

# PIPING E LIQUEFAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA: DESAFIOS PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

PIPING AND LIQUEFACTION IN EARTH DAMS: CHALLENGES FOR DAM SAFETY

FELIPE ALVES FERNANDES GARCIA

*Engenheiro Geotécnico, Fundação Instituto de Pesquisas Tecnológicas – FIPT felipe.fernandesgarcia@gmail.com*

## RESUMO ABSTRACT

Um dos grandes projetos de engenharia é a concepção de uma barragem. Isto se dá por conta do envolvimento de profissionais de diferentes especialidades, destacando geólogos e engenheiros geotécnicos. Por serem obras de grande volume de movimentação de terra e risco, muitos cuidados devem ser tomados para garantir a estabilidade da estrutura, principalmente em relação ao piping e liquefação do solo. Como observado na literatura mundial e em eventos recentes no Brasil, estes dois fenômenos têm causado colapsos de diversas estruturas de barragem, devendo, portanto, ser analisadas suas causas e gatilhos para ocorrência. É nesta perspectiva que a presente pesquisa se baseia, no estudo de colapso de barragens por meio dos fenômenos de piping e liquefação do solo. Como objetivos têm-se o entendimento de como ocorre tais eventos, analisando os seus gatilhos, além de detalhar fatores que aumentam a segurança contra os mesmos, destacando o sistema de drenagem interno, compactação do aterro e tratamento de fundações. A pesquisa é do tipo bibliográfica e inicialmente são apresentados os tipos de barragens, investigação geotécnica, instrumentação e fatores que influenciam na escolha do barramento. Em seguida é abordado sobre os fenômenos de piping e liquefação, destacando seus gatilhos para ocorrência e casos históricos reportados na literatura técnica. Por fim, são detalhados controles de fluxo de barragens, aprofundado em compactação do aterro, sistema de drenagem e tratamento de fundação. Após a apresentação de todos os pontos supracitados, conclui-se que a segurança de uma barragem de terra é baseada em um conjunto de fatores que vem desde a análise do local do empreendimento, destacando características do solo e tipo da barragem, até o estudo do dimensionamento de sistema interno de drenagem aliada a um bom controle

The design of a dam is a challenge task as many aspects must be considered and it involves different professionals, mainly geologists and geotechnical engineers. Large earth volumes are needed for dam's construction and large reservoirs are involved. Great care must be taken to ensure the dam's stability and to minimize the risks of a failure. As observed in the world literature and in recent events in Brazil, these piping and soil liquefaction have caused collapses of several dam structures and, therefore, their causes and triggers for their occurrence should be analyzed. The objective of this work is to present a review on the mechanics of these phenomena, their triggers and to point out preventive measures against these events, in the study of the collapse of dams through the phenomena of piping and soil liquefaction. The objectives are to understand how such events occur, analyzing their triggers, in addition to detailing factors that increase security against them, highlighting the internal drainage system, landfill compaction and foundation treatment. The research is of the bibliographic type and will present the types of dams, geotechnical investigations, instrumentation and factors that influence the choice of the dam are presented. Then, it is approached about the phenomena of piping and liquefaction, highlighting their triggers for their occurrence and historical cases reported in the technical literature. Finally, dam flow controls are detailed, in-depth in landfill compaction, drainage system and foundation treatment. After presenting all the aforementioned points, it is concluded that the safety of an earth dam is based on a set of factors that comes from the analysis of the site of the project, highlighting soil characteristics and type of the dam, to the study of the design of internal drainage

tecnológico de compactação e tratamento de fundação quando necessário.

**Palavras-chave** - piping, liquefação do solo, barragem de terra, sistema interno de drenagem, fluxo de barragem.

system combined with good technological control of compaction and foundation treatment when necessary.

**Keywords** - piping, internal erosion, soil liquefaction, earth dam, internal drainage system, seepage.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se observado uma atenção maior para as estruturas de barragens no Brasil, não apenas devido aos recentes incidentes envolvendo ruptura de barramentos no estado de Minas Gerais, mas também à inserção de critérios mais rigorosos quanto à execução de barragens por parte dos órgãos responsáveis.

As graves consequências, não apenas econômicas, mas sociais como perda de vida humana e ambientais, acenderam um alerta sobre a segurança de barragens contra fenômenos que levam a ruptura como a erosão interna regressiva, a qual será denominada piping neste trabalho, por ser o termo corrente na engenharia geotécnica e a liquefação do solo. Tal conjuntura levou órgãos responsáveis por criar diretrizes de segurança a estabelecerem critérios mais rigorosos em projeto de barragens no país.

Resultado disto é o mercado geotécnico estar aquecido e com diversas demandas, em busca de profissionais qualificados que atuem nesta área para aumentar o suporte técnico em projetos e monitoramento de estruturas de barragens. Neste âmbito, torna-se fundamental estudar e analisar de forma aprofundada não somente os acidentes mais recentes, mas, o histórico de rupturas de barragens a fim de desenvolver tecnologias e critérios de projeto que tenham como foco maior segurança para os barramentos.

Massad (2010) cita que acidentes envolvendo rupturas de barragens é uma forma de tirar lições para novos projetos, como foram os casos das barragens de Fort Peck, Malpasset e Teton, que trouxeram ensinamentos que mudaram os rumos de projetos e execução de barragens contendo mais segurança contra o piping.

Souza (2017) também destaca sobre os aprendizados que devem ser absorvidos devido a rupturas envolvendo barragens, destacando o estudo

aprofundado sobre a geologia local, para que futuros projetos tenham maior segurança contra tais rupturas. No entanto, apesar de haver diversos estudos referentes aos desastres envolvendo barragens, ainda é observado, não apenas no Brasil, rupturas em que o problema observado foi falhas em projetos.

Massad (2010) inclusive cita uma publicação do ICOLD (Internacional Committee on Large Dams) de 1973, que de 236 rupturas de barragens, 32% foi devido a falhas de projeto, o que é um alerta sobre um maior entendimento acerca dos gatilhos que levam ao colapso de estruturas de barramento.

Em diversos estados do Brasil a construção de barragens tem uma grande importância para a economia e desenvolvimento humano. Mas, como apresentado, colapsos recentes de estruturas de barramento fizeram acender um alerta quanto aos critérios de projeto e implantação atrelados à segurança das mesmas.

