



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SEGURANÇA E POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO
DE MINERAÇÃO NO BRASIL

THAIS RIBEIRO MELKI

VARGINHA
2021

THAIS RIBEIRO MELKI

SEGURANÇA E POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO
DE MINERAÇÃO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Denise de Carvalho Urashima

Coorientadora: Prof.^a Me. Mag Geiselly Alves Guimarães

Varginha

2021

ii

THAIS RIBEIRO MELKI

SEGURANÇA E POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO
DE MINERAÇÃO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheira Civil.

Data de aprovação: 08/02/2021

Banca examinadora:



Denise de Carvalho Urashima, Dra.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) - Unidade
Varginha



Mag Geiselly Alves Guimarães, Me.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) - Unidade
Varginha



Luiz Pinheiro da Guia, Dr.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) - Unidade
Varginha



Eduardo Souza Candido, Dr.
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao CEFET-MG campus Varginha, pela oportunidade de formação no curso de graduação em Engenharia Civil.

À todos os professores que fazem parte do corpo docente do curso de graduação de Engenharia Civil, que participaram e contribuíram de alguma forma no meu processo de formação.

Em especial às professoras Denise de Carvalho Urashima e Mag Geisielly Alves Guimarães, pelos ensinamentos ao longo da graduação e grande influência em minha decisão profissional.

Aos colegas de sala que em muitos momentos ao longo desta caminhada foram apoio.

À todos os familiares e amigos que estiveram ao meu lado e torceram por mim nesta caminhada.

Em especial aos meus pais Jacqueline e Samir, ao meu irmão Caio e à minha madrastra Daniela pelo incentivo e apoio durante este caminho e compreensão pela ausência em alguns momentos.

RESUMO

Desde os tempos imperiais, o setor da mineração tem relevância socioeconômica no Brasil. Entretanto, a extração de minério em função do tipo e do processo de beneficiamento pode gerar grande volume de rejeitos, os quais são dispostos e armazenados de distintas formas como, por exemplo, em barragens que são estruturas muito empregadas na mineração brasileira. Devido aos incidentes em barragens do setor da mineração brasileira, principalmente nos últimos cinco anos, a sociedade em conjunto com o poder público vem promovendo ações relacionadas à segurança destas estruturas, visto que o rompimento de uma barragem de rejeito gera impactos imensuráveis em distintos setores. Dessa forma, o aprimoramento dos parâmetros de segurança definidos por leis e normas, assim como o estudo sobre os fenômenos que podem resultar nesses tipos de acidentes, tem sido cada vez mais necessário. Para tanto, a partir de pesquisa exploratória das leis vigentes, foi realizada uma revisão sistemática das leis federais que definem as medidas de segurança para barragens. Além disso, considerando que um dos fenômenos que pode resultar na ruptura dessas estruturas é a liquefação, esta temática também é abordada na pesquisa. Com objetivo de obter melhor compreensão sobre este fenômeno, dando ênfase à liquefação estática, bem como compreender a correlação de ensaios de campo como o *Standard Penetration Test* (SPT) e o *Cone Penetration Test* (CPT) com a resistência à liquefação, realizou-se neste trabalho uma breve análise da metodologia estabelecida por Olson para verificação do potencial de liquefação das barragens. Com o trabalho de conclusão de curso espera-se contribuir para os estudos já existentes na busca de soluções e alternativas na garantia da segurança das barragens, sendo esta uma temática de importância crescente na engenharia geotécnica brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: Parâmetros de segurança. Barragem. Mineração. Liquefação.

ABSTRACT

Since imperial times, the mining sector has had socioeconomic relevance in Brazil. However, the ore extraction, due to its benefitting process, can generate a large volume of tailings, which are disposed and stored in different ways, for example, in dams that are structures widely used in Brazilian mining. Due to the incidents on dams in Brazilian mining sector, mainly in the last five years, the society and public authorities have been promoting actions related to the safety of these structures, since the rupture of a tailings dam generates immeasurable impacts in several sectors. Thus, the improvement of safety standards defined by laws and guidelines, as well as the study of the causes that can lead to these accidents, have become increasingly necessary. Therefore, based on an exploratory research of the current laws, a systematic review of the federal laws that define the safety rules for dams was carried out. In addition, considering that one of the causes that can lead to the rupture of these structures is liquefaction, this theme is also addressed. In order to obtain a better understanding of this phenomenon, emphasizing static liquefaction, as well as to understand the correlation of field tests such as the *Standard Penetration Test* (SPT) and the *Cone Penetration Test* (CPT) with resistance to liquefaction, a brief analysis of the methodology established by Olson to verify the liquefaction potential of the dams was performed. This work authors intend to contribute to the existing studies in the search for solutions and alternatives in reasuring the safety of the dams, this being an issue of increasing importance in Brazilian geotechnical engineering.

KEY-WORDS: Safety standards. Dam. Mining. Liquefaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma exemplificando o beneficiamento de minério de ferro.....	1
Figura 2 - Imagens de satélite da região impactada em Mariana pela ruptura da barragem. .	4
Figura 3 - Imagens de satélite da região impactada em Brumadinho pela ruptura da barragem.	4
Figura 4 - Carta de jazimento aurífero de Djebel-Elba, no Egito há mais de 2000 anos.....	6
Figura 5 - Evolução do número de estruturas cadastradas no Banco de Declarações Ambientais.	10
Figura 6 - Seção de barragem alteada pelo método de montante.....	10
Figura 7 - Modelo teórico de variação da permeabilidade ao longo do depósito de rejeitos .	11
Figura 8 - Seção de barragem alteada pelo método de jusante	11
Figura 9 - Seção de barragem alteada pelo método de linha de centro	12
Figura 10 - Comportamento de areias compactas e fofas durante um carregamento cisalhante.....	22
Figura 11 - Linha do Estado Crítico.....	23
Figura 12 - Estado permanente de deformação.	24
Figura 13 - Respostas típicas de solos granulares sob cisalhamento não drenado.	25
Figura 14 – Envoltória $Q_{tn,cs}=70$	31
Figura 15 - Parâmetro de estado	33
Figura 16 - Faixas de distribuição granulométricas suscetíveis à liquefação.....	34
Figura 17 - Comportamento de um solo sofrendo liquefação, devido carregamento estático ou cíclico.	38
Figura 18 - Superfícies de fluxo por liquefação.	39

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Matriz de Classificação da Categoria de Risco e Dano Potencial Associado de Barragens de Mineração.....	16
Quadro 2 - Faixa de classificação categoria de risco.	17
Quadro 3 - Faixa de classificação dano potencial associado.	17
Quadro 4 - Matriz de classificação quanto ao dano potencial associado.....	18
Quadro 5 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco.	19
Quadro 6 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (Continuação)	20
Quadro 7 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (Continuação)	21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVO DA PESQUISA	3
1.3. JUSTIFICATIVA	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. ABORDAGEM HISTÓRICA DA UTILIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO.....	6
2.2. SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	8
2.2.1. Barragens de rejeito	8
2.2.2. Legislação	12
2.3. COMPORTAMENTO DO SOLO SOB CARREGAMENTO CISALHANTE ...	22
2.4. LIQUEFAÇÃO	26
2.5. MÉTODO DE OLSON (2001).....	31
2.5.1. Definições.....	31
2.5.2. Suscetibilidade à liquefação	32
2.5.2.1. Estado inicial	32
2.5.2.2. Formato dos grãos e granulometria	33
2.5.2.3. Condições de drenagem	34
2.5.2.4. Metodologia para análise da linha de estado permanente	35
2.5.3. Gatilhos para liquefação	37
2.5.3.1. Introdução	37
2.5.3.2. Metodologia para verificação de gatilhos	40
2.5.4. Pós-Gatilho.....	42
2.5.4.1. Introdução	42
2.5.4.2. Metodologia para análise pós-gatilho.....	42

3. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
3.1. CONCLUSÕES	44
3.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

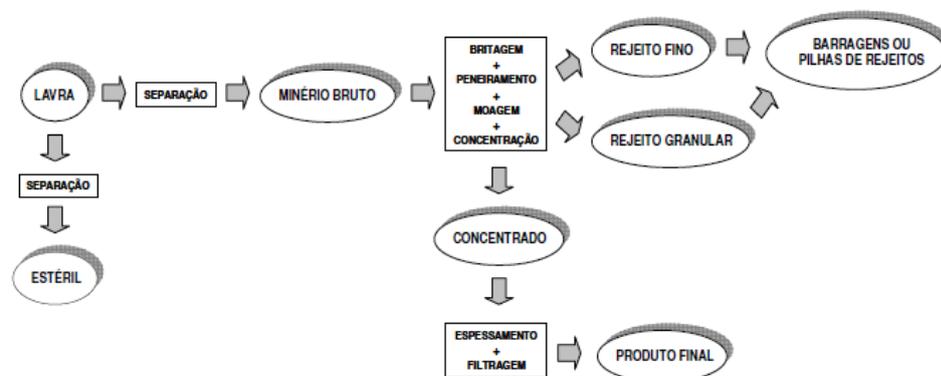
1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Minas Gerais é um Estado brasileiro caracterizado pela sua riqueza mineral, sendo responsável pela produção de aproximadamente 53% de minerais metálicos e 29% de minérios em geral, com evidência para as reservas de minério de ferro (Fe), extraindo 160 milhões de toneladas de ferro/ano (IBRAM, 2014).

A crescente utilização de recursos minerais nos distintos setores econômicos tem demandado cada vez mais a extração de minério. Como consequência disso, tem ocorrido o aumento do volume de rejeitos, por exemplo, na forma de lama resultante do tipo de processo de beneficiamento realizado no material, para que possa ser utilizado na indústria. Os rejeitos gerados pelo processo de beneficiamento podem ser dispostos de distintas formas. Na Figura 1 é apresentado um esquema de beneficiamento de minério de ferro no qual a disposição pode ser realizada em barragens ou pilhas de rejeitos (PEREIRA, 2005).

Figura 1 - Fluxograma exemplificando o beneficiamento de minério de ferro



Fonte: PEREIRA (2005).

A estocagem e a disposição de rejeitos finos em forma de lama constitui uma problemática, uma vez que exige cuidados quanto à segurança e estabilidade dos depósitos. Os riscos relacionados a eventuais rupturas desses sistemas de contenção podem representar distintos prejuízos de escalas consideráveis. Neste contexto, deve-se dar ênfase ao Estado de Minas Gerais, dado o protagonismo nos colapsos de suas barragens de armazenamento de rejeitos ocorridos na última década, que como consequência colocou o país em destaque na lista de desastres industrial,

ambiental, social e humanitário, iniciando em 2014 com o rompimento da barragem na cidade de Itabirito, posteriormente em 2015 em Mariana e, mais recentemente, em janeiro de 2019 na cidade de Brumadinho (DUARTE, 2008; PEREIRA; CRUZ; GUIMARÃES, 2019; MILANEZ, 2015).

Diversos exemplos de colapsos catastróficos de barragens mundialmente reportados tiveram como causa apontada o fenômeno da liquefação, seja esta desencadeada por fatores de natureza estática ou dinâmica. Conceitualmente, entende-se como liquefação o fenômeno associado à perda de resistência ou rigidez de solos podendo desencadear rupturas de barragens e consequentes impactos sociais, ambientais e financeiros. Historicamente, o termo liquefação foi abordado inicialmente por Hazen (1920) no tratamento do rompimento da barragem de Calaveras em 1918, na Califórnia, e posteriormente por Terzaghi (1925) e Casagrande (1936), os quais apresentaram explicações e proposições teóricas para o assunto (ZUQUETTE, 2018).

Para a compreensão de eventos associados à ruptura de barragens de contenção de rejeitos de mineração, como a ocorrência de liquefação, e garantia da segurança na disposição destes rejeitos, faz-se necessário a realização de caracterizações tecnológicas e a sua associação às propriedades geotécnicas. Dentre a caracterização tecnológica obtida por ensaios realizados em amostragens representativas, tem-se a granulometria e a composição mineralógica. Quanto às propriedades geotécnicas, abordam-se o estado de compacidade e a segregação hidráulica, que interferem diretamente na distribuição granulométrica e nas condições de fluxo ao longo da praia de rejeito (SILVA, 2010).

O processo construtivo das barragens de rejeitos podem ocorrer por três métodos: alteada para montante; alteada para jusante; alteada em linha de centro. Sendo que o método que apresenta maior risco de ruptura é o alteamento a montante (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016; ARAÚJO, 2006).

