



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE  
BARRAGENS: ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

**HELTON FRANÇA CARNEIRO**

**EROSÕES INTERNAS NO ATERRO DA BARRAGEM  
GRANJEIRO: ESTUDO DE CASO**

Salvador  
2021

**HELTON FRANÇA CARNEIRO**

**EROSÕES INTERNAS NO ATERRO DA BARRAGEM  
GRANJEIRO: ESTUDO DE CASO**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens

Orientador: Professor Dr. Carlos Henrique Medeiros  
Coorientador: Dr. Helber Nazareno de Lima Viana  
Professora de Metodologia: Me. Alzira Ribeiro Mota

Salvador  
2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE  
BARRAGENS: ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

**HELTON FRANÇA CARNEIRO**

**EROSÕES INTERNAS NO ATERRO DA BARRAGEM  
GRANJEIRO: ESTUDO DE CASO**

MONOGRAFIA DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO SUBMETIDA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM  
SEGURANÇA DE BARRAGENS: ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS.

APROVADA POR:



---

CARLOS HENRIQUE MEDEIROS, DSc. (UFBA)  
(Orientador)



---

ROBERTO BASTOS GUIMARÃES, DSc. (UFBA)  
(Examinador)

SALVADOR/BA, FEVEREIRO DE 2021

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

CARNEIRO, HELTON FRANÇA

Erosões Internas no Aterro da Barragem Granjeiro: Estudo de Caso (Salvador)  
2021

xix, 114p., 210x297 mm (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL/UFBA, Especialista, Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, 2021).

Monografia de Especialização – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia

1. Princípios de Iniciação, Continuidade e Progressão de Erosões Internas em Barragens de Terra
2. Parâmetros Físicos
3. Características da Barragem Granjeiro
4. Fatores Chaves Relacionados às Ocorrências de Erosões Internas na Barragem Granjeiro

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CARNEIRO, H.F. (2021). Erosões Internas no Aterro da Barragem Granjeiro: Estudo de Caso. Monografia de Especialização, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 114 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Helton França Carneiro

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Erosões Internas no Aterro da Barragem Granjeiro: Estudo de Caso.

GRAU/ANO: Especialista / 2021

É concedida à Universidade Federal da Bahia permissão para reproduzir cópias desta monografia de especialização e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de especialização, pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Helton França Carneiro  
Rua 12 Sul, Res. Sonho Verde, ap. 1702, Águas Claras  
71939-000 – Brasília-DF-Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos aos meus orientadores pela ajuda e contribuição ao trabalho, os quais sem eles eu não chegaria ao resultado alcançado.

À Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo apoio e incentivo.

À minha esposa por sua compreensão.

À coordenação do curso de Especialização em Segurança de Barragens, em especial à Cássia Juliana pela paciência, empenho e dedicação com os alunos durante todo o curso.