É nessa perspectiva que se embasa o presente trabalho. Visto que, o desenvolvimento de pesquisas traz materiais que podem ser utilizados e consultados no meio profissional para o aperfeiçoamento de projetos geotécnicos mais seguros no que tange às barragens de terra e maior entendimento quanto às ações voltadas para aumentar a segurança contra piping e liquefação.

O objetivo deste artigo é analisar como ocorre o piping e liquefação do solo que resultam em ruptura de barragens, a fim de entender quais são os gatilhos para sua ocorrência e os procedimentos que podem ser inseridos em um projeto executivo para mitigar as possibilidades de ocorrência e aumentar a segurança contra ruptura devido a estes fenômenos em estudo.

## 2. METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos citados, sistematizadas as informações a respeito da temática segurança de barragem de terra contra os fenômenos de piping e liquefação do solo, foi abordado a condição de compactação do barramento, a drenagem interna e posteriormente as relações de partículas que compõem o barramento e os filtros para que haja harmonia no sistema. Por último é apresentado os métodos numéricos para dimensionamento dos filtros vertical e horizontal a ser implantado no barramento.

### 2.1 Tipo da pesquisa

A pesquisa é do tipo bibliográfica, de forma que para obter as informações supracitadas foi lançado mão de pesquisas principalmente a nível de mestrado, as quais apresentavam estudos de caso de obras, possibilitando obter informações detalhadas acerca da temática proposta na presente pesquisa.

## 3. RUPTURAS DE BARRAGENS DEVIDO À LIQUEFAÇÃO

Nas últimas décadas tem-se dado uma atenção maior ao fenômeno de ruptura de barragens devido à liquefação do solo, muito devido aos diversos colapsos advindos deste fenômeno. Assim, neste item serão citados alguns casos históricos onde a ruptura ocorreu devido ao fenômeno em estudo. Mas, antes de elencar tais casos, vale fazer uma apresentação dos tipos de alteamento de barramento.

Em primeiro lugar cabe mencionar que a principal diferença entre uma barragem convencional (para reservação de grandes volumes de água) e uma barragem para contenção de rejeito se dá no talude de montante, que no caso da barragem para acúmulo de rejeitos tende a possuir um espaldar mais abatido, visto que não irá sofrer variações de tensões devido o rebaixamento do lençol freático. Na Figura 1 é apresentado um modelo deste tipo de barramento.

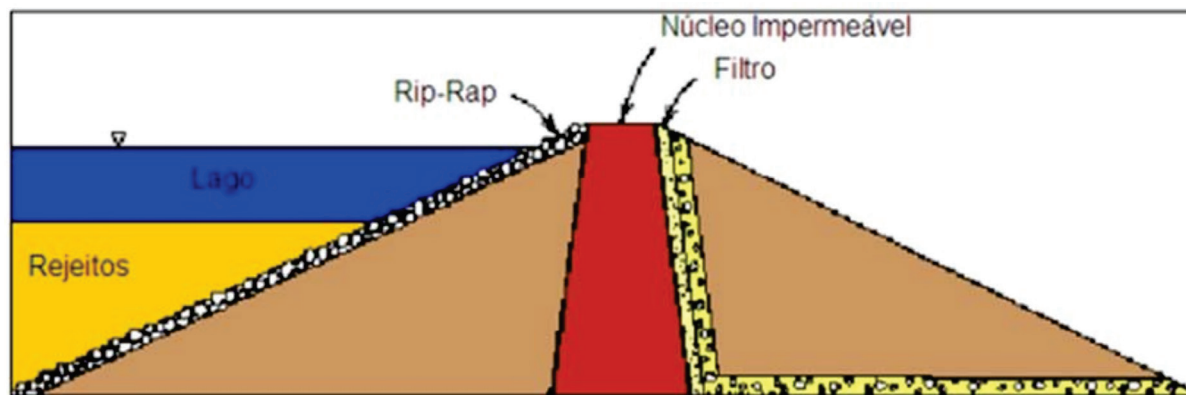


Figura 1 - Barragem convencional para rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009).

Outro tipo de barragem para contenção de rejeitos é a com alteamentos sucessivos. Neste modelo, se enquadram 3 diferentes sistemas denominados como: alteamento a montante, a jusante e a linha de centro.

O primeiro caso, mais comum de ser executado, possui como execução, de acordo com Freire Neto (2009), a concepção de um dique de partida

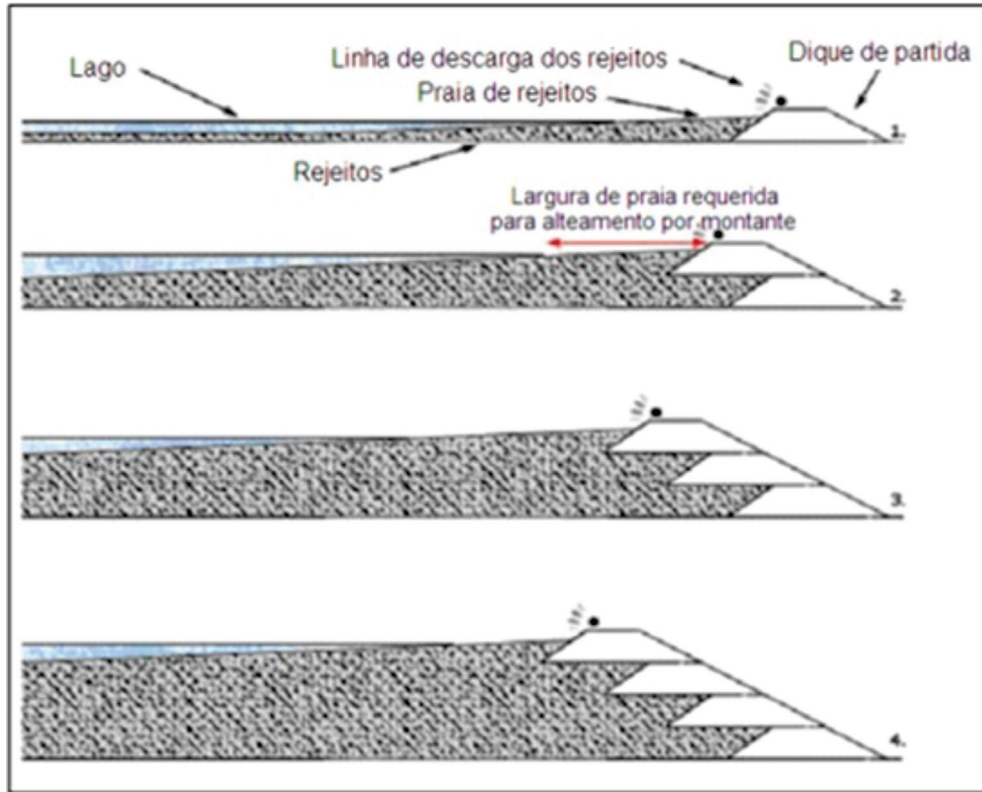
o qual se constitui por um aterro compactado ou enrocamento.