Os principais problemas associados a barragens alteadas a montante são: (a) falta de conhecimento das propriedades dos materiais; (b) falta de estudos de estabilidade voltados para liquefação; (c) deposição de rejeitos não segregados ao longo da praia e com baixa permeabilidade; (d) presença de freática elevada igual a grande porção saturada. O somatório destes efeitos resulta no aumento do potencial de liquefação e ruína das barragens realizadas por alteamento à montante. Dessa forma, torna-se

fundamental a compreensão deste fenômeno nos meios particulados saturados, para que seja possível a tomada de medidas que evitem a sua ocorrência (AZAM; LI, 2010; SILVA, 2010; CARDOZO *et al.*, 2016).

1.2. OBJETIVO DA PESQUISA

O trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo geral avaliar a legislação vigente para segurança de barragens de mineração, bem como o fenômeno da liquefação, com ênfase ao fenômeno da liquefação estática em barragens.

Como objetivos específicos deste trabalho, destacam-se os itens abaixo:

- Analisar a legislação federal de segurança de barragens vigente;
- Compreender o comportamento do solo sob carregamento cisalhante;
- Abordar alguns métodos para análise do potencial à liquefação.

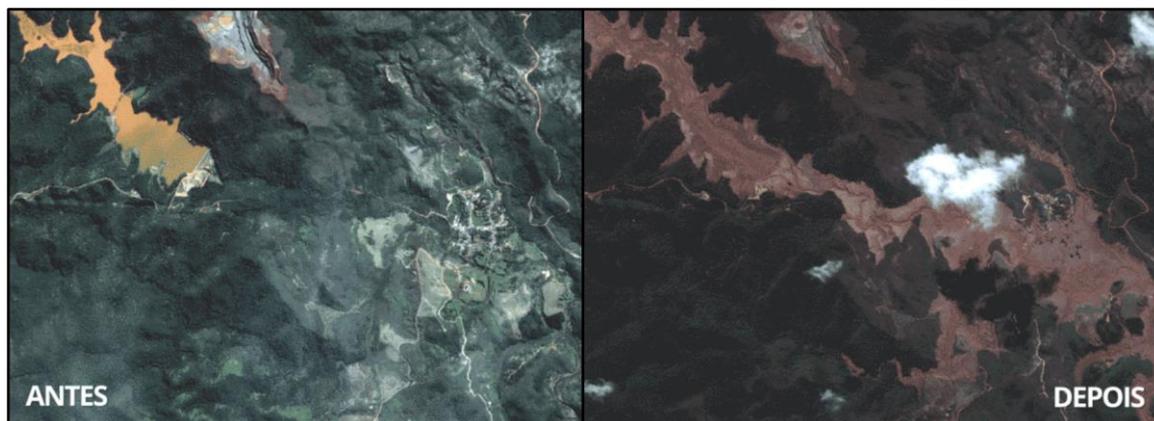
1.3. JUSTIFICATIVA

A função primordial da Engenharia é afiançar segurança das estruturas, instalações e projetos em geral, focando na economia de recursos financeiros e naturais, sendo que uma estrutura segura é aquela que permite a identificação da ocorrência de condições inseguras, admitindo tempo hábil para tomada de decisões, tais como: evacuação, interdição e posteriormente de remediação e recuperação, se for possível.

Na última década os acidentes envolvendo barragens utilizadas para contenção de rejeitos em Minas Gerais colocou o Brasil em alerta sobre os resultados da ruptura destas estruturas. Os acidentes ocorridos em Mariana em 2015 e em Brumadinho em 2019 ganharam destaque mundial dado o alto grau de impacto destes eventos.

O rompimento da Barragem de Fundão localizada em Mariana apresentado na Figura 2, no ano de 2015, foi considerado o desastre industrial que causou o maior impacto ambiental da história do Brasil e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos, com o despejo de 50 milhões de metro cúbicos de rejeito, cujo desastre teve consequências ambientais que só conseguirão ser reparadas em décadas (ROMPIMENTO, 2015).

Figura 2 - Imagens de satélite da região impactada em Mariana pela ruptura da barragem.



Fonte: ROMPIMENTO, (2015).

No ano de 2019 o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão (Figura 3), utilizada para contenção de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito, resultou em 259 mortes e 11 desaparecimentos, sendo considerado por muitos o maior desastre em termos de tragédia humana (ROMPIMENTO, 2020).

Figura 3 - Imagens de satélite da região impactada em Brumadinho pela ruptura da barragem.



Fonte: ROMPIMENTO, (2020).

Tendo em vista estas ocorrências e para evitar que aconteçam novamente, a engenharia aliada às definições legais busca garantir para a sociedade a segurança das barragens utilizadas para contenção de rejeitos de mineração, além da compreensão acerca da ocorrência da liquefação, pois tal fenômeno é em grande parte o fator determinante do potencial de rompimentos e os seus impactos associados.

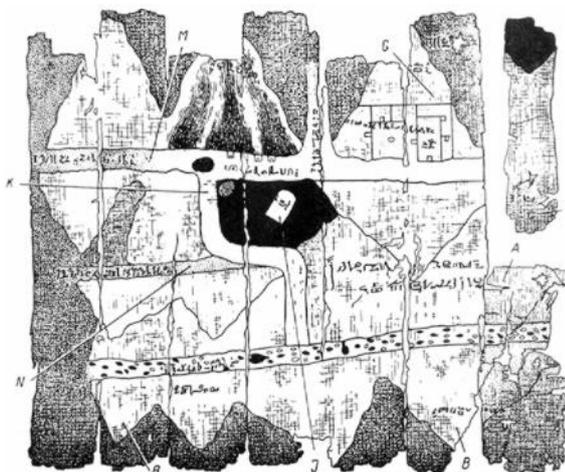
Portanto, este trabalho vem de encontro com a busca por soluções e alternativas para agregar segurança aos métodos de alteamento e disposição de rejeitos, abordando legislações vigentes aplicada para segurança de barragens, bem como avaliando métodos de análises de suscetibilidade à liquefação, com ênfase no método de Olson (2001).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ABORDAGEM HISTÓRICA DA UTILIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Sendo realizada há mais de 450 mil anos, a atividade minerária pode ser considerada a segunda atividade industrial mais antiga exercida pela humanidade, ficando a agricultura em primeira. A aplicação de conhecimento teórico para extração de minerais é registrada desde o Antigo Egito (Figura 4), surgindo juntamente com o interesse pelas rochas e metais preciosos (ADILSON, 2014).

Figura 4 - Carta de jazimento aurífero de Djebel-Elba, no Egito há mais de 2000 anos.



Fonte: ADILSON, (2014).

Na idade média a atividade minerária começou a desenvolver sua técnica. No entanto, até o século XV, os impactos ambientais do descarte e a geração de rejeitos da mineração eram desprezados tanto pelas mineradoras quanto pelas comunidades. Tais rejeitos eram depositados junto a natureza, próximo aos locais de produção, sem preocupação com os resultados negativos imediatos, nem a médio ou longo prazos. Com o início da utilização da força à vapor e o aumento expressivo da produtividade surgiu a necessidade do descarte dos rejeitos em locais cada vez mais distantes do local de produção, comumente próximo a rios ou cursos d'água (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008; ADILSON, 2014).

A partir do século XIX, com o desenvolvimento de tecnologias que tornaram possível minerar corpos com baixo teor mineral, houve um aumento na geração de

rejeitos de mineração que apresentavam um material com granulometria cada vez menor (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

No século XX, além do desenvolvimento de pequenos distritos minerários que atraíram indústrias de apoio com conseqüente crescimento das comunidades locais, começaram a surgir conflitos despertados por interesses agrícolas em relação ao uso da terra e da água. Esses conflitos iniciais impulsionaram a criação de legislações sobre o gerenciamento de rejeitos de mineração que resultou no fim do descarte indiscriminado dos rejeitos de minério em alguns países ocidentais em 1930 (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

A partir de então, as indústrias passaram a investir na construção de barragens de contenção de rejeitos. No entanto, as barragens que haviam sido construídas no início do século XIX apresentavam alto índice de rupturas em ocorrência de fortes chuvas, já que nessa época não era comum utilizar critérios técnicos na fase de construção e operação de barragens (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

O desenvolvimento das técnicas utilizadas nas construções de barragens ocorria de forma empírica, sem a utilização de engenharia de barragens, realizando as construções de acordo com as práticas e equipamentos disponíveis de cada época. Esses conhecimentos práticos foram utilizados por muitos anos, executando-se aterros transversais aos vales com o material estéril da mineração. Essa prática se mostrou bem sucedida enquanto as estruturas eram mais baixas e de menor volume de represamento. No entanto, o aumento de volume de rejeitos gerado pelo desenvolvimento industrial e das técnicas utilizadas na mineração resultaram em um acréscimo significativo no volume represado, acarretando em uma elevação do risco de ruptura nas barragens (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

Apesar do interesse no aprimoramento da construção de barragens de contenção de rejeitos ter iniciado em 1930, a disponibilidade de equipamentos de alta capacidade para movimentação de terra só se tornou uma realidade na década de 40, sendo possível a construção de barragens de contenção de rejeitos com técnicas de compactação, resultando em maior grau de segurança para as mesmas (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

Na década de 50 os princípios geotécnicos fundamentais já conhecidos começavam a ser aplicados nas barragens de contenção de rejeitos. Em 1965, a ocorrência de várias rupturas de barragens durante um terremoto no Chile chamou a

atenção para a pesquisa das possíveis causas de ruptura das barragens, o que resultou no conhecimento da maioria dos aspectos técnicos que envolve o projeto de barragens de contenção de rejeitos ainda no início da década de 70 (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

O desenvolvimento dos aspectos ambientais e legislativos cresceram de forma considerável nas últimas décadas, de forma a assegurar a estabilidade física e econômica das barragens de contenção de rejeitos, dando atenção ao potencial de dano ambiental da barragem e visando a segurança das comunidades situadas nos vales a jusante da barragem (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

A verificação da segurança das barragens em um período precedente era feita dando ênfase as questões estruturais e hidráulico-operacionais, sendo realizado um controle dos processos de projeto, construção e operação de forma a garantir segurança às comunidades, considerando uma probabilidade baixa de ruptura. Posteriormente, com o desenvolvimento das tecnologias e aumento da geração de rejeitos, acarretou-se na construção de estruturas de contenção cada vez maiores e com a necessidade de controle da estabilidade das barragens a longo prazo (ÁVILA; SAWAYA, 2011; DUARTE, 2008).

No entanto a aplicação incorreta dos métodos conhecidos ou até mesmo a não aplicação dos mesmos ainda resultam em falhas. Isso tem alertado e impulsionado os profissionais de geotecnia de barragens para adoção de medidas seguras ao longo de todo o processo de projeto, construção e operação. Esta mudança de comportamento dos profissionais em relação ao cuidado com a estabilidade das barragens tem resultado em melhoria dos métodos adotados para disposição dos rejeitos, agregando-se cada vez mais segurança às estruturas de contenção.

2.2. SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

2.2.1. Barragens de rejeito

A utilização de barragens de rejeito no Brasil ocorre desde o século XVIII, tendo sido iniciada pela mineração de ouro na região de Minas Gerais. Já o surgimento de barragens convencionais no Brasil se iniciou no século XIX, impulsionado pela necessidade de abastecimento de populações e irrigação na região Nordeste do País. Posteriormente, já no final do século XIX nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, as

barragens começaram a ser aplicadas de outra forma, sendo implantadas para produção de energia elétrica. Neste trabalho será abordado de forma mais detalhada as barragens de rejeito, enfatizando sua utilização no setor minerário do estado de Minas Gerais (ÁVILA; SAWAYA, 2011).

