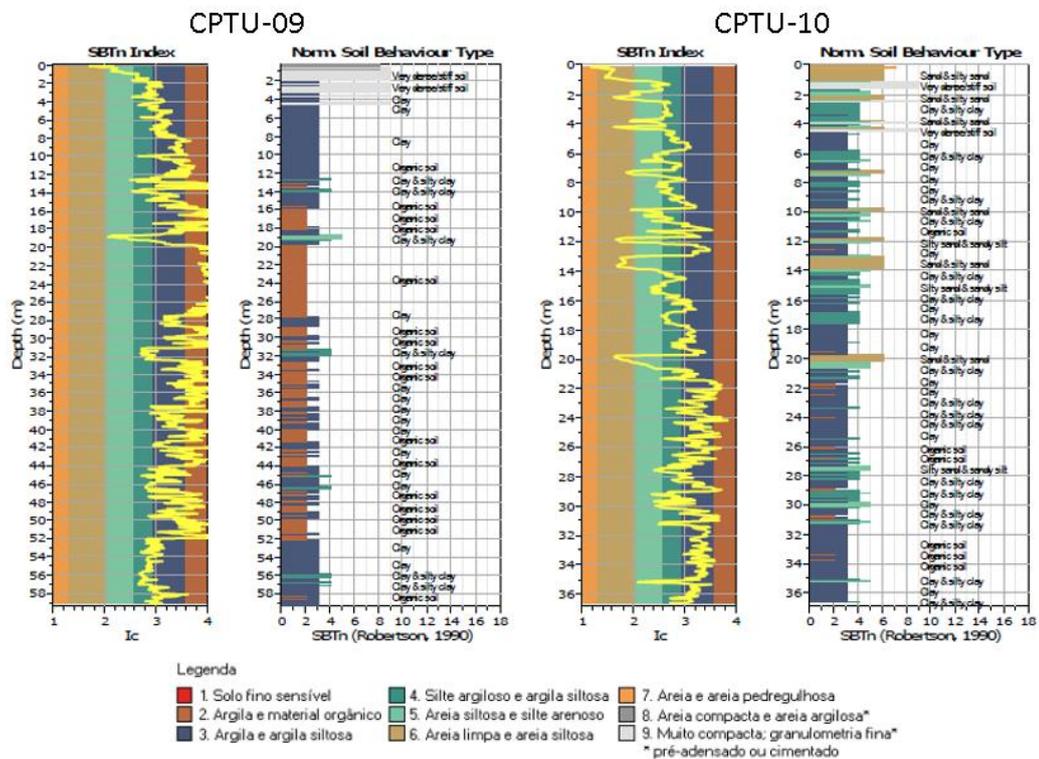
Conforme a figura 32, lado esquerdo da imagem, para o CPTU-07, nota-se areia, areia siltosa, com intercalações finas de compactação, granulometria fina e pré-adensada ou cimentado do início do furo até a profundidade de 3 metros, de 4 a 7 metros o solo é

caracterizado por uma fina lente de areia próximo a profundidade de 4 metros e logo depois uma intercalação fina de areia siltosa e silte arenoso e logo após, argila até os 7 metros. Entre 7 e 8,20 metros, a uma intercalação de areia siltosa e silte arenoso contendo mais areia siltosa. Dos 8 aos 12,5 metros intercalação entre silte arenoso, argila siltosa e argila. Dos 12,5 até 14,5 é composta por areia siltosa e dos 14,5 até os 33 metros são compostas por intercalação de silte arenoso, argila siltosa e argila e dos 33 até o final do furo é composta por argilas.

O CPTU-08, figura 32, lado direito, apresenta uma granulometria muito fina, muito compacta, pré-adensada ou cimentada do início do furo até a profundidade de 4,5 metros isso pode ser explicado devido a compactação do solo por pessoas e maquinários passando nesse trecho para possíveis análises de monitoramento da barragem. Da profundidade de 4,5 aos 14 metros é predominante por solos argilos. De 14 até 16 metros a uma intercalação entre argila, argila siltosa, silte arenoso e areia siltosa. Dos 16,5 até o final do furo é composta por um solo muito argiloso, com poucas intercalações de argila e argila siltosa.

A figura 33 mostra os resultados estratigráficos para os furos CPTU-09 lado esquerdo e CPTU-10, lado direito, como pode ser visto a seguir.