# **Erosões Internas no Aterro da Barragem Granjeiro: Estudo de Caso**

## **RESUMO**

O presente trabalho realiza uma abordagem do conhecimento teórico acerca dos princípios de formação de erosões internas em barragens de terra e dos aspectos relacionados à continuidade e progressão dessas erosões, a fim de compreender os fatores-chaves, que levaram aos incidentes ocorridos em 2012 e 2019 na barragem Granjeiro, caracterizado por cavidades de grandes dimensões no maciço do aterro e verifica se na fase de projeto haveria a precisão necessária para identificar esses fatores. Para tanto, o trabalho se apoia nos resultados de levantamentos de campo e análises numéricas de percolação e estabilidade obtidos com o Projeto Básico de Intervenções para Controle e Minimização de Riscos de Rompimento da Barragem Granjeiro, a fim de confirmar a hipótese inicial de que o projeto propiciaria as informações requeridas para distinguir fatores-chaves que poderiam desencadear o processo de erosão interna. A hipótese inicial não foi confirmada e desse modo foram aplicados os passos estabelecidos na metodologia proposta nesse estudo, apoiado no conhecimento teórico abordado, a fim de convergir para a hipótese mais factível em relação ao que levou às erosões observadas na barragem em 2012 e 2019. Como resultado obtido verificou-se que o projeto convencional apoiado em redes de fluxo estabelecidas a partir dos resultados de ensaios de infiltração nas camadas da fundação, não conferiu para o caso específico da feição geológico-geotécnica da fundação da barragem Granjeiro, a precisão necessária para distinguir o fluxo controlado por descontinuidades preferenciais. As avaliações apontam para as descontinuidades persistentes no sentido montante/jusante, presentes nos 3 (três) primeiros metros da rocha de fundação, como o fator-chave responsável pelos processos erosivos que se formaram no maciço do aterro da barragem, ao propiciar a ocorrência de fluxos de percolação com velocidades e gradientes elevados, suficientes para iniciar o processo erosivo no contato com a base da trincheira de vedação (cut off). A continuidade da erosão se deu devido à ausência de um sistema de filtro na fundação localizado à jusante do ponto onde a erosão se iniciou, capaz de interromper o processo de carreamento dos grãos, mas principalmente em razão da ausência de instrumentação e monitoramento da barragem, não sendo possível, desse modo, que fossem percebidos comportamentos anômalos, que poderiam indicar problemas relacionados a processos erosivos internos na barragem. A progressão da erosão ocorreu devido a capacidade do solo do aterro em sustentar as aberturas ocasionadas pelos processos erosivos, atuando como um teto ou paredes laterais, para o “piping” ou para a cavidade, sem colapsar. Por fim, como medida preventiva ao controle efetivo do fluxo pela fundação, considera-se como solução mais segura a execução de poços de alívio sob o dreno de pé, perfurados de modo que atravessem toda a profundidade de 3 (três) metros da rocha superficial até o topo da rocha sã ou pouco alterada e ressalta-se a necessidade de instrumentação da barragem com piezômetros, medidores de vazão e marcos superficiais.

**Palavras-Chave:** Erosão interna. Barragem de Terra. Fundação. Descontinuidade. Percolação.

## **Internal Erosions at Granjeiro Dam Embankment: Case Study**

### **ABSTRACT**

This report approaches the theoretical knowledge about the principles of the initiation of internal erosion in earth dams and aspects related to the continuity and progression of this erosions, in order to understand the key factors that led to the failures that occurred in 2012 and 2019 in Granjeiro dam, characterized by large erosions in the embankment, and checks whether the design stage would have the necessary precision to identify these factors. Therefore are taken into account the results of field surveys and numerical analyzes of seepage flow and stability obtained with the Basic Design of Interventios to Control and Minimize the Risk of Failure of Granjeiro Dam, in order to confirm the statement that in the design stage it could be reached the accuracy required to check key factors that could initiate internal erosion in earth dams during their service life. The initial statement was not confirmed for the geological feature of the foundation of the Granjeiro Dam and therefore the steps established in the methodology proposed in that study were applied, supported by the theoretical review, in order to converge to the most feasible hypothesis in relation to what led to the erosions observed in the dam in 2012 and 2019. As the result obtained, it was found that the standart design supported by flow networks, established from the results of infiltration tests, in the foundation layers of Granjeiro, did not provide the necessary precision to discern the flow through the foundation controlled by preferential discontinuities. The assessments point to the persistent discontinuities in the upstream / downstream direction, present in the first 3 (three) meters of the foundation rock, as the key factor responsible for led to the failures that occurred in 2012 and 2019 in Granjeiro dam, by providing hight flows events with high speeds and gradients, sufficient to initiate the erosive process in contact with the base of the sealing trench of the dam. Erosion continued due to the absence of a filter action on the foundation in downstream of the point where it initiated, but mainly due to the lack of instrumentation and monitoring of the dam, thus, it was not possible for anomalous behavior to be noticed, which could indicate problems related to internal erosion that they were happening in the dam. The progression of erosion happened due to the capacity of the soil of the embankment hold a roof or wall to the pipe or the cavity without collapsing. Finally, as a preventive measure to the effective control of the flow from foundation, it considers as a safer solution the execution of relief wells under the foot drain, drilled so that they cross the entire depth of 3 (three) meters of the superficial rock until the top of the healthy or slightly altered rock and the requirement for instrumentation of the dam with piezometers, flow meters and surface landmarks.