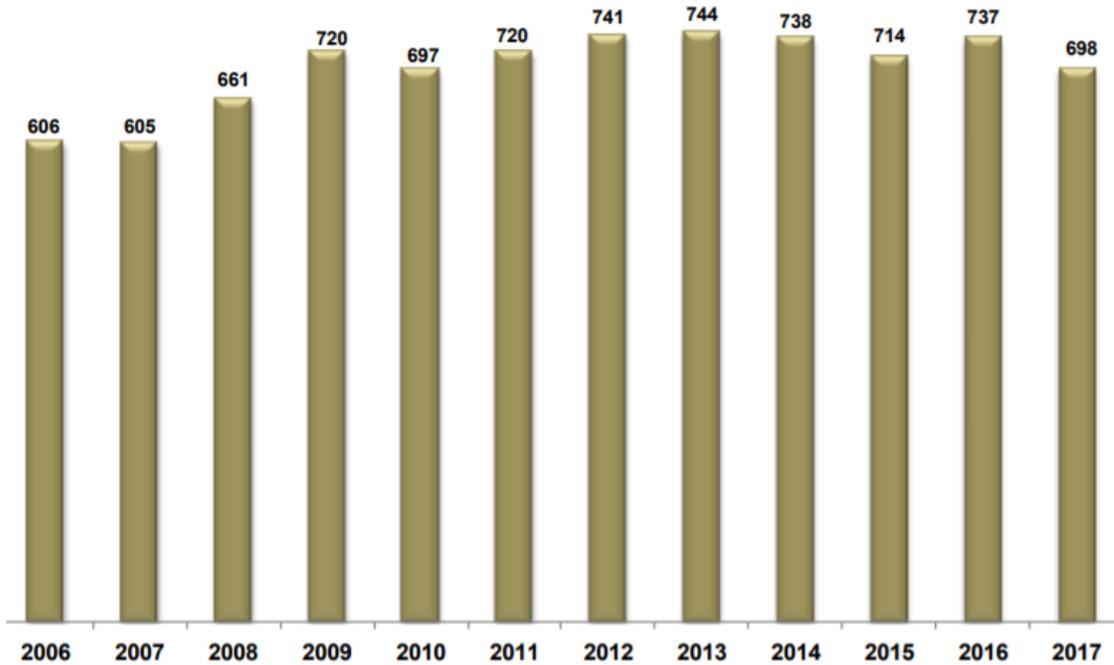
A diferença entre barragens convencionais, normalmente utilizadas para represamento de água, e barragens de rejeitos ocorre devido ao fato de que as barragens convencionais são construídas com materiais originados de uma mesma jazida, o que atribui características geotécnicas semelhantes a toda a estrutura. Além disso, a realização de sucessivas compactações atribui a estas estruturas certa homogeneidade. Já as barragens de rejeito possuem uma heterogeneidade, proveniente dos diferentes períodos de realização de alteamento, bem como dos diferentes materiais utilizados para construção devido a diferença dos processos de lavra (ARAÚJO, 2006).

Apesar da existência de outras formas de deposição do rejeito de mineração as barragens de contenção são hoje o método preferencial para este fim, principalmente quando o próprio rejeito pode ser utilizado como material de construção da estrutura da barragem. Isto explica o grande número de estruturas cadastradas no estado de Minas Gerais (Figura 5). Portanto, faz-se necessário o estudo geotécnico do rejeito que será descartado e que poderá ser utilizado na estrutura da barragem (ESPOSITO; ASSIS, 1999; FEAM, 2018).

As barragens de rejeito podem ser construídas, atualmente, por três métodos construtivos diferentes, sendo eles o método de montante, o método a jusante e o método de linha de centro. O método de montante (Figura 6) se dá inicialmente pela construção de um dique de partida a partir do qual são realizados os alteamentos até a cota definida em projeto, realizando-se um deslocamento do eixo da barragem em direção à montante. A polpa normalmente é transportada por tubulações localizadas na crista da barragem, que por meio de “*spigots*”, busca distribuir o rejeito de forma uniforme no reservatório. No processo de deposição do rejeito, em decorrência de sua ampla distribuição granulométrica, ocorrem zonas de diferente permeabilidade, sendo que as partículas mais grossas e mais densas sedimentam-se mais rápido do que as partículas menores e menos densas. Dessa forma, as partículas de maior granulometria sedimentam perto do dique formando uma zona de alta permeabilidade, enquanto as demais são transportadas para zonas internas da bacia de sedimentação

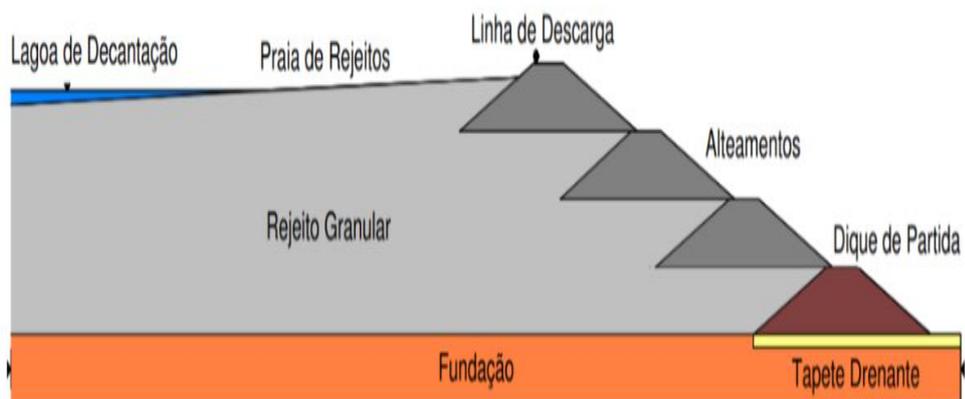
formando uma zona de permeabilidade intermediária e outra zona mais distante do dique de baixa permeabilidade como mostra a Figura 7 (LOZANO, 2006; ARAÚJO, 2006).

Figura 5 - Evolução do número de estruturas cadastradas no Banco de Declarações Ambientais.



Fonte: FEAM, (2018).

Figura 6 - Seção de barragem alteada pelo método de montante



Fonte: ALBUQUERQUE FILHO (2004).

Figura 7 - Modelo teórico de variação da permeabilidade ao longo do depósito de rejeitos

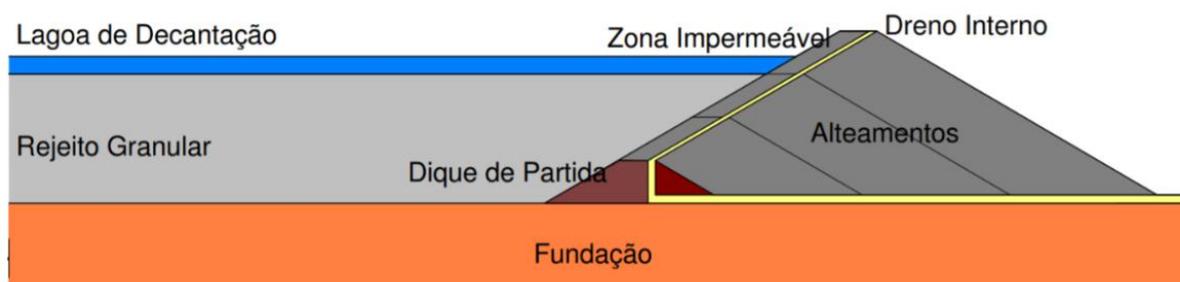


Fonte: VICK (1983), adaptado.

Embora o método de montante seja o método mais vantajoso em questão de custo, devido ao menor volume de material para alteamentos, menor custo de construção e maior velocidade de alteamento, este método também implica em baixa segurança e suscetibilidade à liquefação já que os alteamentos são construídos sob areia saturada fofa não compactada e/ou rejeitos (LOZANO, 2006; ARAÚJO, 2006).

Já no método de jusante o alteamento é realizado em direção à jusante, sendo iniciado por um dique impermeável, que deve conter um sistema de drenagem interna (Figura 8). Este método apresenta vantagens quanto ao controle das superfícies freáticas devido à presença de sistema de drenagem, bem como obtém mais resistência e segurança por possibilitar a compactação de todo o corpo da barragem. No entanto requer maior investimento dado o alto custo de implantação e a necessidade da utilização de ciclones para garantir a separação dos rejeitos, bem como necessita de maior quantidade de rejeitos e sistemas de drenagem eficientes dada a probabilidade de colmatação do mesmo (LOZANO, 2006; ARAÚJO, 2006).

Figura 8 - Seção de barragem alteada pelo método de jusante

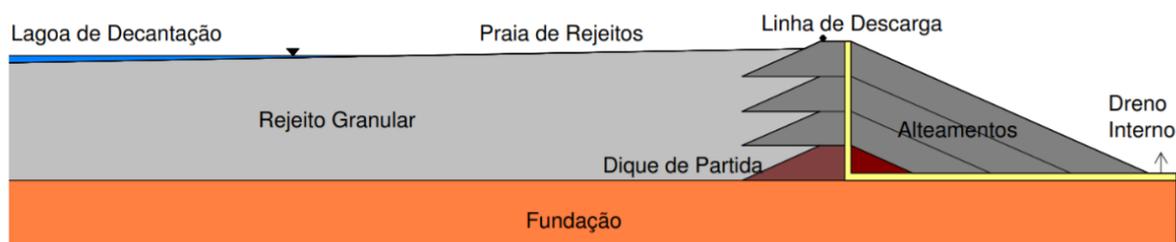


Fonte: ALBUQUERQUE FILHO (2004).

Já no método de linha de centro, que é apresentado na Figura 9, é uma solução intermediária entre os métodos de montante e de jusante. Neste método o alteamento

é realizado mantendo-se o eixo central do dique de partida e possibilita a utilização de zonas de drenagem interna em todas as etapas de alteamento (LOZANO, 2006; ARAÚJO, 2006).

Figura 9 - Seção de barragem alteada pelo método de linha de centro



Fonte: ALBUQUERQUE FILHO (2004).

Cada método construtivo de barragem de rejeito requer um diferente tipo de tratamento, assim como cada tipo de rejeito gerado pela mineração devido ao fato de o rejeito ser subproduto do processo de mineração e, dessa forma, apresentar características que são função do minério bruto e também receberem influência do processo industrial e do beneficiamento submetido.

2.2.2. Legislação

A utilização de barragens para diversas atividades humanas (represamento de água, geração de energia e retenção de rejeitos minerários) é imprescindível. Contudo, o risco inerente que estas estruturas oferecem à sociedade e ao meio ambiente em caso de rupturas e falhas é tema de preocupação para a sociedade mundial há algumas décadas. Todavia, no Brasil a definição de uma legislação que estabeleceu parâmetros para a segurança das barragens só ocorreu em 20 de setembro de 2010 com a promulgação da Lei nº 12.334.

A Lei nº 12.334 (2010) estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Tal lei foi alterada recentemente pela Lei nº 14.066 (2020), de modo que os objetivos da PNSB definidos pelo Art. 3º da Lei 12.334 (2010) e alterada pelo Art. 2º da Lei nº 14.066 (2020), ficaram da seguinte forma:

“I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências;

II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros de barragens;

III - promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;

IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;

V - coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;

VI - estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;

VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos

VIII - definir procedimentos emergenciais e fomentar a atuação conjunta de empreendedores, fiscalizadores e órgãos de proteção e defesa civil em caso de incidente, acidente ou desastre.” (BRASIL, 2010; BRASIL 2020).

De acordo com as definições do Art. 1º da Lei 12.334 (2010) e alterações do Art. 2º da Lei nº 14.066 (2020), para as barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, que compreendem uma das seguintes características devem ser incluídos na PNSB, conforme segue:

“I - Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;

II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei;

VI - Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.” (BRASIL, 2010; BRASIL 2020).

As Leis nº 12.334 (2010) e nº 14.066 (2020) definiram que a responsabilidade legal pela segurança da barragem competiria ao empreendedor. Devendo o mesmo determinar as medidas necessárias à garantia da segurança da barragem, tendo que ser considerada as fases de planejamento, projeto, construção, primeiros enchimento e vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros. No entanto, a fiscalização da segurança da barragem de rejeitos caberia à entidade que regulamenta e fiscaliza as atividades minerárias para fins de disposições final ou temporária de rejeitos. Dessa forma, essa fiscalização ficou a cargo da Agência Nacional de Mineração (ANM), antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

A Lei nº 12.334 (2010) e sua alteração pela Lei nº 14.066 (2020) estabelecem instrumentos para implantação da Política Nacional de Segurança de Barragens. Dois destes instrumentos utilizados pela PNSB são o Plano de Segurança de Barragem, constando a inclusão do PAE (Plano de Ação de Emergência), e o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado.

O PAE deve estabelecer medidas a serem tomadas pelo empreendedor em casos de emergência, ficando-se definido pela Lei nº 14.066 (2020) a sua obrigatoriedade para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração. Como parte do PAE, deve-se realizar a definição da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Segurança Secundária (ZSS) com base no mapa de inundação definido para o pior cenário identificado. Além disso, deve-se realizar o levantamento de população existente na ZAS e sua vulnerabilidade social, sendo que é vetada a implantação de barragens de mineração que apresentem cenários de ruptura com identificação destas comunidades na ZAS.

O Plano de Segurança de Barragens (PSB), cujo objetivo é auxiliar nas medidas de segurança da barragem, definido pela Lei nº 12.334 (2010) sofreu alterações no seu nível de detalhamento pela Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017, pela Resolução ANM nº 32, de 11 de maio de 2020 e pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.