Figura 33 - Análise estratigráfica do CPTU-09 e CPTU-10



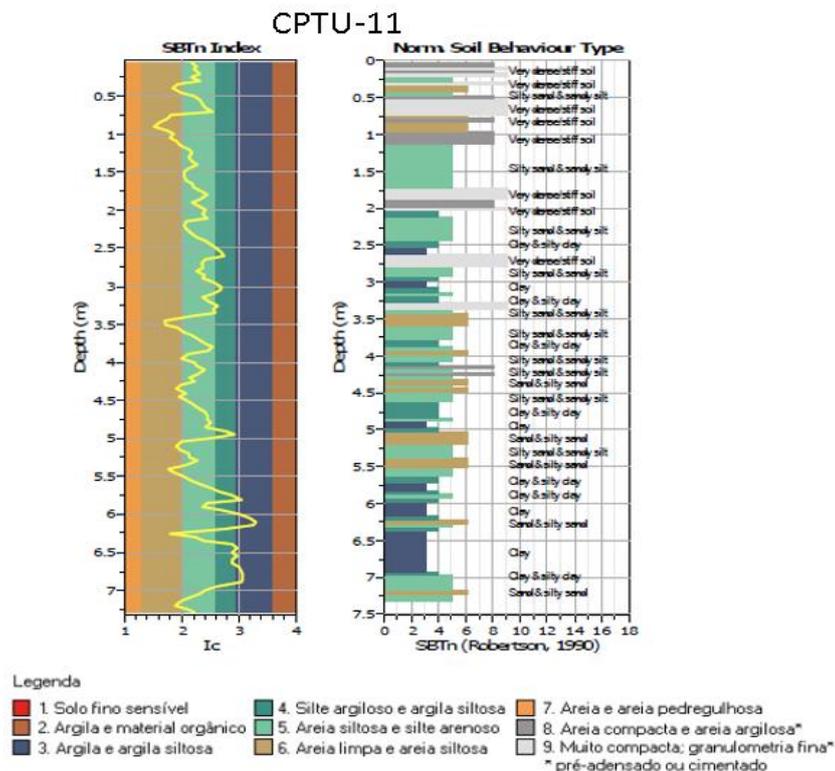
Fonte: elaboração do autor (2021).

Na figura 33, lado esquerdo da imagem, no CPTU-09, do início do furo até aproximadamente 4,5 metros a um solo muito compacto, com granulometria fina, pré-adensado ou cimentado, devido a movimentação de maquinários e pessoas. Dos 4,5 até 16 metros é composta por solos argilo-siltosos a argilos. Das profundidades de 16 a 52 metros o solo é composto por um solo muito argiloso, com intercalações de argila e finas lentes de argila siltosa ao longo da profundidade. Dos 52 metros até o final do furo é composto por um solo argiloso com finas lentes de argila siltosa.

A estratigrafia do CPTU-10, figura 33, lado direito, é composta por uma areia siltosa do início do furo até a profundidade de 1 metro, da profundidade de 1,5 a 4 metros é composta por um solo argilo-siltoso com uma fina camada de areia siltosa. A partir da profundidade de 4,5 metros até o final do furo é predominante por solos argiloso, com algumas camadas de argila siltosa, silte arenoso e finas camadas de solo fino sensível.

Os resultados para a estratigrafia do furo CPTU-11 podem ser analisados na figura 34.

Figura 34 - Análise estratigráfica do CPTU-11



Fonte: elaboração do autor (2021).

Na figura 34, do início do furo do CPTU-11, até 0,75 metros a uma intercalação entre areias compactas e areia argilosa, com muita compactação de granulometria fina, pré-adensadas

ou cimentadas com finas camadas de areias siltosas e silte argiloso. De 0,75 a 1,25 metros a uma intercalação de areia compactada e areia siltosa. De 1,25 até 1,75 metros é predominante por solo silte arenoso. De 1,75 a 2,0 metros é composta por uma areia muito compactada. Da profundidade 3,5 a 5.5 metros a uma intercalação entre solos areno-siltosos, silte-argilosos e argilo-siltosos. De 6,0 até o final do furo é predominante por argila siltosa com algumas lentes de areia siltosa e silte arenoso.