Keywords: Internal Erosion. Earth Dam. Foundation. Discontinuities. Flow.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	2
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.3 JUSTIFICATIVA .....	2
1.4 HIPÓTESE .....	3
1.5 OBJETIVO .....	3
1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	3
1.7 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 EROSÃO INTERNA .....	5
2.2 MODOS DE DESENVOLVIMENTO DE RUPTURAS POR EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA.....	6
2.2.1 Erosão interna através do aterro da barragem.....	6
2.2.2 Erosão interna associada a alguma estrutura adjacente ao maciço do aterro.....	7
2.2.3 Erosão interna a partir da fundação.....	7
2.2.4 Erosão interna do aterro para dentro da fundação.....	8
2.3 CONCEITOS IMPORTANTES.....	9
2.3.1 Classificação quanto a graduação do solo.....	9
2.3.2 Coeficiente de Uniformidade (Cu).....	10
2.3.3 Conceito de solos instáveis .....	10
2.3.4 Conceito de critério geométrico, critério de tensão e critério hidráulico.....	10
2.3.5 Ruptura de um maciço .....	11
2.3.6 Fratura hidráulica .....	11
2.3.7 Efeito de arco .....	11
2.3.8 Argilas dispersivas .....	11



2.4 PRINCÍPIOS DE FORMAÇÃO DE EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA.....	12
2.4.1 Início do processo erosivo por fuga concentrada.....	12
2.4.2 Início do processo erosivo por erosões regressivas .....	22
2.4.3 Início do processo erosivo por erosão interna de contato .....	29
2.4.4 Início do processo erosivo por erosão interna por sufusão .....	33
2.5 FATORES RELACIONADOS À CONTINUIDADE DE EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA .....	36
2.5.1 Critério de retenção do filtro .....	39
2.5.2 Critério de auto filtração ou estabilidade .....	41
2.5.3 Critério de uniformidade .....	41
2.5.4 Critério quanto a coesão.....	42
2.5.5 Critério de drenagem.....	42
2.5.6 Filtros ou transições em barragens que não atendem a critérios modernos .....	43
2.5.7 Continuidade de erosões para dentro de descontinuidades, trincas e juntas .....	45
2.6 Fatores relacionados a progressões de erosões internas em barragens de terra .....	46
2.7 SISTEMAS DE CONTROLE DE PERCOLAÇÃO PELA FUNDAÇÃO .....	49
2.7.1 Trincheira de vedação .....	49
2.7.2 Injeções de cimento em maciços rochosos.....	50
2.7.3 Tapetes impermeabilizantes à montante .....	51
2.7.4 Trincheiras Drenante e Poços de Alívio.....	52
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1 Introdução.....	53
3.2 Seção Geométrica.....	57
3.3 Investigação Geológico/Geotécnica .....	57
3.4 Propriedades Físicas do Solo (Aterro).....	58
3.4.1 Ensaios de granulometria ou classificação granulométrica .....	60
3.4.2 Ensaios para determinação do peso específico dos grãos .....	61