A Portaria DNPM nº 70.389 (2017) evidenciou que a implantação do PSB é obrigatória e de responsabilidade do empreendedor, sendo o seu detalhamento e extensão dependente da complexidade da barragem e, assim, garantindo-se as

condições de segurança. Definiu-se que a atualização do PSB deve ser realizada em decorrência das Revisões Periódicas de Segurança da Barragem (RPSB), das Inspeções de Segurança Regulares (ISR) e das Inspeções de Segurança Especiais (ISE), quando necessárias.

As Revisões Periódicas de Segurança de Barragem, é realizado um relatório com o intuito de indicar ações a serem tomadas para manutenção da segurança da barragem, a partir da verificação das documentações e das condições estruturais. O período de realização dessas revisões é definido em função do nível de Dano Potencial Associado (DPA) da barragem em análise, sendo que para barragens com DPA associado alto, médio e baixo as revisões periódicas devem ocorrer a cada 3 anos, 5 anos e 7 anos respectivamente, podendo essa periodicidade sofrer alteração de acordo com modificações estruturais realizadas.

As Inspeções de Segurança se tratam de vistorias de rotinas nas barragens, as quais podem ser do tipo Regular ou Especial caso alguma vistoria apresente uma anomalia com pontuação máxima de 10 pontos no Estado de Conservação (Quadro 6).

De forma a tornar acessível à sociedade informações sobre a segurança das barragens do território nacional a Portaria DNPM nº 70.389 (2017) criou o Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), integrado ao Cadastro Nacional de Barragens e Mineração.

As Inspeções de Segurança Regulares (ISR) constam no preenchimento quinzenal de Fichas de Inspeção Regular e Extrato de Inspeção de Segurança e elaboração semestral do Relatório de Inspeção de Segurança Regular, sendo que pode ser solicitada pela Agencia Nacional de Mineração (ANM), antigo DNPM, a realização de nova análise de estabilidade. A partir das Inspeções de Segurança Regulares, o empreendedor encaminha à ANM por meio do SIGBM a Declaração de Condições de Estabilidade da Barragem.

Quando necessária a realização das Inspeções de Segurança Especial (ISE), as Fichas de Inspeção Especial podem também ser solicitadas novamente a qualquer momento pela ANM. Apenas quando a anomalia detectada for classificada como extinta ou controlada deve-se elaborar Relatório Conclusivo de Inspeção Especial que deve ser anexo ao PSB.

Atualmente, a sistemática de cadastramento de barragens utilizado e criado pela PNSB é o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A atualização das condições da segurança das barragens no SNISB, realizado de forma informatizada, ficou a cargo do empreendedor, devendo o mesmo manter o sistema atualizado com as barragens de mineração em construção, em operação e desativada.

A Lei nº 12.334 (2010) estabeleceu que a classificação das barragens por categoria de risco e por dano potencial associado deveria ser realizada pelos agentes fiscalizadores, levando em conta os dados fornecidos pelo empreendedor e os critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) determinados pela Resolução nº 143 (2012). O sistema para classificação de barragens de mineração definido pela Resolução nº 143/12 foi alterado pela Portaria DNPM nº 70.389 (2017), de 17 de maio de 2017 e pela Resolução ANM nº 32 (2020).

Atualmente, a avaliação da segurança das barragens de mineração é realizada seguindo definições da Portaria DNPM nº 70.389 (2017). Os parâmetros estabelecidos pelo Quadro 1 relacionam as faixas de classificação apresentada para a Categoria de Risco e para o Dano Potencial Associado da barragem, sendo que as faixas de classificações são: baixo, médio ou alto, para ambos.

Quadro 1 – Matriz de Classificação da Categoria de Risco e Dano Potencial Associado de Barragens de Mineração.

	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
CATEGORIA DE RISCO	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Fonte: Anexo I da Portaria DNPM nº 70.389 (DNPM, 2017), adaptado.

As faixas de classificação de categoria de risco e dano potencial associado são feitas seguindo as pontuações definidas pelos Quadros 2 e 3, respectivamente.

Quadro 2 - Faixa de classificação categoria de risco.

PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 65 ou EC* = 10 (*)
	MÉDIO	37 a 65
	BAIXO	≤ 37
(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade providências imediatas pelo responsável da barragem.		

Fonte: Anexo V da Portaria nº 70.389 (DNPM, 2017), adaptado.

Quadro 3 - Faixa de classificação dano potencial associado.

PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)		
CLASSIFICAÇÃO DE DANO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$13 < DPA < 7$
	BAIXO	≤ 7

Fonte: Anexo V da Portaria nº 70.389/17 (DNPM, 2017), adaptado.

Para definição das pontuações, os critérios ficam definidos quanto ao dano potencial associado no Quadro 4 e quanto à categoria de risco nos Quadros 5, 6 e 7, que ficam divididos em:

- 1.1 Características Técnicas (CT) (Quadro 5);
- 1.2 Estado de Conservação (EC) (Quadro 6);
- 1.3 Plano de Segurança de Barragens (PS) (Quadro 7).

Quadro 4 - Matriz de classificação quanto ao dano potencial associado.

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Muito Pequeno \leq 500 mil m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos do tipo Classe II B – Inertes. (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos do tipo Classe II B – Inertes (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes (8)	ALTO (existe alta concentração de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande \geq 50 milhões m ³ (5)		MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I-Perigosos (10)	
DPA= Σ (a até d)			

Fonte: Anexo V da Portaria nº 70.389 (DNPM, 2017), adaptado.

Quadro 5 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco.

1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)				
Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)	Método Construtivo (d)	Auscultação (e)
Altura \leq 15m (0)	Comprimento \leq 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Deca milenar (0)	Etapa única (0)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)	Alteamento a jusante (2)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2)
30m \leq Altura \leq 60m (4)	200 \leq Comprimento \leq 600m (2)	TR = 500 anos (5)	Alteamento por linha de centro (5)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Alteamento a montante ou desconhecido (10)	Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8)
CT = Σ (a até e)				

Quadro 6 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (Continuação)

1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras. (f)	Percolação (g)	Deformações e Recalques (h)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (i)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)
EC = Σ (f até i)			

Quadro 7 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (Continuação)

1.3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS				
Documentação de Projeto (j)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (k)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (l)	Plano de Ação Emergencial - PAE (m)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (n)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação. (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto "como está" (3)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto básico (5)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Projeto conceitual (8)				Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)
Não há documentação de projeto (10)				
$PS = \Sigma (j \text{ até } n)$				

Fonte: Anexo V da Portaria nº 70.389 (DNPM, 2017), adaptado.

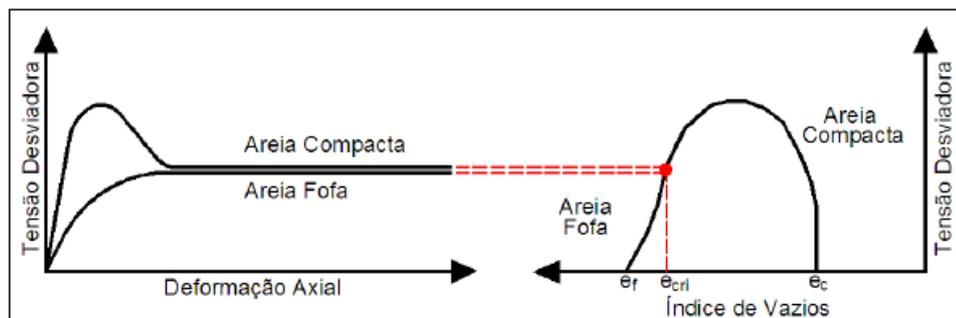
Recentemente o alteamento de barragens pelo método a montante foi proibido pela Lei nº 14.066 (2020), já que este método implica em nível de segurança reduzido.

2.3. COMPORTAMENTO DO SOLO SOB CARREGAMENTO CISALHANTE

A observação de materiais granulares quando solicitados ao cisalhamento, realizada por Reynolds (1885), tornou possível perceber que estes materiais submetidos ao cisalhamento sofriam variação de volume, de modo que esta propriedade recebeu a terminologia de dilatância (CASTRO, 1969).

No entanto, a importância deste comportamento para o estudo da liquefação só foi reconhecida em 1936, quando Arthur Casagrande definiu o conceito de estado crítico, a partir da percepção de que a areia no estado fofo apresentava a tendência de contrair e a areia em estado compacto a tendência de dilatar, ambas convergindo para o mesmo índice de vazios (Figura 10). Sendo apresentado o conceito de índice de vazios crítico, caracterizado pelo estado no qual um solo não coesivo sofre deformação sem alteração de volume (CASTRO, 1969).

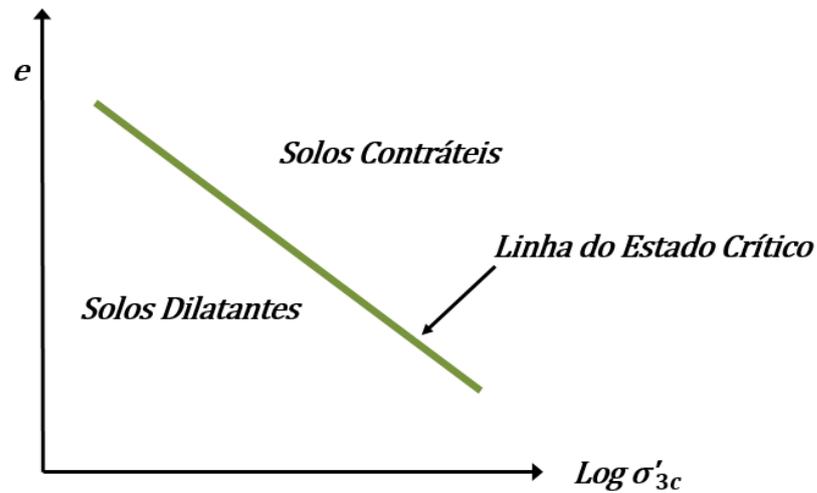
Figura 10 - Comportamento de areias compactas e fofas durante um carregamento cisalhante



Fonte: FREIRE NETO (2009).

Ensaio utilizando diferentes tensões confinantes realizados por Casagrande tornaram possível perceber que o índice de vazios crítico não era um parâmetro característico do solo, mas que sofria variação em função das tensões confinantes à qual o solo era submetido. Dessa forma, estabeleceu-se uma relação entre o índice de vazios crítico e o logaritmo das tensões confinantes, conhecida como linha de estado crítico (Figura 11) a qual definiria a divisão entre os solos granulares dilatantes e contráteis (CASTRO, 1969; FREIRE NETO, 2009).

Figura 11 - Linha do Estado Crítico



Fonte: FREIRE NETO (2009), adaptado.

Ainda como resultado dos estudos de Casagrande, foi possível avaliar o comportamento de um material granular, que tivesse sua drenagem impedida, pois sofreria variações da poropressão devido à tendência de alteração de volume do material. De acordo com esta previsão, areias em estados mais fofos do que o estado crítico, submetidas a forças cisalhantes, sofreriam um acréscimo de poropressão e um correspondente decréscimo na resistência ao cisalhamento, que em função da magnitude desta alteração poderiam resultar em liquefação do solo. No entanto, os ensaios existentes na época não permitiam a mensuração das poropressões geradas durante o ensaio de cisalhamento a volume constante (CASTRO, 1969; FREIRE NETO, 2009).

Dando continuidade ao estudo de Casagrande, Castro (1969) realizou ensaios de compressão triaxiais não drenados, com tensões controladas, a partir dos quais estabeleceu uma relação entre os logaritmos das tensões confinantes e os índices de vazios obtidos sob grande deformação. A linha definida por esta relação foi denominada “linha de estado permanente”, na qual o material se comportaria de maneira análoga à linha de estado crítico (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010).