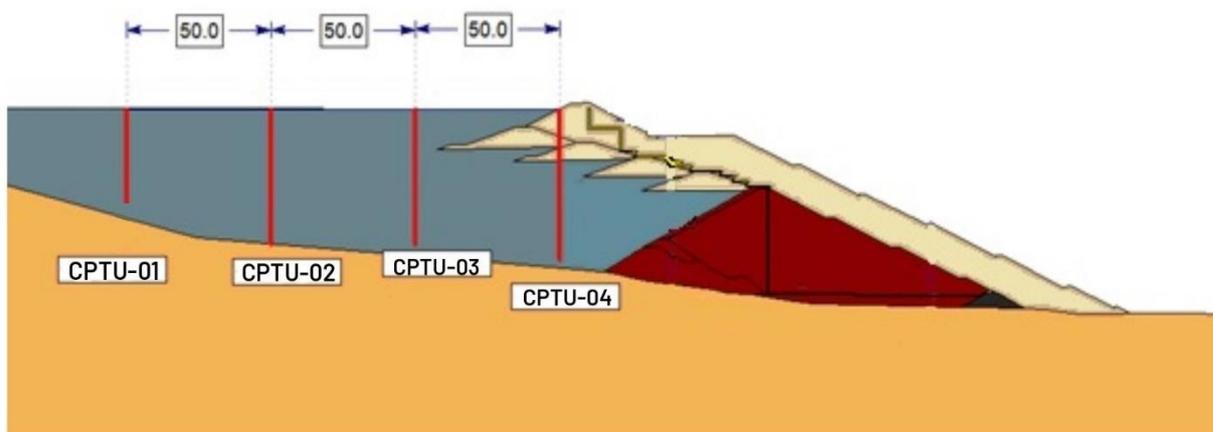
### 6.3 Potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos

Segundo a metodologia de análise de potencial de liquefação proposta por Robertson (2016), utilizando o sistema de classificação dos solos SBTn (*Soil Behavior Type*), tem como objetivo apresentar uma classificação prática, com foco na determinação da categoria de comportamento (dilatantes ou contrativos), em vez de separar materiais por características físicas. O autor analisou o comportamento *in situ* do material, analisando os solos Sand-like (arenosos), transicional (de transição) e clay-like (argilosos), para realizar a proposta do modelo.

Esses parâmetros são: nível d'água no reservatório, e poropressão, ocorrência de cimentação, profundidades mais susceptíveis ao potencial de liquefação.

Serão analisados os furos realizados na praia da barragem do CPTU-01 ao CPTU-04, tendo um distanciamento aproximado de 50 metros entre furos como pode ser visto na figura 35, os dados em relação a profundidade e cota podem ser analisados na tabela 3.

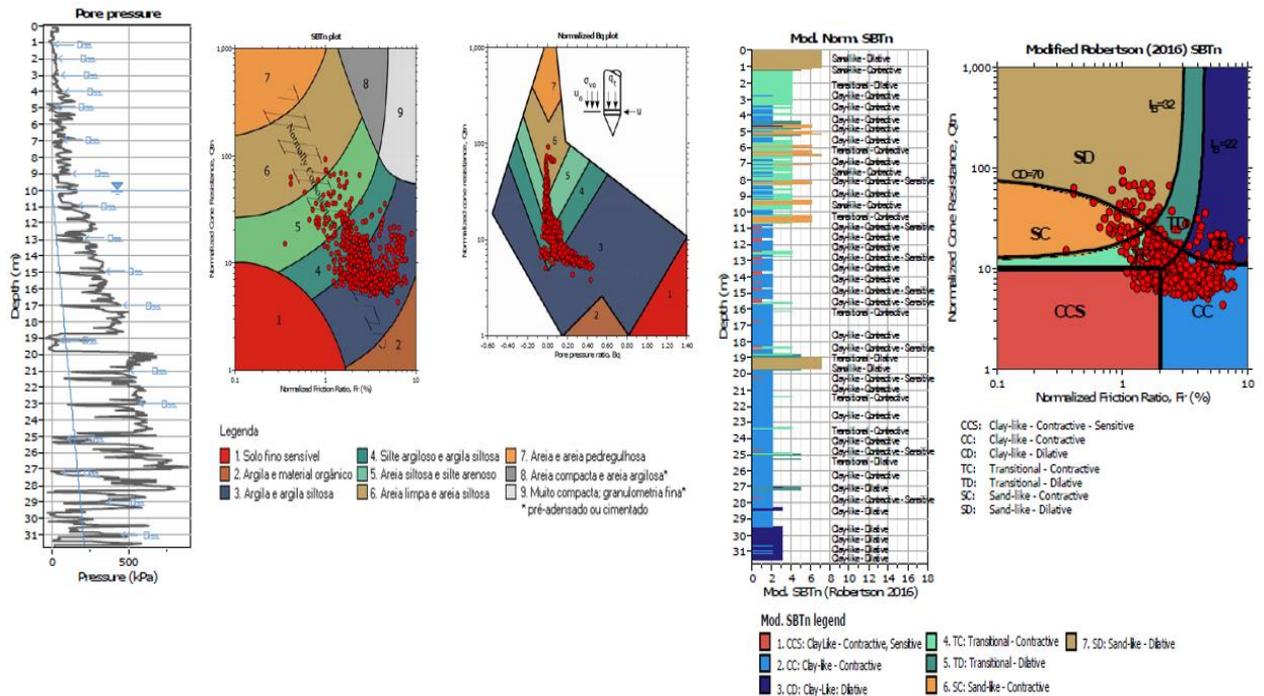
Figura 35 - perfil da barragem com os furos na praia de rejeitos



Fonte: elaboração do autor (2021).