3.4.3 Ensaio de consistência -Limites de Atterberg .....	61
3.4.4 Ensaio de compactação .....	62
3.4.5 Ensaio a compressão simples .....	63
3.4.6 Ensaio de compressão triaxial.....	64
3.4.7 Ensaio de permeabilidade.....	65
3.5 Propriedades do Maciço da Fundação-Fluxo de Percolação.....	67
3.6 Mecanismo de fluxo em meios porosos .....	69
3.7 Pressões atuantes em solos compactados .....	73
3.8 Resistência ao Cisalhamento .....	74
<b>4 RESULTADOS E INFORMAÇÕES DO PROJETO. ....</b>	<b>75</b>
4.1 Características Geométricas da barragem Granjeiro .....	76
4.2 Características do maciço do aterro e fundação – investigações de campo .....	77
4.3 Caracterização do maciço do aterro – ensaios de laboratório .....	84
4.4 Análise de percolação e estabilidade na barragem Granjeiro.....	87
<b>5 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA BARRAGEM GRANJEIRO À EROSÕES INTERNAS – DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES RELACIONADAS AS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS EM 2012 E 2019. ....</b>	<b>90</b>
5.1 Geologia regional e geologia local.....	91
5.2 Olhando para a fundação da barragem Granjeiro.....	93
5.3 Levantamento das Hipóteses .....	100
5.4 Convergindo para hipótese mais provável .....	104
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Modos de desenvolvimento de rupturas por erosões internas em barragens de terra de Foster e Fell (1999), citado pelo ICOLD (2017). .....	9
<b>Figura 2.2</b> – Situações em que podem ocorrer trincas no aterro em função da superfície da fundação do vale, adaptado do ICOLD (2017). .....	13
<b>Figura 2.3</b> – Cenários em que podem ocorrer deformações diferenciais no solo da fundação da barragem resultando na formação de trincas no aterro, adaptado do ICOLD (2017). .....	14
<b>Figura 2.4</b> – Situações onde aberturas podem se formar entre o aterro da barragem e a parede de concreto do vertedor, adaptado do ICOLD (2017). .....	15
<b>Figura 2.5</b> – Situação de trincas horizontais e verticais interligadas, adaptado do livro Princípios da Engenharia Geotécnica, adaptado DAS (1941). .....	16
<b>Figura 2.6</b> - Representação gráfica do modo de ruptura por erosão regressiva global, adaptado do ICOLD (2017), que resulta na formação de cavidade sub-vertical no núcleo. ....	26
<b>Figura 2.7</b> - Resultados dos ensaios do gradiente hidráulico crítico para erosão regressiva em furo de 6 cm de diâmetro em amostras de argila de diferentes Limites de Liquidez, adaptado do ICOLD (2017). .....	27
<b>Figura 2.8</b> – Resultados dos ensaios do gradiente hidráulico crítico para erosão regressiva em furos variando entre 3 cm e 10 cm em amostras de argila com Limite de Liquidez de 29%, adaptado do ICOLD (2017). ....	28
<b>Figura 2.9</b> - Consequências da erosão de contato indicada por Beguin (2011) em camadas permeáveis da fundação sob barragens com baixa permeabilidade, adaptado do ICOLD (2017). .....	30
<b>Figura 2.10</b> - Tipos de solos de graduações granulométricas potencialmente instáveis e sujeitos à sufusão, adaptado do ICOLD 2017. ....	35
<b>Figura 2.11</b> – Alguns tipos de zoneamentos de aterros de barragens Foster et al (1998), citado por Filho (2013). .....	37
<b>Figura 2.12</b> – Solo base e Filtro, adaptado do ICOLD (2017) .....	39
<b>Figura 2.13</b> – Curvas Granulométricas de filtros de baixo desempenho, adaptado de Fell et al (2015), citado por Silva (2016). .....	41