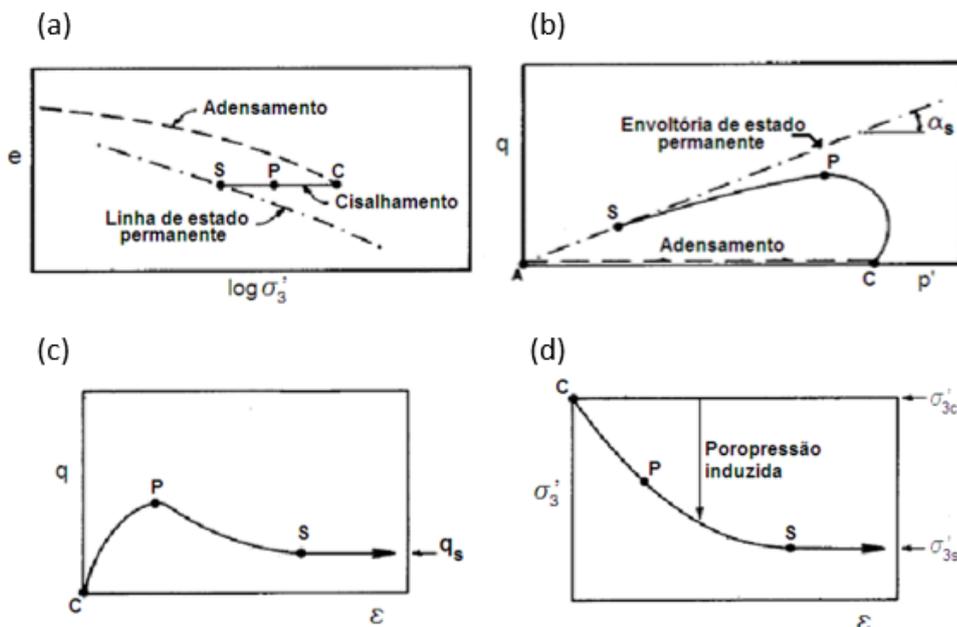
Recorrendo à definição de linha de estado permanente de Poulos *et al.* (1985), a partir de resultados de ensaios triaxiais não drenados, estabeleceu um método padrão para análise do comportamento tensão-deformação para solos contráteis (Figura 12).

A Figura 12.a ilustra que após o adensamento de uma amostra de natureza contrativa, para um dado índice de vazio, deve-se realizar o controle da tensão

confinante de modo a reduzi-la, para que seja alcançada a condição de estado permanente. Este controle da tensão confinante é representado na Figura 12.a, inicialmente pelo ponto C como a condição logo após o adensamento da amostra, o ponto P como a máxima tensão desviadora à qual o corpo de prova é submetido e o ponto S, que representa o momento no qual a amostra está no estado permanente. A trajetória de tensões efetivas correspondentes a esse processo é ilustrada na Figura 12.b com as representações dos pontos C, P e S, bem como define o ângulo de atrito do solo no estado permanente (α_s) (POULOS *et al.*, 1985).

O comportamento tensão-deformação para testes realizados em amostras contrácteis é indicado na Figura 12.c. O pico da tensão cisalhante, representado pelo ponto P, extrapolado por meio da poropressão induzida, leva o solo ao estado permanente (ponto S). É possível notar pela representação gráfica a característica do estado permanente (Figura 12.c e Figura 12.d, ponto S) do material granular que se deforma continuamente sem alterações significativas nas tensões atuantes (POULOS *et al.*, 1985).

Figura 12 - Estado permanente de deformação.



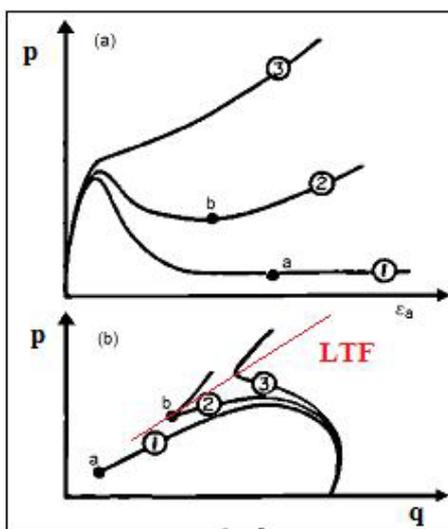
Fonte: FREIRE NETO (2009), adaptado.

Além da modelagem tensão-deformação desenvolvida por Poulos *et al.* (1985), outros estudos avaliaram também o comportamento dos solos granulares quando submetidos ao cisalhamento não drenado. Estes estudos produziram a modelagem

de três tipos diferentes de comportamento das areias sob estas condições, conforme ilustrado na Figura 13.

O comportamento ilustrado pela curva 1 (Figura 13) demonstra um comportamento de solo tipicamente contrátil, no qual o solo chega a uma resistência de cisalhamento de pico, seguida de uma queda de resistência sob deformação até atingir o estado permanente, representado pela letra a, no qual sofre deformação sem alteração de volume. Segundo Castro (1969) esta resposta obtida para solos em laboratório é o que basicamente caracteriza o fenômeno da liquefação na natureza (SRISKANDAKUMAR, 2004; FREIRE NETO, 2009; CASTRO, 1969).

Figura 13 - Respostas típicas de solos granulares sob cisalhamento não drenado.



Fonte: SILVA (2010).

Já o comportamento representado pela curva 2 (Figura 13), segundo Castro (1969) representa um comportamento intermediário entre os solos de comportamento contrátil, que resultam em casos de falha por liquefação, e comportamentos de solos dilatantes. Neste caso, o material alcança um estado de resistência mínima representado pelo ponto b e, em seguida, apresenta recuperação de sua resistência demonstrando tendência a dilatação. Este comportamento foi denominado por Castro (1969) de liquefação limitada (SRISKANDAKUMAR, 2004; FREIRE NETO, 2009; CASTRO, 1969).

O comportamento definido pela curva 3 (Figura 13) é característico de solos com tendência dilatante, os quais têm o aumento de sua resistência ao cisalhamento, conforme sofrem deformação sob uma sollicitação cisalhante. Os solos, cujo

comportamento é definido pela curva 3, possuem um ponto de inflexão que reflete o momento de alteração de seu comportamento contrátil inicial, devido ao excesso de poropressão, para o comportamento dilatante causado pela redução das poropressões (SRISKANDAKUMAR, 2004; FREIRE NETO, 2009; CASTRO, 1969).

As curvas 2 e 3 representam o momento de alteração do comportamento de um solo contrátil para um solo dilatante, esta mudança é representada pela Linha de Transformação de Fase (LTF) demonstrada na Figura 13.b (SRISKANDAKUMAR, 2004; FREIRE NETO, 2009).

A tendência de alteração de volume dos solos granulares não é uma característica permanente, ou seja, um solo de comportamento contrátil (curva 1) pode ser modificado para um comportamento dilatante (curva 3) dependendo das condições iniciais de solitação ao qual o solo é submetido, densidade e condições de drenagem (SRISKANDAKUMAR, 2004).

2.4. LIQUEFAÇÃO

Liquefação é o fenômeno no qual ocorre o aumento da poropressão e, conseqüentemente, a redução da tensão efetiva e da tensão cisalhante, o que resulta na ruptura do solo dado que se dá normalmente por esforços cisalhantes. Portanto, a avaliação do potencial de ocorrência deste fenômeno é de suma importância.

A ocorrência da liquefação está associada às seguintes características: materiais geológicos granulares e com baixa coesão, em condição saturada ou muito próxima, submetidos a cargas em condição não drenada ou sujeitos a vibrações. A liquefação pode ser classificada como estática ou dinâmica em função do agente deflagrador (MORETTI, 2019; ZUQUETTE, 2018).

A liquefação estática é a ocorrência de perda de resistência do solo associada às condições geotécnicas do solo (granulometria, mineralogia, condições hidráulicas, densidade relativa), bem como de efeitos externos, tais como natureza e velocidade do carregamento, sobrecargas e aumento repentino da superfície freática (PENNA *et al.*, 2010; ZUQUETTE, 2018). No caso de barragens, o carregamento também está associado ao método de alteamento da estrutura. A liquefação estática pode ser abordada para situações em condição não drenada que resultam em níveis de poropressão que associado a carregamentos rápidos (excesso de chuvas) e

movimentos de massa gravitacionais em materiais geológicos granulares podem induzir ao estado de liquefação (ZUQUETTE, 2018).

Liquefação dinâmica é o fenômeno resultante de vibrações e poropressão no interior de uma massa de partículas no estado não adensado, em uma intensidade tal que as partículas granulares perdem o contato entre si e passam a comportarem-se como líquidos, com eminente perda de resistência. Portanto, a liquefação dinâmica depende da intensidade das vibrações que induzem deformações diferentes e alterações do grau de compactação do rejeito em contenção (ZUQUETTE, 2018).

A verificação da propensão à liquefação nos solos pode ser realizada pela análise do fator de segurança desenvolvido para este fenômeno, assim como pela avaliação de susceptibilidade e razão de resistência à liquefação desenvolvida pelo solo.

Atualmente, para avaliar a possível ocorrência do fenômeno existem diversas metodologias que utilizam resultados de ensaios triaxiais realizados em laboratório, bem como métodos empíricos que correlacionam a resistência à penetração do solo obtida a partir de ensaios de campo com a resistência não drenada do solo, além de retroanálise de casos de ruptura por liquefação (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018). Alguns destes métodos são as metodologias desenvolvidas por Poulos *et al.* (1985) e Robertson (2010), as quais são abordadas de forma resumida neste trabalho. Além destas, há também a metodologia de Olson (2001) que será abordada de forma mais detalhada, devido a maior frequência de emprego deste método.

- **Metodologia de Poulos *et al.* (1985)**

Poulos *et al.* (1985) desenvolveu uma metodologia para previsão do potencial de liquefação de um solo a partir de resultados de ensaios triaxiais não drenados do tipo CIU, com deformação controlada, assim como estudou alguns comportamentos dos solos sob carregamento cisalhante de grande magnitude.

Baseando-se no comportamento do solo em regime permanente de deformação, os autores avaliaram o comportamento de corpos de prova com diferentes índices de vazios, estabelecendo relação entre os índices de vazios e a tensão efetiva principal menor (σ'_3). O cálculo do fator de segurança (Equação 1), definido por estes autores, foi estabelecido a partir da relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada

no estado permanente (S_{su}), definida de acordo com as Equações 2, 3 e 4, e a tensão de cisalhamento atuante responsável pelo equilíbrio (τ_d , Equação 5).

$$F_L = \frac{S_{su}}{\tau_d} \quad (1)$$

Sendo:

F_L – Fator de segurança;

S_{su} - Resistência ao cisalhamento não drenada no estado permanente;

τ_d - Tensão de cisalhamento responsável pelo equilíbrio estático.

$$S_{su} = q_s \cos \phi_s \quad (2)$$

Sendo:

S_{su} - Resistência ao cisalhamento não drenada no estado permanente;

q_s – Semidiferença das tensões principais no estado permanente (em termos das tensões efetivas);

ϕ_s – Ângulo de atrito no estado permanente (em termos das tensões efetivas).

$$\sin \phi_s = \frac{q_s}{(\sigma'_{3c} - \Delta_{us}) + q_s} \quad (3)$$

Sendo:

ϕ_s – Ângulo de atrito no estado permanente;

q_s – Semidiferença das tensões principais no estado permanente (em termos das tensões efetivas);

σ'_{3c} – Tensão principal menor no início do cisalhamento (em termos das tensões efetivas);

Δ_{us} – Poropressão gerada no estado permanente.

$$q_s = \frac{(\sigma_{1s} - \sigma_{3s})}{2} \quad (4)$$

Sendo:

q_s – Semidiferença das tensões principais no estado permanente;

σ_{1s} e σ_{3s} – Tensões principais no estado permanente.

$$\tau_d = c + \sigma \cdot \tan \Phi \quad (5)$$

Sendo:

τ_d – Tensão de cisalhamento responsável pelo equilíbrio estático;

c – Coesão do solo;

σ – Tensão normal ao plano de cisalhamento;

Φ – Ângulo de atrito.

• Metodologia de Robertson (2010)

A metodologia estabelecida por Robertson (2010) para estudo da susceptibilidade à liquefação elaborou um gráfico tendo os valores de resistência à penetração obtida por ensaios do tipo *Cone Penetration Test* (CPT), corrigidos e normalizados (Equação 6) e a razão de atrito normalizado (Equação 7) como ordenadas e abscissas, respectivamente. Robertson (2010) modificou a definição para o contorno estabelecido para cada tipo de solo (Equação 8), assim como definiu nova forma de cálculo para o expoente “n” utilizado para integrar o comportamento do material na normalização da resistência à penetração (Equação 9).

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (6)$$

Sendo:

Q_{tn} – Normalização do parâmetro Q_t ;

q_t - Resistência corrigida obtida pelo ensaio CPT;

σ_{v0} – Tensão vertical inicial total;

σ'_{v0} – Tensão vertical inicial efetiva;

p_a – Pressão atmosférica;

n – Coeficiente para incorporação do comportamento do material.

$$F_r = \left(\frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

Sendo:

f_s - Atrito lateral no ensaio CPT;

q_t - Resistência corrigida obtida pelo ensaio CPT;

σ_{v0} – Tensão vertical inicial total.

$$I_c = [(3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5} \quad (8)$$

Sendo:

I_c - Índice de classificação do material;

Q_t - Resistência de cone normalizada;

F_r - Razão de atrito normalizada.

$$n = 0,38 (I_c) + 0,05 \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0,15, \text{ para } n \leq 1 \quad (9)$$

Sendo:

n - Coeficiente para incorporação do comportamento do material;

I_c - Contorno definido para cada tipo de solo;

σ'_{v0} - Tensão vertical inicial efetiva;

p_a - Pressão atmosférica.