Mesmo sendo o método mais comum de ser executado, é o que apresenta maior instabilidade quanto a ruptura por liquefação. Isto se dá por conta do método resultar em um modelo de barragem em que os alteamentos sucessivos não possuem um sistema de drenagem interno conectado

e o rejeito lançado para ser contido servirá como fundação de outro alteamento.

Davies et al. (2000), apud Freire Neto (2009) inclusive citam que após estudos analisarem cer-

ca de três mil e quinhentas barragens de rejeito, aproximadamente metade foram executadas por meio desta técnica. Na Figura 2 é ilustrado o modelo deste tipo de alteamento.

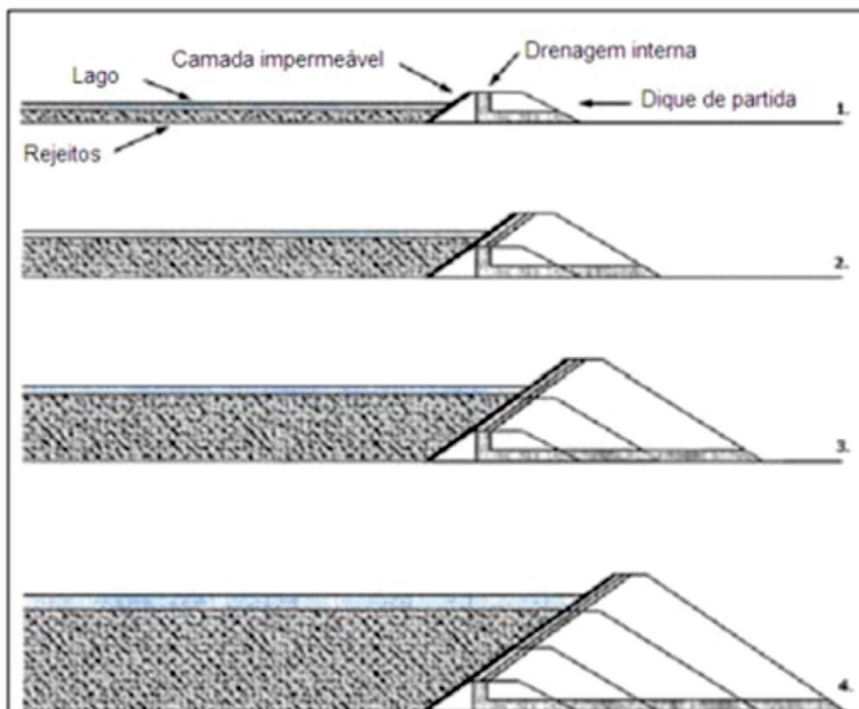


**Figura 2** - Alteamento a montante de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009)

O segundo método construtivo de barragem de rejeito é pelo método de alteamento à jusante. Este método se difere do primeiro principalmente por conta do volume de aterro que deve ser inserido para execução, o qual é bem superior ao primeiro método, o que necessita de mais jazidas e área para construção. Outro fator que os diferencia é que o sistema de drenagem é interligado entre os sucessivos alteamentos.

Além destes pontos, Freire Neto (2009) destaca que a grande vantagem desta metodologia executiva é que nela a estabilidade é maior pois cada alteamento é estruturalmente independente dos novos lançamentos. Na Figura 3 é apresentado este modelo de execução.

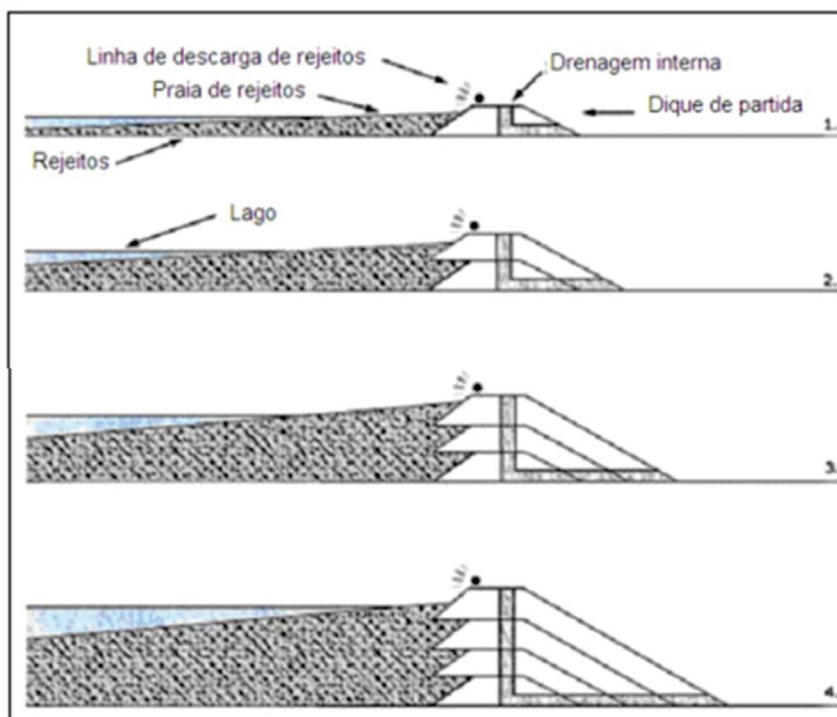




**Figura 3** - Alteamento a jusante de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009).

Por fim, o método de alteamento a linha de centro é considerado um meio termo entre os dois anteriores, visto que apresenta maior estabilidade que o método a montante, mas não precisa de

um volume de material considerável em comparação com o método de alteamento a jusante. Uma representação desta metodologia é ilustrada na Figura 4.