<b>Figura 2.14</b> - Conceito de limites de erosão do filtro (Foster,1999), Foster e Fell (2001) citado pelo ICOLD (2017) e por Silva (2016). .....	43
<b>Figura 2.15</b> – Curvas granulométricas do solo base e do filtro ou transição e valores limites de erosão, adaptado do ICOLD (2017). .....	45
<b>Figura 2.16</b> – Tempo aproximado do aumento da erosão por “piping” de 25 mm para 1 metro de diâmetro, adaptado do ICOLD (2017). .....	48
<b>Figura 3.1</b> - Fluxograma metodológico de análise. ....	56
<b>Figura 3.2</b> – Classificação do solo de acordo com sua dimensão granulométrica. ....	60
<b>Figura 4.1</b> - Seção da barragem Granjeiro na estaca 10+7,75, adaptada de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. ....	77
<b>Figura 4.2</b> - Seção da barragem Granjeiro na estaca 14+12,75, adaptada de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. ....	77
<b>Figura 4.3</b> - Seção da barragem Granjeiro na estaca 25+12,60, extraída de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. ....	77
<b>Figura 4.4</b> – Seção Geológica da parte central até a ombreira direita da barragem Granjeiro, adaptado do relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. ....	83
<b>Figura 4.5</b> – Representação gráfica da Rede de Fluxo correspondente a seção 2, para uma condição de carregamento antes do galgamento (N.A.= 822,00 m), gerada no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. ....	89
<b>Figura 5.1</b> – Mapa Geológico da região da barragem Granjeiro .....	92
<b>Figura 5.2</b> – Detalhe da estruturação do arenito na base do canal de restituição do vertedouro, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo. ....	93
<b>Figura 5.3</b> – Vista da brecha aberta para a realização dos serviços de injeções na fundação com presença de remanescente de solos transportados de coloração variegada a escura, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo. ....	94
<b>Figura 5.4</b> – Detalhe de remanescente de solos transportados de coloração variegada a escura no talude da brecha, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo. ....	95
<b>Figura 5.5</b> – Detalhe da estruturação do arenito na base do canal de restituição do rio Jaburu onde se realizavam os serviços de injeção na fundação sob	

o maciço da barragem, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.....	96
<b>Figura 5.6</b> – Vista superior do sistema de fratura da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.....	97
<b>Figura 5.7</b> – Vista frontal do sistema de fraturas da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.....	97
<b>Figura 5.8</b> – Detalhe da superfície do solo compactado trincado proveniente da área de vedação à montante, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.....	98
<b>Figura 5.9</b> – Vista para montante com detalhe das cavidades formadas no tapete impermeável localizado à jusante da ensecadeira.....	99
<b>Figura 5.10</b> – Detalhe das cavidades observadas no tapete impermeável de montante.....	99
<b>Figura 5.11</b> – Velocidade crítica para erosão de contato nas configurações de solo fino sobre e abaixo solos de granulometria grosseira, adaptado do ICOLD (2017).....	105

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> – Rupturas e acidentes graves em grandes barragens pelo mundo, adaptado de Foster et al, 1998, 2000a, citado pelo ICOLD (2017). .....	7
<b>Quadro 2.2</b> – Condições nas quais a trinca ou a percolação concentrada no aterro é improvável de ocorrer de Fell et al (2008), citado e adaptado do ICOLD (2017).....	17
<b>Quadro 2.3</b> -Ordem de magnitude do $I_{HET}$ em escala logarítmica e respectiva velocidade de erosão do solo, citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Wan (2006). .....	20
<b>Quadro 2.4</b> - Índice representativo da taxa de erosão ( $I_{HET}$ ) associado a classificação unificada dos solos não dispersivos, citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Wan e Fell, (2002).....	20
<b>Quadro 2.5</b> –Prováveis intervalos da tensão cisalhante crítica ( $\tau_c$ ) associado ao “Hole Erosion Index” ( $I_{HET}$ ), citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Fell et al (2008). .....	21
<b>Quadro 2.6</b> - Domínio do efeito de filtro e do carregamento hidráulico no processo erosivo de contato, adaptado do ICOLD (2017).....	31
<b>Quadro 2.7</b> – Classificação da probabilidade de erosões internas associado ao zoneamento do aterro da barragem Foster et al (1998), citado por Filho (2013). .....	37
<b>Quadro 2.8</b> – Probabilidade do Filtro com Excessiva Presença de Finos Manter uma Trinca (Fell et al, 2008 citado pelo ICOLD, 2017).....	42
<b>Quadro 2.9</b> – Critério de Erosão Excessiva e Contínua Foster e Fell (1999a, 2001), citado pelo ICOLD (2017).....	44
<b>Quadro 2.10</b> – Probabilidade do solo manter a estabilidade da cavidade tubular de uma erosão por “piping” adaptado de Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017).....	47
<b>Quadro 4.1</b> – Resultados da Investigação Geológico/Geotécnica do maciço da barragem Granjeiro. ....	83
<b>Quadro 4.2</b> – Resumo dos Resultados dos Ensaios de Laboratório do solo do aterro da barragem Granjeiro .....	86
<b>Quadro 4.3</b> – Parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade das seções de análise da barragem Granjeiro. ....	87