Para areias siltosas o autor também considerou o fator K_c (Equação 10) na correção da resistência (Equação 11).

$$K_c = 5,581 (I_c)^3 - 0,403 (I_c)^4 - 21,63 (I_c)^2 + 33,75 (I_c) - 17,88, \text{ se } I_c \geq 1,64 \quad (10)$$

$$K_c = 1,0, \text{ se } I_c \leq 1,64$$

Sendo:

K_c - Coeficiente de correção para areias siltosas;

I_c - Contorno definido para cada tipo de solo.

$$Q_{tn,cs} = K_c Q_{tn} \quad (11)$$

Sendo:

$Q_{tn,cs}$ - Correção do parâmetro Q_{tn} para areias siltosas;

K_c - Coeficiente de correção para areias siltosas;

Q_{tn} - Normalização do parâmetro Q_t .

Dessa forma, para divisão entre os solos contráteis e dilatantes, o autor definiu a envoltória de $Q_{tn,csi} = 70$ (Figura 14), assim como definiu a razão de resistência liquefeita (Equação 12) para os casos em que $Q_{tn,cs} \leq 70$.

$$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}} = \frac{[0,02199 - 0,0003124Q_{tn,cs}]}{[1 - 0,02676Q_{tn,cs} + 0,0001783(Q_{tn,cs})^2]} \quad (12)$$

Sendo:

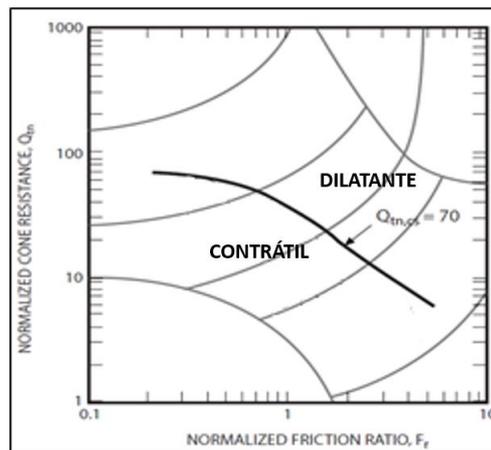
$S_u(LIQ)$ - Resistência Cisalhante Liquefeita;

σ'_{v0} - Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}}$ - Razão de resistência liquefeita;

$Q_{tn,cs}$ - Correção do parâmetro Q_{tn} para areias siltosas.

Figura 14 – Envoltória $Q_{tn,cs}=70$.



Fonte: ROBERTSON (2010), adaptado.

Além da utilização de retroanálise e ensaios de campo, a metodologia desenvolvida por Olson (2001), faz uma abordagem ampla sobre o comportamento do solo, assim como realizou o estudo embasado num extenso número de casos históricos, o que incorpora maior representatividade ao método e redução de suas incertezas (SILVA, 2010).

2.5. MÉTODO DE OLSON (2001)

2.5.1. Definições

A metodologia desenvolvida por Olson é baseada na retroanálise de 33 casos históricos de ruptura por liquefação, na qual se relacionou as razões de tensões verticais com ensaios de campo, do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) e do *Cone Penetration Test* (CPT). A análise realizada por Olson consiste em três etapas principais: (i) análise de suscetibilidade; (ii) análise dos gatilhos; (iii) análise de pós-gatilho.

Na etapa de análise da suscetibilidade é verificado o comportamento do solo sob carregamento cisalhante e as características do material, ou seja, se o material possui comportamento contrátil ou dilatante. No entanto, a classificação do solo como um rejeito suscetível à liquefação não garante que o fenômeno ocorra, para isso é necessária a segunda etapa de análise.

A verificação dos gatilhos da liquefação consiste em avaliar o comportamento do material, quando submetido às combinações de carregamentos. Após confirmar a mobilização do gatilho, faz-se necessária a última etapa de análise, ou seja, a avaliação pós-gatilho do solo. Esta etapa deve ser realizada para verificar se a resistência ao cisalhamento disponível, mesmo após a liquefação, é suficiente para resistir aos carregamentos cisalhantes.

2.5.2. Suscetibilidade à liquefação

As principais características determinantes para o potencial à liquefação do solo a serem analisadas são o estado inicial, o formato dos grãos e a granulometria do solo, bem como as condições de drenagem do mesmo.

2.5.2.1. Estado inicial

Casagrande (1936), observando o comportamento do solo, estabeleceu a linha de estado permanente, dividindo os solos entre materiais de comportamento contrativo e dilatante. Deste modo, tornou possível a definição do chamado “Parâmetro de Estado”, representado pela Equação 13 e ilustrado pela Figura 15, na qual e_0 representa o índice de vazios do solo *in situ* antes do cisalhamento para uma dada tensão confinante efetiva e e_{ep} o índice de vazios para o solo na linha de estado permanente referente à mesma tensão confinante efetiva (SILVA, 2010).

$$\Psi = e_0 - e_{ep} \quad (13)$$

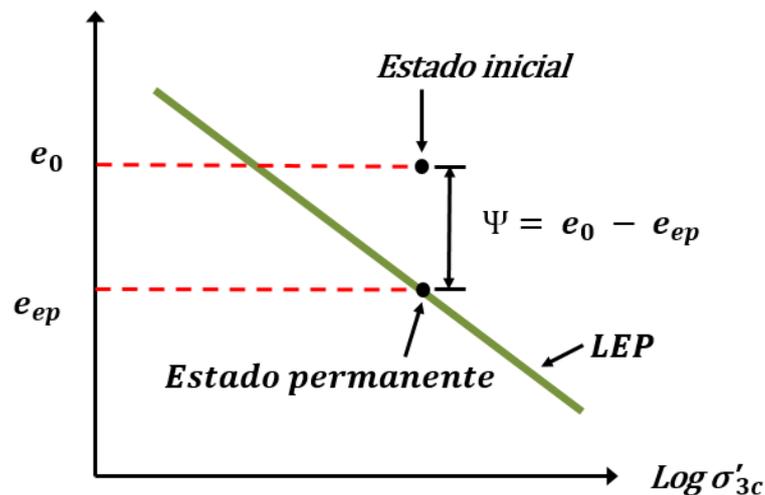
Sendo:

e_0 – índice de vazios do solo *in situ*;

e_{ep} – índice de vazios para o solo na linha de estado permanente, sob mesma tensão confinante efetiva.

O parâmetro de estado define que, para pontos acima da linha de estado permanente, ou seja, valores positivos de Ψ , o solo apresenta condições de suscetibilidade à liquefação e pontos abaixo da linha, valores negativos de Ψ , solos não susceptíveis ao fenômeno (SILVA, 2010).

Figura 15 - Parâmetro de estado



Fonte: SILVA (2010), adaptado.

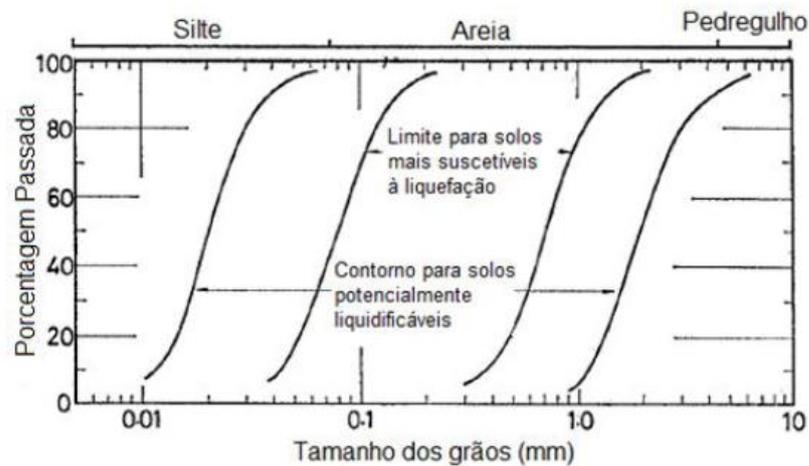
2.5.2.2. Formato dos grãos e granulometria

Outro fator importante para análise do potencial do solo à liquefação é o formato dos grãos e a distribuição granulométrica do solo. Solos com grãos de formato angulares possuem menor tendência à liquefação devido à melhor ligação entre as partículas que resulta em maior resistência ao cisalhamento. Já em relação à granulometria do solo, estudos realizados acerca desta característica chegaram a ter divergências de opinião (FREIRE NETO, 2009).

Inicialmente, admitia-se que a liquefação estava restrita aos solos arenosos, já que o fenômeno se dá devido aos excessos de poropressão e os solos de granulometria fina não seriam capazes de gerar grandes acréscimos de poropressão, devido à sua plasticidade, e os solos mais grossos não conseguiriam manter o acréscimo de poropressão para a ocorrência do fenômeno (SEED *et al.* 2003).

No entanto, estudos realizados por Tsuchida (1970) apresentaram casos de liquefação em outras faixas granulométricas, ilustradas pela Figura 16, sucedidos tanto em laboratório quanto em campo.

Figura 16 - Faixas de distribuição granulométricas suscetíveis à liquefação



Fonte: ISHIHARA *et al.* (1980).

Estudos realizados com base no teor de finos presentes nos solos concluíram que a melhor forma de indicar a propensão do solo à liquefação é pelo índice de plasticidade (IP) do material. Já que a partir deste índice era possível diferenciar se o solo se comportava como uma areia ou como uma argila (IP maior que 7%) e que, portanto, não seriam susceptíveis à liquefação. No entanto, a presença de finos no solo, que podem auxiliar no aumento da resistência ao cisalhamento devido ao aumento de coesão no solo, quando se trata de finos não plásticos podem causar redução da permeabilidade do solo (FREIRE NETO, 2009; NIERWINSKI, 2013).

2.5.2.3. Condições de drenagem

Estudos realizados relatam que, para a ocorrência da liquefação, não há necessidade da saturação do solo, pois a partir do grau de saturação de 80% o solo pode sofrer liquefação dependendo das condições de carregamento ao qual o solo é submetido (FREIRE NETO, 2009).

O carregamento ao qual o solo é submetido, levando-se em conta a velocidade com a qual ele ocorre, define as condições de drenagem no solo, podendo ele ser drenado ou não drenado. Quando a velocidade do carregamento ao qual o solo é submetido é suficientemente baixa, considerando o coeficiente de permeabilidade do mesmo, para que ocorra a dissipação de todo excesso de poropressão gerado pelo carregamento, diz que se tem uma condição de solo drenado, caso contrário o solo sofre um carregamento sob condições não drenadas (FREIRE NETO, 2009).

2.5.2.4. Metodologia para análise da linha de estado permanente

De acordo com Olson (2001) para definição da suscetibilidade do solo à liquefação se faz necessária à compreensão se o solo possui comportamento contrátil ou dilatante, devendo, portanto, ser definida a linha de estado permanente (LEP).

Após verificação com dados de casos históricos de ruptura por liquefação, Olson (2001) recomendou a utilização da envoltória proposta por Fear e Robertson (1995) que correlaciona ensaios de penetração do tipo SPT com a tensão efetiva de pré-ruptura. Para validação do emprego da relação de tensões com ensaios CPT, o autor verificou a conversão da utilização do ensaio SPT para o CPT, proposta por Stark e Olson (1995) utilizando a relação definida pela Equação 14 (SOUZA, 2018; OLSON, 2001).

$$q_c/N_{60} = 0,6 \quad (14)$$

Sendo:

q_c – Resistência de ponta;

N_{60} – Energia de cravação da ordem de 60%.

Para ambas as relações, os valores de resistência à penetração obtidas em campo devem ser corrigidos levando em conta o nível de tensões confinantes. No caso da utilização de ensaios SPT, deve-se considerar também a correção devido à energia de cravação utilizada no ensaio. Para correção dos ensaios SPT, devido à energia de cravação, Seed *et al.* (1985) e Seed e Harder (1990) propuseram a normalização do número de golpes (N) em relação a 60% da energia teórica de queda livre do martelo utilizado no ensaio (ER), dessa forma o número de golpes fica definido pela Equação 15 (SOUZA, 2018; OLSON, 2001).

$$N_{60} = N(ER/60) \quad (15)$$

Sendo:

N_{60} – Energia de cavação da ordem de 60%;

N – Número de golpes;

ER – Percentual de energia utilizada durante o ensaio.