As seguintes características quanto ao potencial de liquefação do CPTU-01 podem ser vistas na figura 36.

Figura 36 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-01

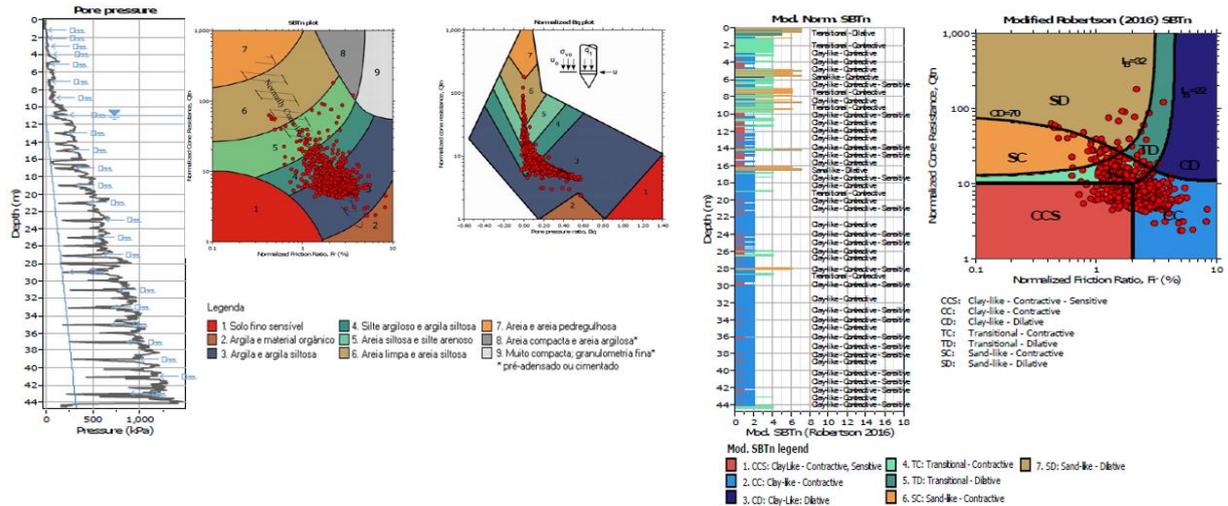


Fonte: elaboração do autor (2021).

Observado os parâmetros da figura 36 pode-se observar que o solo apresenta uma tendência maior para um solo argilo-siltoso, normalmente adensado com um OCR entre 3 e 4, o nível do reservatório está a aproximadamente 10 metros de profundidade e tendendo para o aumento da poropressão no decorrer do furo, analisando o SBTn Robertson (2016), observa-se que mais de 85% dos pontos estão abaixo do  $CD=70$ , sendo classificados como contrateis, sendo assim, considera-se que o material é susceptível a liquefação. Por meio do gráfico Mod. Norm. SBTn observa-se que os pontos considerados contrateis estão entre as profundidades de 1,5 a 29,5 metros. De 1,5 a 3,5 metros apresenta comportamento transicional, os materiais transicionais apresentam comportamento próximo ao grupo sand-like ou clay-like e é típico de materiais finos de baixa plasticidade, como siltes.

As seguintes características quanto ao potencial de liquefação do CPTU-02 podem ser vistas na figura 37.

Figura 37 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-02.