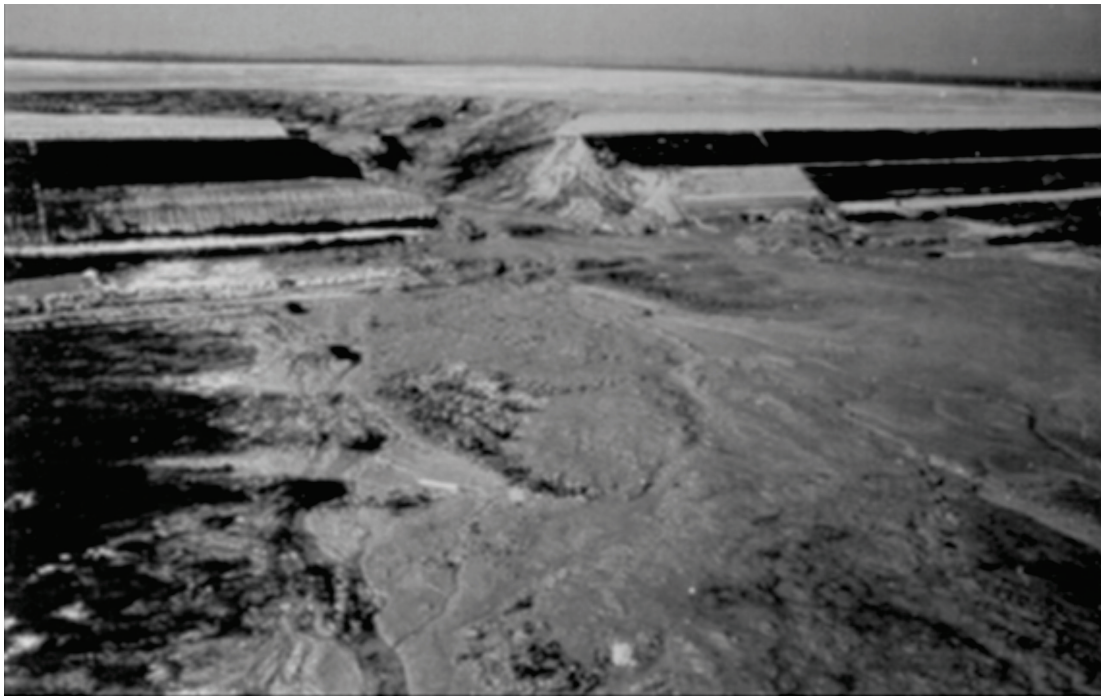
**Figura 4** - Alteamento a linha de centro de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009)

Quanto à ruptura de barragens devido a liquefação do solo, a seguir serão citados casos históricos que foram reportados por Freire Neto (2009) os quais foram retirados de Davies et al. (2002).

O primeiro caso é o da Mina de Harmony, localizada na África do sul, em que nesse contexto o barramento foi construído pelo método de montante, o qual possuía diversas baías de rejeito e que além destas características, apresentava uma

pequena borda livre e o material era composto essencialmente por areia bem graduada com finos na ordem de 60%.

A ruptura se deu no dia 22 de fevereiro de 1994, quando uma chuva causou o galgamento da estrutura e, devido apresentar uma alta inclinação no talude de jusante, de 1V:2H, ocasionou processos erosivos os quais levaram ao gatilho da liquefação do material. A Figura 5 ilustra tal barragem colapsada.



**Figura 5** - Ruptura por liquefação da barragem da Mina de Harmony (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Outro caso de colapso devido à liquefação do solo foi a barragem de rejeito da mina de Sullivan, localizada no Canadá. O processo de ruptura deste barramento se deu através do excesso de tensões cisalhantes aplicadas nos rejeitos de funda-

ção, o qual era composto por rejeitos. Mas, nesta situação, maiores consequências não ocorreram devido a outros diques terem contido o movimento do solo. A Figura 6 apresenta este colapso.



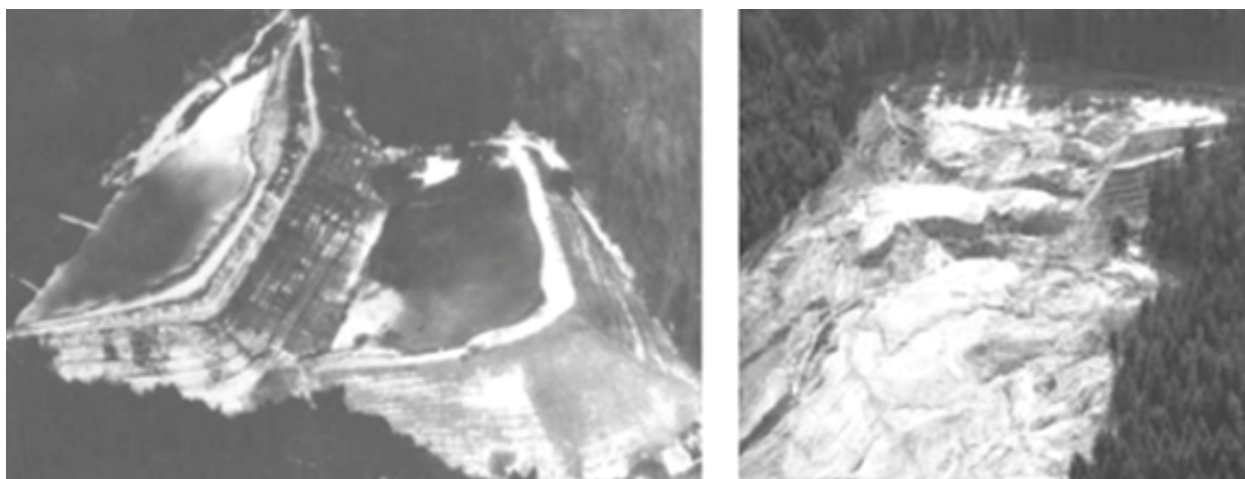
**Figura 6** - Ruptura por liquefação da barragem de Sullivan (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Um caso trágico que levou à morte de 268 pessoas foi a ruptura da barragem de rejeito da mina de Stava, localizada na Itália. Este é considerado como um dos maiores acidentes de colapso de barragem de rejeitos e aconteceu no dia 19 de julho de 1985.

Neste caso, a ruptura resultou em uma massa de solo com velocidade de 60 km/h em um trecho de aproximadamente 4 km, o qual alcançou o vilarejo de Stava. O processo de colapso foi em

cascata, com o processo construtivo sendo alteamento à montante em que cada dique possuía altura de 35m.

Após um alteamento romper, o movimento de massa levou ao galgamento da barragem seguinte, que também colapsou. Os taludes possuíam geometria de 1V:1,2H e 1V:1,5H, com imagens da geometria e ruptura apresentadas respectivamente na Figura 7.