Para os ensaios SPT a correção relativa à tensão vertical efetiva é realizada em aproximadamente 100 kPa, para isso utiliza-se a Equação 16 (SOUZA, 2018; OLSON, 2001).

$$(N_1)_{60} = N_{60} C_N = N_{60} \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (16)$$

Sendo:

$(N_1)_{60}$ – Correção da sobrecarga para ensaios SPT;

N_{60} – Energia de cavação da ordem de 60%;

C_N – Fator de correção da tensão para ensaios SPT;

P_a – Pressão atmosférica;

σ'_{v0} – Tensão vertical inicial efetiva;

n – Coeficiente de C_N , Olson (2001) admitiu o expoente $n=0,5$.

Já para ensaios CPT a correção da resistência de ponta (q_c), inicialmente proposto e abordado por Olson (2001), é realizada utilizando o fato de correção C_q , como mostra a Equação 17 (SOUZA, 2018; OLSON, 2001).

$$q_{c1} = q_c C_q = q_c \frac{1,8}{0,8 + \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)} \quad (17)$$

Sendo:

q_{c1} - Correção da sobrecarga para ensaios CPT;

q_c – Resistência de ponta;

C_q – Fator de correção da tensão para ensaios CPT;

P_a – Pressão atmosférica;

σ'_{v0} – Tensão vertical inicial efetiva.

No entanto, estudos apontam que solos com diferentes compressibilidades podem apresentar distintas resistências à penetração mesmo quando possuem a mesma densidade relativa. Com isso, Olson (2009) recomendou atualização do fator de

correção de resistência de ponta que foi denominado de C_λ definido na Equação 18 (SOUZA, 2018).

$$C_\lambda = 4,15(\lambda_{10,CS_0})^{0,37} \quad (18)$$

Sendo:

C_λ – Fator de correção proposto por Olson (2009), consideração da compressibilidade do solo;

λ_{10,CS_0} - inclinação da linha de estados críticos.

Dessa forma, as relações para definição da LEP para relações com SPT e CPT, respectivamente, ficam denotadas pelas Equações 19 e 20 (SOUZA, 2018; OLSON, 2001).

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 9,5812 \times 10^{-4} [(N_1)_{60}]^{4,7863} \quad (19)$$

Sendo:

$(\sigma'_{vo})_{contorno}$ – Envoltória de separação do comportamento do solo (contrátil e dilatante);

$(N_1)_{60}$ – Correção da sobrecarga para ensaios SPT.

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 1,1047 \times 10^{-2} [(q_{c1})]^{4,7863} \quad (20)$$

Sendo:

$(\sigma'_{vo})_{contorno}$ – Envoltória de separação do comportamento do solo (contrátil e dilatante);

q_{c1} - Correção da sobrecarga para ensaios CPT

2.5.3. Gatilhos para liquefação

2.5.3.1. Introdução

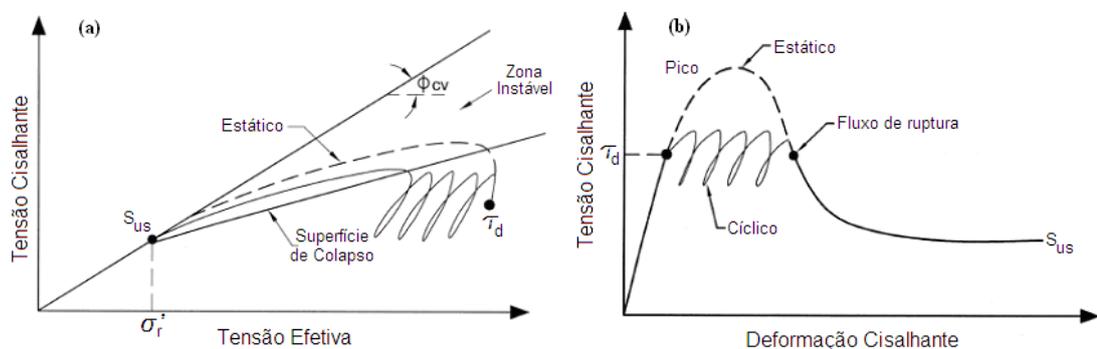
A verificação do desencadeamento ou gatilho de liquefação pode ser feita considerando a atuação de carregamentos estáticos e cíclicos sobre o rejeito. No

entanto, neste trabalho será dado um foco maior aos carregamentos estáticos, já que o Brasil não está em região com situações sísmicas relevantes.

A observação do comportamento da deformação e tensão efetiva de um solo solicitado, tanto por um carregamento estático, quanto por um carregamento cíclico, são ilustrados pela Figura 17. A trajetória de tensões efetivas (Figura 17.a) indica que, para um carregamento estático, após atingir a superfície de colapso, o solo entra na área de zona instável, na qual se tem a perda de resistência do solo devido aos acréscimos de poropressão até que atinja a condição de estado permanente (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

A partir do comportamento da deformação (Figura 17.b), demonstrado para o carregamento estático, é possível perceber que para a ocorrência da liquefação é necessária que a tensão gerada pelos carregamentos solicitantes ultrapassem a máxima resistência ao cisalhamento mobilizada pelo solo, conhecida como resistência de pico do solo (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

Figura 17 - Comportamento de um solo sofrendo liquefação, devido carregamento estático ou cíclico.



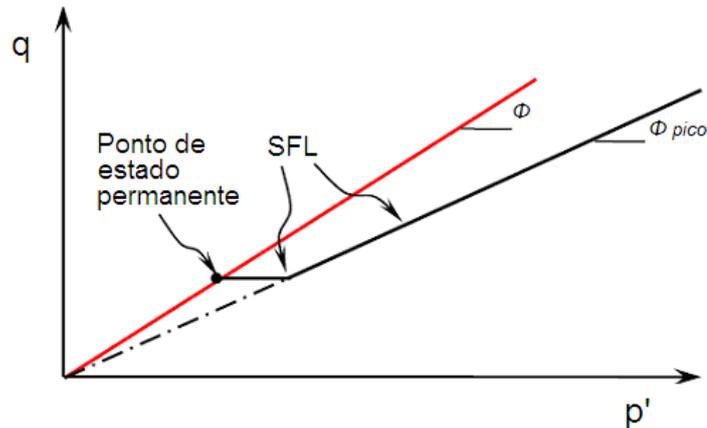
Fonte: FREIRE NETO (2009)

Estudos realizados nos quais foram feitas medições das resistências de pico desenvolvidas sobre solicitações cisalhantes, por areias contráteis, saturadas e com mesmo índice de vazios, demonstraram que estas resistências definem uma envoltória de comportamento praticamente linear, que ficou definida por Vaid e Chern (1983) como superfície de fluxo por liquefação (SFL), a qual define o limite da região em que os solos não teriam ruptura por liquefação (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

Para o desenvolvimento da liquefação é necessário que a tensão cisalhante seja maior que a resistência de estado permanente. A definição da superfície de fluxo por liquefação determinou que a trajetória linear definida pelas resistências ao

cisalhamento de pico fosse interrompida por uma linha horizontal a partir do ponto de estado permanente, representado na Figura 18 (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

Figura 18 - Superfícies de fluxo por liquefação.



Fonte: FREIRE NETO (2009), adaptado.

Olson (2001), nomeando a superfície de fluxo por liquefação de envoltória de resistência de pico, para determinação da inclinação da envoltória de resistência de pico (Φ_p) determinou o conceito de razão de resistência de pico. Esta razão é definida pela Equação 21 na qual é feita a normalização da resistência ao cisalhamento de pico $S_u(Pico)$ com a tensão vertical pré-ruptura σ'_{vo} (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

$$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{vo}} \approx \tan \Phi_p \quad (21)$$

Sendo:

$S_u(Pico)$ - Resistência ao cisalhamento de pico;

σ'_{vo} - Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{vo}}$ - Razão de resistência de pico;

Φ_p - inclinação da envoltória de resistência de pico.

Sendo que a razão de resistência de pico definida por correlação com ensaios de resistência a penetração de SPT e CPT ficaram definidas como mostram as Equações 22 e 23.

$$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0075[(N_1)_{60}] \pm 0,04 \quad \text{para} [(N_1)_{60}] \leq 12 \quad (22)$$

Sendo:

$S_u(Pico)$ - Resistência ao cisalhamento de pico;

σ'_{v0} - Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{v0}}$ - Razão de resistência de pico;

$(N_1)_{60}$ - Correção da sobrecarga para ensaios SPT.

$$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0143[(q_{c1})] \pm 0,04 \quad \text{para} [(q_{c1})] \leq 6,5 \text{ MPa} \quad (23)$$

Sendo:

$S_u(Pico)$ - Resistência ao cisalhamento de pico;

σ'_{v0} - Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{v0}}$ - Razão de resistência de pico;

q_{c1} - Correção da sobrecarga para ensaios CPT.

2.5.3.2. Metodologia para verificação de gatilhos

A verificação dos gatilhos, ou seja, se os carregamentos atuantes (estáticos, sísmicos e cisalhantes) excedem a resistência ao cisalhamento do solo, segundo Olson (2001) seguem os seguintes procedimentos:

1. Análise da estabilidade pré-ruptura do talude para estimativa das tensões cisalhantes estáticas ($\tau_{estática}$) para os solos de comportamento contrátil. A análise de um único valor de resistência ao cisalhamento é assumida para verificação inicial, sendo modificado até que o fator de segurança (FS) igual a um (1) seja alcançado. A verificação da estabilidade deve ser realizada considerando superfícies de falha circulares e superfícies de falha não circulares. Aos solos, não suscetíveis a liquefação, são atribuídos valores de resistência ao cisalhamento drenada ou não-drenada.
2. Divisão das superfícies de falha em segmentos que, segundo Olson (2001), um conjunto de dez a quinze segmentos levará a resultados satisfatórios. A partir da

divisão realizada é feita a média ponderada das tensões efetivas atuante em cada fatia (Equação 24) para estimativa da tensão efetiva média $\sigma'_{vo(média)}$.

$$\sigma'_{vo(média)} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_{vi} x L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (24)$$

Sendo:

$\sigma'_{vo(média)}$ – Tensão efetiva média de cada segmento;

L_i - Comprimento do segmento i ;

σ'_{vi} - Tensão vertical efetiva atuante na superfície de ruptura crítica do segmento i ;

n – Número de segmentos.

3. Em caso de carregamentos sísmicos ou outros tipos de carregamentos, devem ser estimadas também as tensões de cisalhamento correspondentes a atuação sísmica ($\tau_{sísmica}$) e aos outros carregamentos (τ_{outra}) utilizando as análises apropriadas.
4. Determinar a razão de resistência de pico a partir das Equações 22 e 23. O nível de conservadorismo desejado para o cálculo é estabelecido adotando valores de resistência à penetração ou de razões de resistência de pico maiores ou menores do que os valores médios estabelecidos.
5. Calcular os valores de $S_u(Pico)$ para cada fatia, multiplicando a razão de resistência de pico pela tensão vertical efetiva σ'_{vo} .
6. Para definição do desencadeamento dos gatilhos para liquefação em cada segmento é calculado um fator de segurança definido pela Equação 25.

$$FS_{gatilho} = \frac{S_u(Pico)}{\tau_{estática} + \tau_{sísmica} + \tau_{outra}} \quad (25)$$

Sendo:

$FS_{gatilho}$ – Fator de segurança referente aos gatilhos da liquefação;

$S_u(Pico)$ - Resistência ao cisalhamento de pico;

$\tau_{estática}$ – Tensões de cisalhamento de natureza estática;

$\tau_{sísmica}$ – Tensões de cisalhamento de natureza sísmica;

τ_{outra} – Tensões de cisalhamento de outras naturezas.

Segmentos que apresentarem Fator de Segurança (FS) calculado igual ou maior que 1 indicam solos improváveis de se liquefazer, cuja análise pós-gatilho não é necessária. Para estes segmentos a resistência ao cisalhamento é utilizada para análise de estabilidade pós-gatilho. Já para segmentos em que o FS obtido inferior a 1 deve-se realizar a verificação estabilidade pós-gatilho. Olson (2001) recomenda a análise de superfícies circulares e não circulares, já que ambas podem apresentar superfícies distintas em profundidade e localização.

2.5.4. Pós-Gatilho

2.5.4.1. Introdução

A avaliação do comportamento do solo após ocorrência da liquefação demonstrou que, após a ocorrência do fenômeno, muitas areias apresentam resistência residual mobilizadas para grandes deformações.