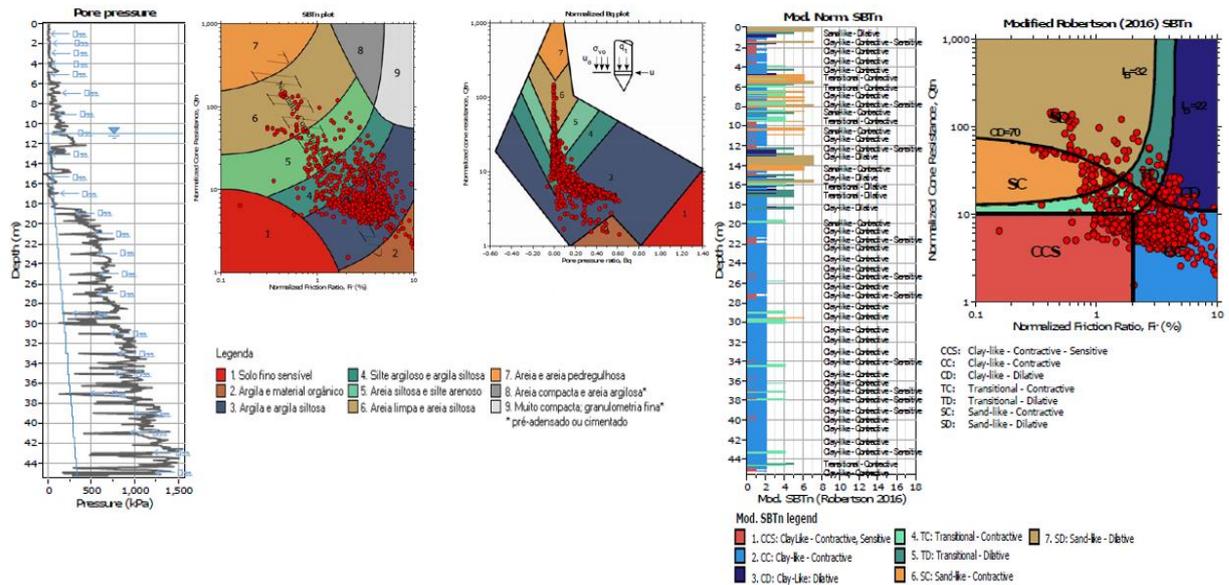


Fonte: elaboração do autor (2021).

De acordo com a figura 37, para o CPTU-02 observa-se que houve alteração do nível d'água em relação ao CPTU-01 de aproximadamente 0,5 metros, as poropressões aumentam de acordo com a profundidade e o solo apresenta-se como argilo siltoso a silte argiloso normalmente adensado, com algumas cimentações e um aumento da densidade em relação ao CPTU-01. Analisando o SBTn Robertson (2016), observa-se que mais de 90% dos pontos estão abaixo do  $CD=70$ , sendo classificados como contrateis sendo assim, considera-se que o material é susceptível a liquefação. Por meio do gráfico Mod. Norm. SBTn observa-se que os pontos considerados contrateis estão entre as profundidades de 1,5 a 44 metros apresentando em maior proporção como materiais clay-like-contrative, que apresentam plasticidade, e tem comportamento não drenado.

A figura 38 apresenta as características quanto ao potencial de liquefação do CPTU-03.

Figura 38 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-03.

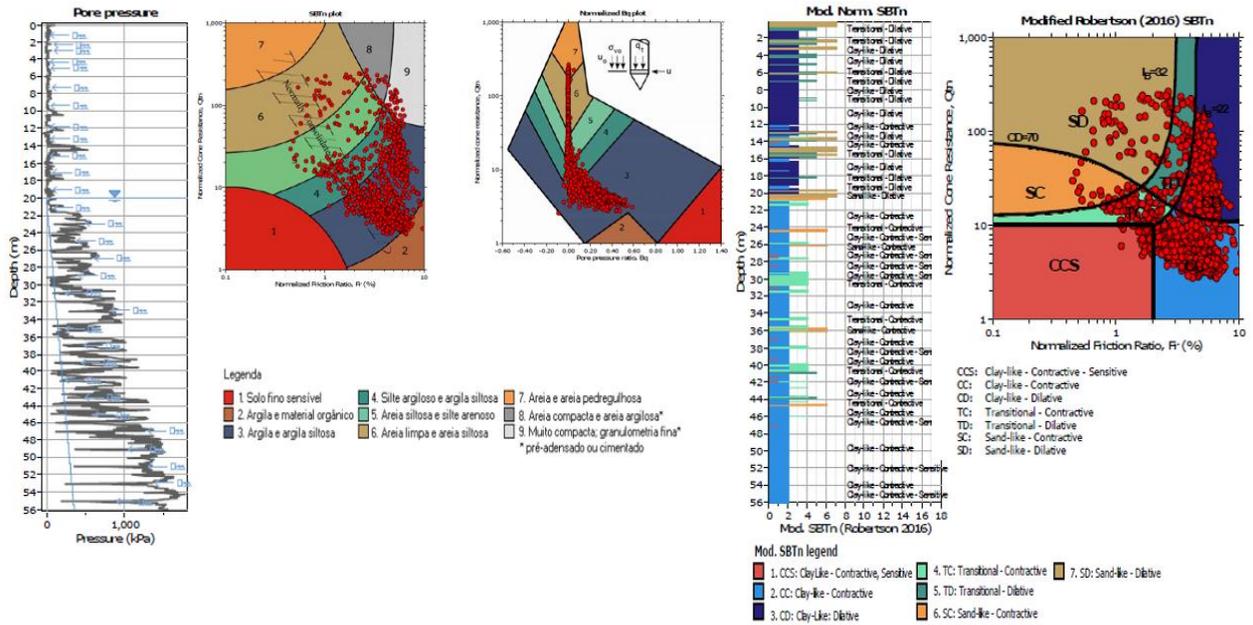


Fonte: elaboração do autor (2021).