**Figura 7** - Antes e depois da barragem de Stava (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).



Na Espanha também foi reportada ruptura de barragem de rejeito, ocorrido na mina “Los Frailes”. Neste caso o colapso se deu pela fundação.

A fundação deste barramento era composta por aluvião, o qual estava sobre uma camada

de argila marinha altamente pré-adensada com a ruptura ocorrendo ao longo de uma faixa de aproximadamente 14 m de profundidade. A Figura 8 apresenta a ruptura desta barragem.



**Figura 8** - Ruptura da barragem “Los Frailes” (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Um caso de grande repercussão aqui no Brasil foi o da Barragem do Fundão, localizada no estado de Minas Gerais, que rompeu no dia 5 de novembro de 2015. Neste caso destaca-se a velocidade do alteamento da mesma, o qual foi pelo método à montante, fator este destacado anteriormente como um dos gatilhos para ocorrência da liquefação do solo.

Freire Neto (2009) e Machado (2017) destacam o que Mittal e Morgenstern (1976) citam acerca da taxa de alteamento, sugerindo que seja de 4,6 m/ano até 9,1 m/ano para que ocorra a dissipação do excesso de poropressão.

Contudo, como relatado por Machado (2017), a taxa de alteamento da Barragem do Fundão foi superior a esta faixa, tendo uma média de 12,30 m/ano no ano da ruptura.

### 3.1 Controle de fluxo em barragens

O controle de fluxo em barragens é um fator essencial para a sua segurança. Tanto em termos de colapso por piping quanto por liquefação, a verificação do fluxo e análise de eventuais tratamentos são fundamentais para a estabilidade do barramento.

Diversos aspectos são importantes para realizar o controle de fluxo, incluindo compactação do aterro, sistema de drenagem interna e tratamento em conjunto; em que tais questões serão aprofundadas nos próximos itens da presente pesquisa.



### 3.1.1 Compactação do aterro e controle tecnológico

Massad (2010) apresenta um detalhado estudo que compreende desde compactação em laboratório, comportamento mecânico de solo compactado, até controle tecnológico. Entre os aspectos citados neste assunto, o autor destaca sobre o par ordenado máxima densidade seca e umidade ótima, que norteiam a compactação em campo a partir do cálculo do grau de compactação.

O autor discute sobre o comportamento mecânico do solo compactado com a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade

do solo, relacionando com o ponto ótimo da curva de compactação. Esta abordagem demonstra que o ponto ótimo da curva de compactação não representa as melhores características de maneira simultânea, mas sim o ponto de melhor equilíbrio entre as três.

A seguir serão apresentados estudos que explicam sobre os três aspectos: permeabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade. Massad (2010) apresenta estudos conduzidos por Lambe e Whitman (1969), que demonstram a variação da permeabilidade a depender da umidade de compactação. Estes resultados são ilustrados na Figura 9.

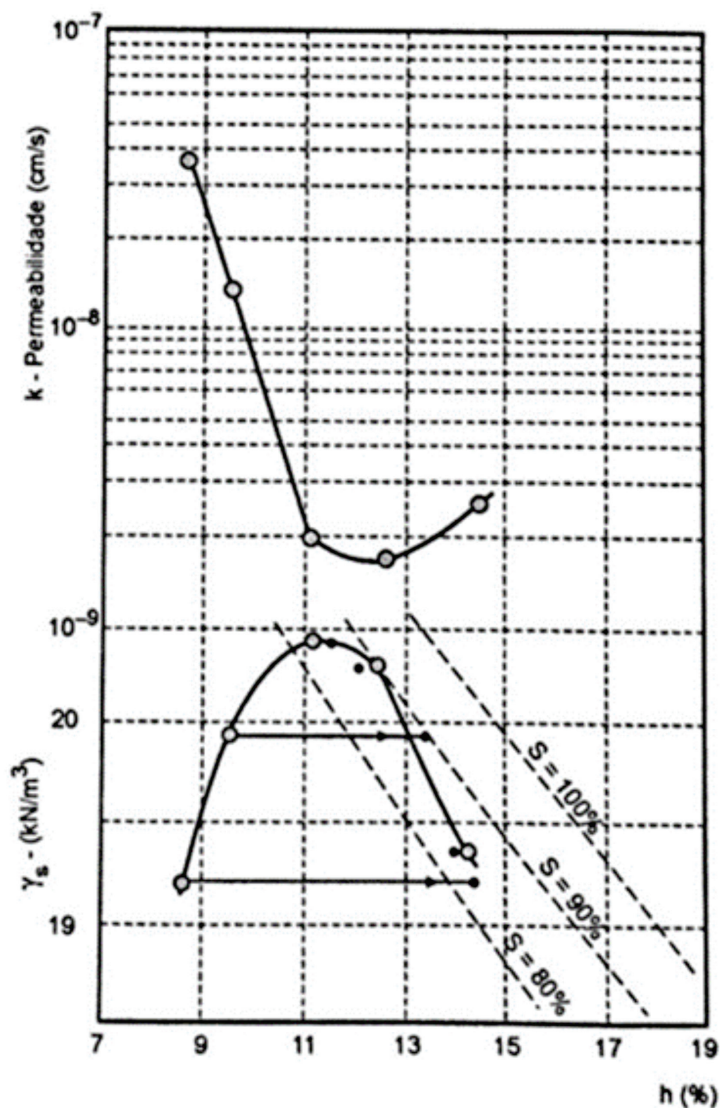


Figura 9 - Permeabilidade do solo a depender da umidade de compactação (Lambe e Whitman 1969, apud Massad, 2010).

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 9, pode-se observar que o ramo seco da curva de compactação é a região em que o solo apresenta maiores permeabilidades. Conforme a umidade de compactação vai sendo aumentada a permeabilidade reduz, de forma que alcança menores valores com umidade um pouco acima da ótima. Após este ponto, a permeabilidade volta a aumentar para valores de umidade no ramo úmido.

Em termos de compressibilidade, Souza Pinto (2006) apresenta estudos que demonstram que solos compactados no ramo seco da curva de compactação tendem a apresentar menores deformabilidades. Tais resultados corroboram pesquisas feitas por Lambe e Whitman (1969), as quais são ilustradas em Massad (2010). Tal comportamento é ilustrado na Figura 10.