Portanto, a partir do momento que é verificado o desencadeamento da liquefação é necessário avaliar a estabilidade pós-gatilho do material. Para isso é considerada a normalização da resistência cisalhante liquefeita pela tensão vertical efetiva pré-ruptura, a qual ficou conhecida como Razão de Resistência Liquefeita $S_u(LIQ)$ (FREIRE NETO, 2009; SILVA, 2010; SOUZA, 2018).

2.5.4.2. Metodologia para análise pós-gatilho

Para a determinação da Razão de Resistência Liquefeita, a partir de retroanálise de casos de ruptura por liquefação, Olson (2001) definiu as linhas de tendência de correlação com ensaios de campo do tipo SPT e CPT, demonstradas pelas Equações 26 e 27.

$$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}} = 0,03 + 0,0075[(N_1)_{60}] \pm 0,03 \quad \text{para}[(N_1)_{60}] \leq 12 \quad (26)$$

Sendo:

$S_u(LIQ)$ - Resistência Cisalhante Liquefeita;

σ'_{v0} – Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}}$ – Razão de resistência liquefeita;

$(N_1)_{60}$ – Correção da sobrecarga para ensaios SPT.

$$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}} = 0,03 + 0,0143[(q_{c1})] \pm 0,03 \quad \text{para } [(q_{c1})] \leq 6,5 \text{ MPa} \quad (27)$$

Sendo:

$S_u(LIQ)$ - Resistência Cisalhante Liquefeita;

σ'_{v0} - Tensão vertical inicial efetiva;

$\frac{S_u(LIQ)}{\sigma'_{v0}}$ - Razão de resistência liquefeita;

q_{c1} - Correção da sobrecarga para ensaios CPT.

Para cada segmento que deve ser verificado, a partir da multiplicação das Razões de Resistência Liquefeita (calculadas pelas Equações 26 e 27) pela tensão efetiva obtêm-se o valor de $S_u(LIQ)$ correspondente, a partir do qual é calculado o Fator de Segurança pós-gatilho ($FS_{pós-gatilho}$), apresentado na Equação 28.

$$FS_{pós-gatilho} = \frac{S_u(LIQ)}{\tau_{estática} + \tau_{sismica} + \tau_{outra}} \quad (28)$$

Sendo:

$FS_{pós-gatilho}$ - Fator de segurança pós-gatilho da liquefação;

$S_u(LIQ)$ - Resistência Cisalhante Liquefeita;

$\tau_{estática}$ - Tensões de cisalhamento de natureza estática;

$\tau_{sismica}$ - Tensões de cisalhamento de natureza sísmica;

τ_{outra} - Tensões de cisalhamento de outras naturezas.

Na análise pós-gatilho é considerado que para $FS_{pós-gatilho} \leq 1$ é prevista a ocorrência da liquefação. Já em casos em que os valores $FS_{pós-gatilho}$ se encontram entre 1 e 1,1 denota a ocorrência de alguma deformação, sendo necessária a reavaliação da estabilidade destas fatias considerando a possibilidade de desenvolvimento de ruptura progressiva do talude. Estas reavaliações são consideradas para segmentos cujo valor do $FS_{gatilho}$ esteja entre 1 e 1,1. Desta forma, são redefinidos e atribuídos novos valores de resistência ao cisalhamento liquefeita para estas fatias, sendo realizadas de forma interativa obtendo um FS final. Considerando que o $FS_{pós-gatilho}$ mínimo corresponde à simulação de ruptura progressiva da massa de solo.

3. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

3.1. CONCLUSÕES

A notória participação do setor minerário na economia brasileira faz com que as atividades de mineração sejam imprescindíveis, no entanto a geração de rejeitos decorrente da mesma torna-se inevitável. Desta forma, as barragens, que são um método de descarte muito empregado para a disposição dos rejeitos gerados no processamento dos minerais, devem ser constantemente monitoradas durante todo o processo de alteamento e ainda após o período de sua utilização, para garantir a segurança, considerando os relevantes impactos sociais, ambientais e econômicos que a ruptura destas estruturas podem vir a causar.

Com esta finalidade, nos últimos anos, em decorrência da melhoria dos conhecimentos técnicos acerca do comportamento do solo sob carregamento cisalhante e também das rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil, várias modificações nas legislações acerca da segurança de barragens foram promovidas. Estas alterações dos parâmetros legais, assim como novas exigências e proibições, têm tido como objetivo principal a garantia de informação e segurança da população. Neste estudo, foram compiladas as determinações legais, de âmbito federal, para segurança de barragens. No entanto, para que estas alterações tenham efeito significativo é necessário que haja um trabalho em conjunto entre a população, especialistas da área, agente fiscalizador e empreendedor, visando o bem social, ambiental e econômico.

Além disso, a importância e complexidade do comportamento da liquefação têm demandado cada vez mais estudos com a finalidade de avaliar seu comportamento nas barragens de rejeito de forma a garantir a segurança destas estruturas. Atualmente para análise da suscetibilidade das barragens à liquefação existem algumas metodologias que fazem uso de diferentes mecanismos para cálculo. No entanto metodologias que fazem o uso de correlação a partir de ensaios triaxiais não drenados, como Poulos *et. al* (1985), geralmente são menos utilizados dada a necessidade de corpos de prova de alta qualidade, além da necessidade das várias correções de seus parâmetros dada a diferença do comportamento do solo no laboratório em relação ao seu comportamento *in situ*. Desta forma, metodologias que

utilizam a correlação com ensaios de campo do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) ou o *Cone Penetration Test* (CPT), obtendo dados a partir de retroanálise de casos de ruptura, têm sido mais utilizadas pelo corpo técnico. A metodologia desenvolvida por Olson (2001), além da utilização da retroanálise de casos históricos de ruptura por liquefação e ensaios de campo do tipo SPT e CPT, englobou a análise de um extenso número de casos históricos o que agrega maior nível de confiabilidade ao método, tornando-se, portanto, a opção mais utilizada pelo campo técnico.

Este trabalho de conclusão de curso buscou contribuir para os estudos já existentes na busca de soluções e alternativas na garantia da segurança das barragens, sendo esta uma temática de importância crescente na engenharia geotécnica brasileira, sendo feita a avaliação de algumas metodologias para análise da liquefação estática, entre estas a metodologia de Olson (2001).

O estudo realizado teve limitações devido à dificuldade de se obter dados de ensaios em mineradoras para simulação da aplicabilidade do método. No entanto, a análise feita a partir de bibliografias existentes tornou possível visualizar que, embora a metodologia de Olson (2001) tenha grande representatividade e seja considerada promissora para este tipo de análise, ainda precisa de aprimoramentos englobando cada vez mais o comportamento e especificidade de cada solo quando submetido à esforços cisalhantes, reduzindo suas incertezas e, conseqüentemente, aumentando a confiabilidade de sua análise.

3.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir ficam listados alguns temas como sugestão para pesquisas futuras e aprimoramento das técnicas aplicadas à segurança da barragem, considerando a ruptura por liquefação.

- ✓ Retroanálise de número considerável de casos de ruptura por liquefação utilizando o método de Olson (2001) incorporando o coeficiente C_λ sugerido em Olson (2009), para título de comparação e avaliação do impacto gerado pelo coeficiente.
- ✓ Avaliação do impacto dos parâmetros considerados no comportamento de cisalhamento do solo, ainda não considerados na análise do potencial de liquefação do solo.

- ✓ Estudo sobre efetividade da fiscalização e regularidade das barragens de acordo com as legislações implementadas nos últimos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADILSON, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Resolução n.º 32**, de 11 de maio de 2020. Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências. Brasília, DF, 2020. 4 p.

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. **Análise do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. 2004. Tese (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2004.

ARAÚJO, C.B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. Tese (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ÁVILA, J.P.; SAWAYA, M. As barragens de rejeitos na Brasil: sua evolução nos últimos anos. In: Comitê Brasileiro de Barragens. **A história das barragens no Brasil Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

AZAM, S.; Li, Q. Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, 28(4), p. 50-54, 2010.

BRASIL. **Lei n.º 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Lei n.º 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF, 2020.

CARDOZO, F.A.C.; CORDOVA, D.P.; ZINGANO, A.C.; GALLI, B.; PENÃ, F.P. Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito: Crítica ao Método de Montante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Rio Grande do Sul, 2016. p. 48.

CARDOZO, F.A.C.; PIMENTA, M.M.; ZINGANO, A.C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. **HOLOS**, Rio Grande do Sul, v. 8, p. 77-85. 2016.

CASTRO, G. **Liquefaction of sands**. 1969. Thesis (Doctor of Philosophy in the subject of Engineering) – Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, 1969.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução n.º 143**, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2012. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 416**, de 03 de setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 70.389**, de 17 de janeiro de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, DF, 2017.

DUARTE, A.P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio-ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2008.

ESPÓSITO, T.J.; ASSIS, A.P. Método Probabilístico Acoplado ao Método Observacional Aplicados a Barragens de Rejeito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999, São José dos Campos. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 1999. p. 187-194.

FREIRE NETO, J.P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais: ano 2017**. Belo Horizonte: FEAM, 2018. 40 p.

HAZEN, A. **Hydraulic-fill dams**. American Society of Civil Engineers, 1920, vol. 46, p. 109.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia Mineral do Estado de Minas Gerais**. IBRAM, 2014. slide.

ISHIHARA, K.; TRONCOSO, J.; KAWASE, Y.; TAKAHASHI, Y. Cyclic Strength Characteristics of Tailings Materials. **Soils and Foundations**, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, V. 20, No 4 , December 1980, p 127-141.

LOZANO, F.A.E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2006.

MILANEZ, B. Rompimento de barragem de rejeitos em Mariana (MG) é o maior acidente ambiental da História do Brasil. **Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)**. 2015. Disponível em: <http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=213>. Acesso em 10 ago. 2019.

MORETTI, M.R. Liquefação de rejeitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9.; CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS - REGEO & GEOSSINTÉTICOS, 8., 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: ABMS, 2019.

NIERWINSKI, H.P. **Potencial de liquefação de resíduos de mineração estimado através de ensaios de campo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

OLSON, S.M. **Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2001.

PENNA, L.R.; OLIVEIRA FILHO, W.L.; ARAÚJO, L.G.; ALMEIDA, F.E. Liquefação estática em depósitos de rejeitos de mineração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA: ENGENHARIA GEOTÉCNICA PARA O DESENVOLVIMENTO, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 15., 2010, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABMS, 2010.

PEREIRA, E.L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2005.

PEREIRA, L.F.; CRUZ, G.B.; GUIMARÃES, R.M.F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 04 n. 02. p 122-129, 2019.

POULOS, S.J.; CASTRO, G.; FRANCE, J.W. Liquefaction evaluation procedure. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 111, n. 6, 772-792, 1985.

ROBERTSON, P.K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, p. 842-863, 2010.

ROMPIMENTO de barragem em Brumadinho, 2020. Imagem de satélite. Brumadinho. Disponível em : https://pt.wikipedia.org/wiki/Rompimento_de_barragem_em_Brumadinho. Acesso em: 07 de jan. 2021.

ROMPIMENTO de barragem em Mariana: perguntas e respostas, 2015. Imagem em movimento. Publicado pelo canal G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/11/rompimento-de-barragens-em-mariana-perguntas-e-respostas.html>. Acesso em: 07 jan. 2021.

SEED, R.B.; CETIN, K.O.; MOSS, R.E.S.; KAMMERER, A.M.; WU, J.; PESTANA, J.M.; RIEMER, F.M.; SANCIO, R.B.; BRAY, J.D.; KAYEN, R.E.; FARIS, A. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In: ANNUAL ASCE LOS ANGELES GEOTECHNICAL SPRING SEMINAR, 26., 2003, Long Beach. **Framework [...]**. Long Beach: University of California, 2003.

SILVA, W.P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada pela montante pelo método de Olson (2001)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2010.

SOUZA, T.C. **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2018.

TERZAGHI, K. **Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage**. Leipzig u. Wien, F. Deuticke, 1925, p. 399.

TSUCHIDA, H. **Prediction and Counter Measure against the Liquefaction in Sands Deposits**. Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Ministry of Transport, p 3.1 – 3.33, 1970.

VICK, S.G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams**. New York: Wiley Interscience, 1983.

SRISKANDAKUMAR, S. **Cyclic loading response of Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests**. 2004. Thesis (Master of Applied Science) - Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 2004.

ZUQUETTE, L.V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos: Fontes de Eventos Perigosos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. v.