Na figura 38, CPTU-03, observa-se que o nível d'água se mantém constante em relação ao CPTU-02, tendo uma poropressão crescente até a profundidade de 12 metros, quando ela tem um comportamento decrescente e estabiliza até a profundidade 16 metros, voltando a manter um comportamento crescente. No gráfico de SBT-plot observa-se que o solo comporta em sua maior proporção como um solo argilo-siltoso, normalmente adensado, observa-se um aumento da densidade, tendo um aumento do OCR e da cimentação entre o silte arenoso e a argila siltosa. Analisando o SBTn Robertson (2016), observa-se que mais de 80% dos pontos estão abaixo do  $CD=70$ , sendo classificados como contrateis, sendo assim, considera-se que o material é susceptível a liquefação. Por meio do gráfico Mod. Norm. SBTn observa-se que os pontos considerados contrateis estão entre as profundidades de 2 a 45 metros apresentando em maior proporção como materiais clay-like-contractive, que apresenta plasticidade, e tem comportamento não drenado.

A figura 39 apresenta as características quanto ao potencial de liquefação do CPTU-04.

Figura 39 - Análise da susceptibilidade a liquefação CPTU-04



Fonte: elaboração do autor (2021).

Para análise do CPTU-04, figura 39, observou-se que o nível d’água teve um rebaixamento, estando agora na profundidade de 20 metros, e observa-se um aumento crescente da poro-pressão abaixo do nível d’água. Através do SBT-plot observa-se um material argilo-siltoso bastante cimentado e um grande aumento da densidade dos grãos e do OCR. Analisando o SBTn Robertson (2016), observa-se que mais de 65% dos pontos estão abaixo do CD=70, sendo classificados como contrateis, sendo assim, considera-se que o material é susceptível a liquefação. Por meio do gráfico Mod. Norm. SBTn observa-se que do início do furo até 20 metros apresenta um comportamento dilatante, a partir de 20 metros até o final do furo apresenta comportamentos contrateis. Pode-se dizer que o comportamento clay-like dilative no início do furo é devido aos alteamentos feitos na barragem, isto porque a posição do furo CPTU-04 está bem próxima da crista da barragem.

## 7 CONCLUSÃO

Uma das maiores adversidades das barragens é justamente a identificação das zonas com potencial de liquefação. Essas áreas prejudicam a estrutura da barragem e podem causar instabilidade, levando ao rompimento total da barragem. Estas são áreas com alto nível d'água e as poropressões tendem a aumentar significativamente se submetidas a carregamentos. A principal causa dos acidentes em Minas Gerais em 2015 e 2019 foi devido à falta de controle operacional, principalmente em relação a drenagem das barragens onde o nível d'água eram elevados.

As investigações geotécnicas são de suma importância até a sua descaracterização por completa, para uma maior segurança do entorno do barramento. O objetivo deste trabalho em coletar, classificar e analisar os parâmetros geotécnicas na determinação do desempenho da barragem foi atingido, foi possível identificar as estratigrafias tanto da praia de rejeitos quanto do talude da barragem e analisar os parâmetros geotécnicos em relação ao tipo de solo de cada estrutura. Através das análises do potencial de liquefação dos solos por meio da relação entre solos dilatantes e contrativos foi possível analisar que a maior chance de ocorrer liquefação está entre os furos mais para o interior da barragem (CPTU-01 e CPTU-02) e que a barragem está tendo uma boa drenagem, isto pode ser observado em relação ao nível d'água no CPTU-04.

As análises dos comportamentos da barragem foram divididas em praia de rejeitos e talude da barragem para verificar o comportamento geotécnico e estratigráfico de cada estrutura de acordo com os ensaios de CPTu, para a praia notou-se um solo mais silte-argiloso, enquanto no talude um solo mais silto-arenoso à arenoso-siltoso.

Para a caracterização geotécnica foram utilizados parâmetros para solos coesivos na praia, observou-se que no CPTU mais próximo da crista (CPTU-04) possui uma maior resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ), além de um maior OCR e uma maior sensibilidade.