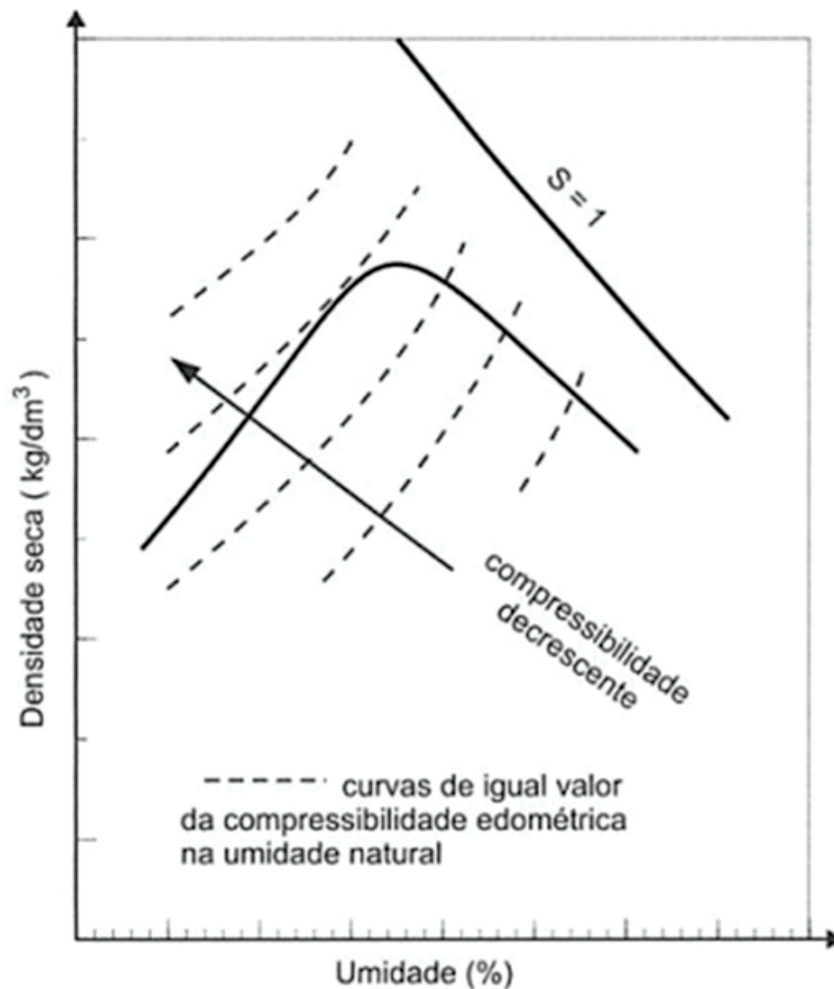


Figura 10 - Variação da compressibilidade do solo compactado nos ramos seco e úmido (Souza Pinto, 2006).

Por fim, Massad demonstra os resultados de Lambe e Whitman (1969) quanto à resistência ao cisalhamento do solo. Na Figura 11 é demonstra-

do que solos compactados no ramo seco da curva de compactação apresentam maiores resistências que aqueles compactados no ramo úmido.

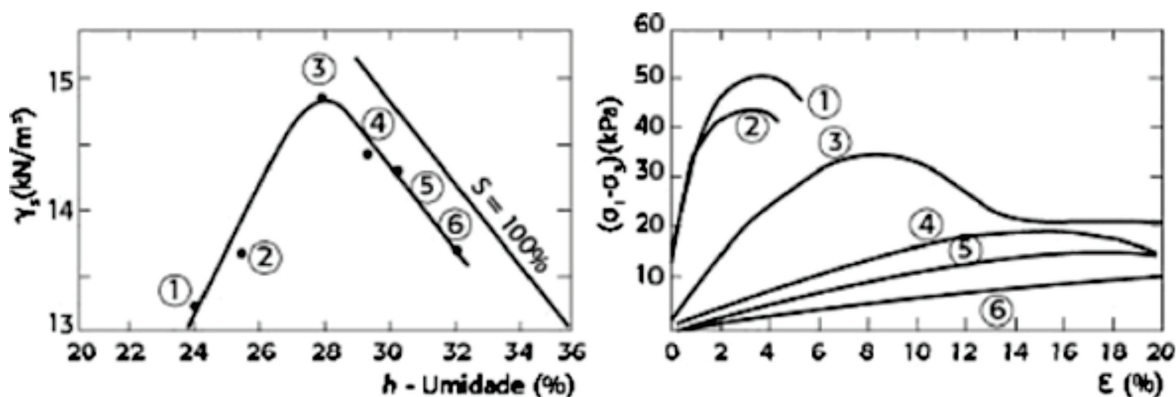


Figura 11 - Resistência ao cisalhamento do solo a depender da umidade de compactação (Lambe e Whitman 1969, apud Massad, 2010).

Como sintetização de todos os resultados apresentados, pode-se criar 3 regiões de comportamento de solo compactado na curva de compactação quanto à permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento, que são listados a seguir:

- Ramo seco: trecho com maiores valores de permeabilidade e menores valores de compressibilidade e resistência;
- Ponto ótimo: região com menores valores de permeabilidade e mediano para compressibilidade e resistência;
- Ramo úmido: região com valores medianos de permeabilidade e menores de compressibilidade e resistência.

São nestas apresentações do comportamento do solo compactado quanto à permeabilidade,

compressibilidade e resistência ao cisalhamento que reside a abordagem de Massad (2010) sobre a otimização de seções do aterro do corpo de uma barragem de terra. Nesta otimização, o autor cita que para tornar o aterro menos permeável e mais estável é necessário realizar a compactação dos espaldares de jusante e montante com umidade 1% abaixo da ótima, para obter maior estabilidade. Já na região central realiza-se a compactação com a umidade 2% acima da ótima, para obter menores valores de permeabilidade.

Esta condição resultaria em um aterro mais estável nos taludes de jusante e montante, além de formar um “septo” no núcleo, funcionando como uma barreira contra a percolação da água no interior do maciço. Tal contexto é apresentado na Figura 12.

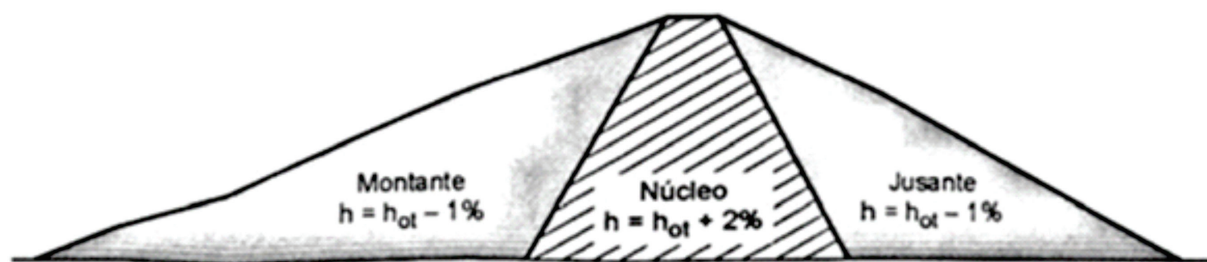


Figura 12 - Otimização de seção de barragem (MASSAD,2010).

### 3.1.2 Sistema de drenagem interna

Antes de dissertar sobre o sistema de drenagem, é importante frisar que uma barragem de terra não é um corpo impermeável. Naturalmente

irá ter percolação pelo corpo do aterro e que esta ocorrência deve ser analisada a fim de inserir sistemas que dificultem a percolação, como citado no item anterior, e também elementos que direcionam o fluxo no interior do aterro de forma que



busque evitar a saturação do talude de jusante, sendo este o sistema de drenagem interno de uma barragem.

Como citado por Souza (2017), o sistema de drenagem interno de uma barragem tem como objetivo evitar que ocorra a surgência de água na face do talude de jusante, o que caso aconteça irá certamente desenvolver processos erosivos e consequentemente o piping. Garcia cita que a inexistência de um sistema interno de drenagem ou até o mau funcionamento dele é fator condicionante para acarretar este fenômeno (Garcia, 2024)

A principal metodologia para realizar o dimensionamento deste sistema interno de drenagem é a partir do critério de Terzaghi. A partir desta proposta, Terzaghi segue dois princípios: é necessário que o material funcione como um dreno, direcionando a água que percola no interior do corpo do aterro; e atue como filtro impossibilitando que partículas do aterro sejam carreadas para o sistema de drenagem.

Nesta perspectiva, Pinto (2010) ilustra um exemplo de como um solo é escolhido para com-

por o sistema de drenagem a partir deste critério, destacando que sua utilização depende da análise granulométrica do solo do corpo do aterro e do possível solo a compor o sistema.

Pelo critério de Terzaghi, duas condições devem ser satisfeitas sendo a primeira o critério de drenagem que indica que o diâmetro equivalente a passante de 15% do filtro deve ser 5 vezes maior que o diâmetros equivalente passante 15% do solo do aterro ( $D_{15} > 5 \cdot d_{15}$ ). A segunda condição estabelece o critério de filtragem e diz que o diâmetro equivalente do filtro a passante 15% tem que ser 5 vezes menor que o diâmetro equivalente a passante 85% do solo do corpo do aterro ( $D_{15} < 5 \cdot d_{85}$ ).

Para exemplificar a aplicação destas condições, na Figura 13 o autor apresenta diversas curvas granulométricas, em que a curva S representa o material do corpo do aterro e as restantes são de jazidas hipotéticas. Logo abaixo são destacados os diâmetros equivalentes de 15% passante dos solos P, Q e R, além do próprio solo do corpo do aterro.

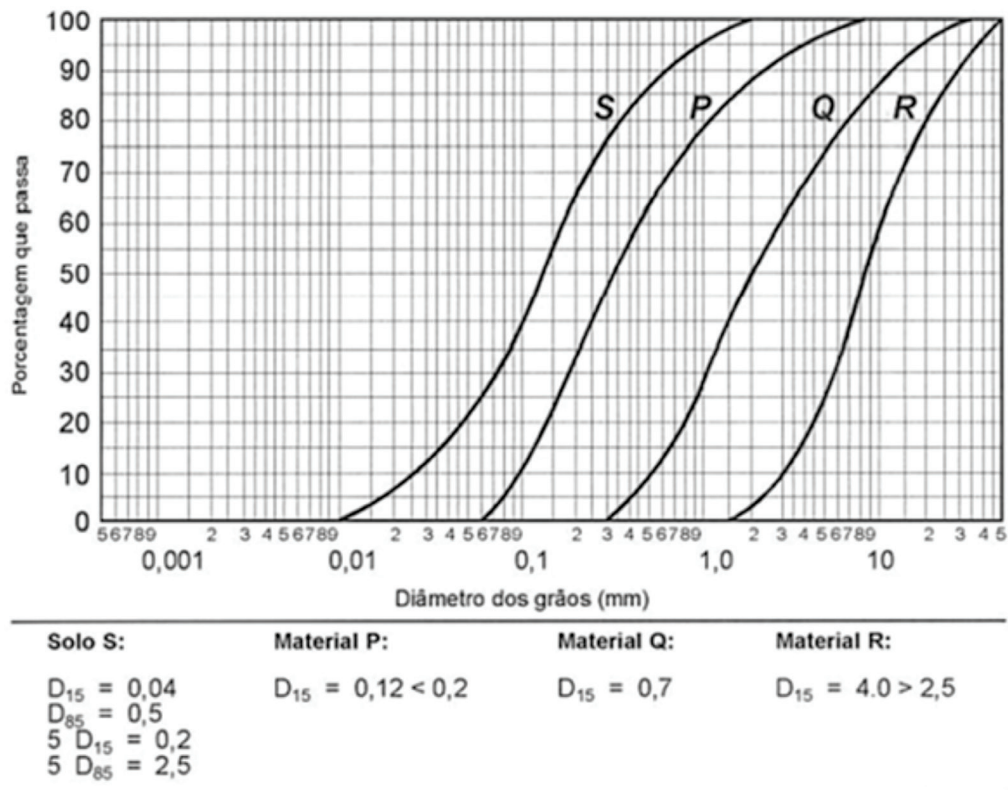


Figura 13 - Exemplo de aplicação de critério de filtro de Terzaghi (Souza Pinto, 2006).

A partir da análise dos parâmetros apresentados na Figura 13 observa-se que o solo que se enquadra nas duas condições do critério de filtro de Terzaghi é o Q. O solo P não é adequado porque não é muito mais permeável que o solo do aterro, o que não seria favorável para funcionar como dreno; o solo R não atende ao critério de filtragem.

Além do método de Terzaghi, o qual é largamente utilizado tanto no Brasil como em outros países, vale destacar outros critérios para dimensionamento a fim de aumentar a estabilidade de uma barragem tanto em relação ao piping, como também à liquefação do solo.