No talude foram observadas resistências de pontas superiores a 20 MPa, indicando que os taludes então bem compactados, em relação aos parâmetros geotécnicos para solos não coesivos, observou-se que os furo CPTU-08 tem um maior módulo de deformabilidade (E), enquanto o CPTU-11 possui um menor valor. Também foi observado que para o módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ), o CPTU-09 possui um maior valor em quanto o CPTU-11 possui um menor valor.

Nos rejeitos analisados na praia, foram observadas resistências de pontas baixas, podendo caracterizar o rejeito com “fofo”, isso pode ser justificado pelo excesso de poropressão

ao longo da profundidade dos furos, o excesso de poropressão pode ser analisado principalmente após 20 metros de profundidade.

A partir da comparação entre os parâmetros de permeabilidade através do ensaio de CPTU na praia de rejeitos, verificou-se valores de permeabilidade relativamente baixos, que estão situados nos limites correspondentes a materiais siltosos ( $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  m/s), evidenciando assim, a tendência do solo em apresentar um comportamento não drenado.

Para a estimativa do parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) na praia de rejeitos, os furos (CPTU-01, CPTU-02 e CPTU-03, CPTU-05 e CPTU-06), obtiveram valores de  $S_u$  na faixa de 150 kPa, confirmando a presença de um solo de baixa compressibilidade.

Para a análise em relação a suscetibilidade à liquefação, notou-se que o nível d'água está sendo drenado, este parâmetro pode ser visto analisando o nível d'água do CPTU-01 para o CPTU-04. Tem-se um nível d'água mais alto no CPTU-01 que sofre um rebaixamento até atingir o nível d'água em 20 metros de profundidade no CPTU-04.

De acordo com a metodologia aplicada por meio da relação entre solos dilatantes e solos contrativos proposta por Robetson (2016), percebe-se que os rejeitos avaliados podem ser entendidos como susceptíveis a liquefação, portanto um estudo detalhado deve ser realizado para descrever em detalhes sua resistência não drenada e as condições de estabilidade da estrutura quando a resistência à liquefação é mobilizada. Por meio da avaliação dos testes de CPTu também pode-se notar que existem camadas de argila siltosa e de material silte arenoso no rejeito.

Nos furos mais longes da crista da barragem (CPTU-01, CPTU-02 e CPTU-03) a chance por liquefação é superior a 80% e com a drenagem do nível d'água e com a aproximação da crista é observado que a cimentação e densidade e OCR tendem a ser maiores (CPTU-04), isto pode ser explicado devido a segregação hidráulica onde óxidos de ferros mais densos se depositaram próximos aos spigots.

Na pratica a segregação hidráulica na barragem apresentou pouco contraste de material arenoso na área analisada, o que justifica uma ineficiência na formação de praias durante as etapas de deposição dos rejeitos, esse fato pode ser fundamentado pelo modelo de segregação hidráulica em depósitos de minérios de ferro, figura 4.

Recomenda-se fazer testes laboratoriais para complementar os estudos geotécnicos de campo para uma maior precisão, além de sempre verificar o nível d'água do reservatório com o auxílio de instrumentos geotécnicos como piezômetros.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Comparação entre análise de susceptibilidade por liquefação através de ensaios de campo e laboratório;
- Com o banco de dados gerados pelos ensaios de CPTu construir um modelamento geotécnico;
- Criar um banco de dados com os resultados dos ensaios de CPTu e analisar a variação dos parâmetros geotécnicos em função do tempo;
- Com o auxílio do CPTu fazer uma comparação do comportamento da segregação hidráulica em diferentes tipos de minérios em barragens de mineração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1328: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.** Rio de Janeiro, Brasil. 2017.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, Brasil, 2016
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação.** Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- ALBUQUERQUE FILHO, L.H. 2004. **Análise do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Programa de capacitação em segurança de barragens.** Curso: Inspeção e Segurança em barragens de uso múltiplos. Unidade 4: Instrumentação e e auscultação em barragens. Brasil. 2019. Disponível em: [https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2552/10/Enap19\\_9Un4.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2552/10/Enap19_9Un4.pdf). Acesso em: 10 fev. de 2021.
- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Classificação das barragens de mineração brasileiras – Data base Fev/2019.** Superintendência de Produção Mineral. Gerência de Segurança de Barragens de Mineração. Brasil. 2019. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2019/02/classificacao-oficial-anm.pdf>. Acesso em: 10 fev. de 2021.
- ARNEZ, F.I.V. **Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos.** 2000. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, SP, Brasil. 2000.
- ASTM International – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.** West Conshohocken, PA: 2020.
- ASTM International – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5778-20: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.** West Conshohocken, PA: 2020.
- ASTM International – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3441-16: Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils.** West Conshohocken, PA: 2016

BERTUOL, F. **Caracterização geotécnica da sensibilidade de um depósito sedimentar do Rio Grande do Sul como uso de ensaios de laboratório**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2009

BORINSKI, G.; JOHANSSON, S. E. E.; BAIR, D. K., MMX Mineração e Metálicos S.A. **Relatório Técnico NI 43-101 – Projeto de Ferro Serra da Farofa**. 2008. SRK Consulting Engineers and Scientist, Lakewood, United States, 2008.

CAMPELLA, R.G.; ROBERTSON, PK. 1988. Current status of the piezocone test – state-of-the-art report. **Proceedings of the First International Symposium in Penetration Testing (ISOPT I)**, Orlando, 1988, v. 1.

CASTILHO, B.M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, NUGEO, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2017.

D'AGOSTINO, L.F. **Praia de barragens de rejeitos de mineração: características e análise de sedimentação**. 2008. 374 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, 2008.

DORNAS, A.L.L. **Análise do Comportamento Geotécnico da Barragem Forquilha III Para Geometria Atual e Para Ateamentos Futuros pelo Método de Montante**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, MG, 2008.

FREIRE NETO, J.P. **Estudo da liquefação em rejeitos e aplicação da metodologia de análise de estabilidade**. 2009. 184 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto - MG, 2009.

ICOLD. **Integrated Flood Risk Management**. Bulletin: 2014.

KLAHOLD, P.A. **Interpretação de ensaios de campo em solos com permeabilidade intermediária**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2013.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. 156 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MAGALHÃES, T.E.T. **Proposta de metodologia de classificação de risco e dano potencial associado de barragens de rejeito de mineração no Quadrilátero Ferrífero utilizando o Analytic Hierarchy Process (AHP)**. 2018. 210 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto, 2018.

MEDINA, H.D.F.A.F. **Interpretação de ensaios de piezocone utilizando conceitos de similaridade**. 2007. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade

Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

MELLIA, F.C. **Interpretação de ensaios de piezocone em solos intermediários**. 2017. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências, Recife, Pernambuco, Brasil. 2017

MELO, L.P. **Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos [manuscrito]: caso hipotético da Barragem Tico-Tico**. 2013. 183 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2013.

MIO, G.D. **Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MIRANDA, T.M. **Análise do potencial de liquefação de um rejeito de minério de ferro por meio de ensaios de laboratório e de campo [manuscrito]**. 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, MG, Brasil. 2018.

PEREIRA, E.L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

RIBEIRO, A.B. **Avaliação do regime de fluxo e da poropressão de uma barragem alteada para montante: Comparação das observações de campo e da modelagem numérica**. 2017. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2017.

ROBERTSON P. K.; MELO; L.; WILLIAMS D.; WARD WILSON G. **Relatório córrego do feijão**. 2019.

ROBERTSON, P. K. **Cone Penetration Test (CPT) – based soil behavior type (SBT) classification system – an update**. NCR Research Press: 2016

ROBERTSON, P.K. **Interpretation of in-situ tests – some insights**. 2012 ISC'4 Brasil: 2012.

ROBERTSON, P.K. Soil behavior type from the CPT: na update. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONE PENETRATION TESTING, 2., 2010, CPT'10, Huntington Beach, CA. Anais [...]*. Huntington Beach: USA, 2010, p. 575-583, 2 v.

ROBERTSON, P.K. Soil classification using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 1, p.151-158, 1990.

ROBERTSON, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D.; Grieg, J. 1986. Use of piezometer Cone Data, proceedings of In Situ 86. **ASCE Specialty Conference**, Blacksburg, Virgínia, 1986.

SANTOS JUNIOR, M. P.D.; BRANDÃO, A. H.; GALHARDO, M.G.; TEIXEIRA, G. L. Análise da susceptibilidade à liquefação estática por meio de ensaios de campo e de laboratório. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 12., 2019, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: Comitê Brasileiro de Barragens, 2019.

SANTOS, A.G. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica de um rejeito de minério de ferro**. 2004. 191 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

SANTOS, M. D. D. **Correlações entre sondagem de simples reconhecimento e resultados de ensaio de campo (SBT, CPT, DP) para diferentes solos arenosos**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória., 2017

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SILVA, D.S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2016.

SOUZA, T.C.D. **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito [manuscrito]: uma abordagem probabilística**. 2018. 269 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2018

VEEN, L.H.V.T. **CPT prediction of Soil Behaviour Type, liquefaction potential and ground settlement in Nort-West Christchurch**. 2015. Master of Science in Engineering Geology - University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2015.

VICK, S.G. **Planning, design and analysis of tailings dams**. 2. ed. Canada: Bitech Publishers Ltd, 1990.