Mas, é importante destacar que o desenvolvimento dos critérios geralmente se baseia em estudos experimentais de laboratório com materiais granulares. Para o dimensionamento da capacidade de escoamento dos filtros, são utilizados fatores de segurança elevados, maiores ou iguais a 10, tendo em vista o papel fundamental de evitar poropressões que possam vir comprometer a estabi-

lidade da barragem, como citado por Assis (2003). A seguir são destacados critérios que se baseiam na granulometria, permeabilidade, coeficiente de não uniformidade e índice de vazios do solo.

Para dimensionamento do filtro de solos coesivos, Vaughan e Soares (1982) se basearam em estudos de permeabilidade do material em conjunto com o material adjacente ao filtro. Nesta proposta, os autores citam que a permeabilidade do solo ( $K_f$ ) do filtro é dada pela equação 1.

$$k_f < 6,7 \cdot 10^{-6} \times \delta^{1,52}$$

Onde  $\delta$  é o diâmetro referente a passante 85%, em  $\mu\text{m}$

Um critério para solos argilosos é proposto por Sherard e Dunnigan (1984) que se baseia na análise do material a ser utilizado, pois para cada um deles existe um critério que é norteado pela granulometria do mesmo. A Tabela 2 ilustra estes critérios a depender do solo.

**Tabela 2** - Critério de Sherard e Dunnigan (1984) apud Sandroni e Guidicini (2022)

Silte e argila (+ 85% < 0,074mm)	$D_{15}/D_{85} \leq 9$
Silte e areia argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$
Material intermediário (15 a 40% < 0,074mm)	$D_{15} = (40 - A)/(40-15) \cdot ((4 \cdot D_{85}) - 0,7) + 0,7 \text{ mm}$
Material grosso (15% < 0,074 mm)	$D_{15}/D_{85} \leq 4 \text{ a } 5$

\*Nota: A representa a % de partículas finas, ou seja, menores de 0,074 mm

Em 1964, o professor Araken Silveira apresentou uma teoria geométrica-probabilística que permite realizar uma análise de carreamento, onde é possível calcular o número de confrontos  $n$ , necessário para reter uma partícula com diâmetro  $d=d_v$  do material-base no interior do filtro (que possui determinada distribuição de vazios), através da equação 2:

$$n = \log \frac{(1 - P^*)}{\log pv}$$

Onde  $P^*$  é o nível de confiança do processo e  $PV$  é a percentagem de vazios maior ou igual a  $d_v$ .

Se a partícula percorre uma distância  $S$ , (Silveira sugere  $s = D_{50}$  ou igual à média geométrica dos diâmetros) em cada confronto, o percurso total de penetração será de acordo com a equação 3:

$$S = n \times s$$

Humes (1995, 1996) mostra que como os contatos entre as partículas ocorrem através de suas superfícies laterais, a probabilidade de um grão se agrupar com outros para formar um vazio, deve ser associada à distribuição em área lateral (PAL) das partículas do filtro, que é facilmente obtida através da distribuição em massa.

Os métodos supracitados se referem à determinação do material que melhor se enquadre para funcionar como filtro e dreno no sistema interno de drenagem de uma barragem de terra. Quanto à espessura do filtro vertical e altura do filtro horizontal, Massad (2010) relata que as seguintes expressões (equações 4 e 5) são utilizadas a fim de se obter a geometria, que são influenciadas pela vazão absorvida pelo filtro ( $Q$ ), o coeficiente de permeabilidade do material inserido no sistema de drenagem ( $K_{fv}$  e  $K_{fh}$ ) e o comprimento do filtro ( $L$ ).

$$B = \sqrt{\frac{Q \cdot L}{K_{fh}}} \quad (\text{Altura do filtro horizontal})$$

$$b = \frac{Q}{K_{fv}} \quad (\text{Espessura do filtro vertical})$$

Adicionalmente aplica-se o gradiente hidráulico ( $h/L$ ), isto é, a relação entre a coluna de água e o comprimento de percolação máximo admitido no dimensionamento da espessura do filtro horizontal. A largura do filtro vertical ( $b$ ), por sua vez, é considerada geralmente como sendo entre 0,7 m e 1,0 m devido a aspectos construtivos para tornar possível a escavação da zona do filtro.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das informações obtidas e informadas no artigo, conclui-se que a segurança de uma barragem de terra quanto aos fenômenos piping e liquefação do solo requer o estudo do fluxo pelo corpo do barramento e sua fundação.

No projeto de barragem de terra, dois pontos devem ser analisados criteriosamente, o fluxo pela fundação e pelo corpo do aterro, visto que caso não sejam analisados de maneira eficiente podem desenvolver processos erosivos que levam ao piping. Além do processo erosivo, o aumento descontrolado da poropressão ocasionado pela saturação do maciço é o principal fator que leva a estrutura ao colapso pelo fenômeno da liquefação.

Nessa perspectiva, o dimensionamento correto do sistema interno de drenagem e a inserção de elementos na fundação que aumentam a segurança contra este fenômeno, devem ser tra-

tados como prioridades para evitar a ruptura do barramento.

#### REFERÊNCIAS

Assis, A. P. (2003). Apostila de barragens. Disciplina do curso de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. ENC/FT. Brasília, DF.

Freire Neto, J. P. (2009). Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO.

Garcia, F. A. F. (2024). Segurança de barragens de terra contra os fenômenos de piping e liquefação do solo. Monografia de especialização apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Humes, Ciro. (1985). Porosimetria de filtros de proteção. Uma análise de critérios de filtro para materiais granulares. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Humes, Ciro. (1995). Considerações sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Machado, Nathália Couto. M149r Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. 2017.

Massad, F. (2010). Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2 ed. São Paulo. Oficina de Textos.

Oliveira, A. G. S. (2008). Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de Terra. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Oliveira, P. H. A. (2012). Problemas hidrogeológicos em barragens envolvendo o mecanismo de retroerosão tubular. Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia



Sandroni, S. (2012). Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento. Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. e Talbot, J. R. (1984). Basic properties of sand and gravel filters. *Jornal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 100 (6): 684: 700.

Silveira, Araken. (1963). Umas considerações sobre filtros de proteção (Uma análise do carreamento). Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Souza Pinto, C. (2006). Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª Ed. São Paulo. Oficina de Texto.

Souza, A. N. (2017). Análise do comportamento da barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN – durante sua fase de construção, primeiro enchimento e operação do reservatório. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Souza, M. M. (2013). Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC/ Mariana Miranda de Souza. – Rio de Janeiro – RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.