<b>Quadro 4.4</b> - Resultados de vazões unitárias incidentes no sistema de drenagem	
interna .....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- CEF-Continuing Erosion Filter
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil
- Cu – Coeficiente de Uniformidade
- CU – Ensaio Triaxial do tipo Adensado não Drenado
- FS – Fator de Segurança
- GC – Grau de Compactação
- ICOLD – International Commission on Large Dams
- $I_{HET}$  - Hole Erosion Index
- $\tilde{I}_{HET}$  - Hole Erosion Index para amostra com GC = 95%
- IP – Índice de Plasticidade
- ISC – Índice de Suporte Califórnia
- LL – Limite de Liquidez
- LP – Limite de Plasticidade
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- NA – Nível da Água do Reservatório
- NBR – Norma Brasileira
- NEF – No Erosion Filter
- RQD – Rock Quality Designation
- SEEP/W – Software de Elementos Finitos Produzido pela Geoslope para Modelar Fluxo de Água Subterrânea em Meios Porosos
- SM – Sondagem Mista
- SP – Sondagem a Percussão
- SPT – Standard Penetration Test
- SR – Sondagem Rotativa
- SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
- TRB- AASHTO- Transportation Research Board adotado pela American Association of State Highway and Transportation Officials
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers
- USBR - U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation
- USDA-SCS – U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service



## LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da Seção Hidráulica
- A2 – Grau de Alteração da Rocha (Rocha pouco alterada)
- A3 – Grau de Alteração da Rocha (Rocha medianamente alterada)
- A4 – Grau de Alteração da Rocha (Rocha muito alterada)
- A5 – Grau de Alteração da Rocha (solo de alteração)
- c – Coesão do Solo Compactado
- C2 – Grau de Coerência da Rocha (coerente)
- C3 – Grau de Coerência da Rocha (medianamente coerente)
- D – Diâmetro da Trinca de Geometria Cilíndrica por onde há Fluxo de Fuga Concentrada.
- D<sub>0</sub> – Diâmetro do Furo Realizado em Amostras Ensaaiadas de Argila
- d<sub>15</sub> – Diâmetro do Solo Base no qual 15% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- D<sub>15</sub> – Diâmetro do Material Filtrante no qual 15% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- D<sub>50</sub> – Diâmetro médio do Material Filtrante no qual 50% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- D<sub>60</sub> – Diâmetro do Solo no qual 60% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- d<sub>85</sub> – Diâmetro do Solo Base no qual 85% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- d<sub>90</sub> – Diâmetro do Solo Base no qual 90% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- d<sub>95</sub> – Diâmetro do Solo Base no qual 95% em Peso é Constituído por Grãos de Menor Dimensão
- d<sub>H</sub> – Diâmetro Efetivo do Solo Base, estabelecido pela equação 2.10
- D<sub>H</sub> – Diâmetro Efetivo do Material Filtrante, estabelecido pela equação 2.10
- Δh – Diferença de Potencial Hidráulico entre Dois Pontos
- Δq – Taxa de Percolação por Linha de Fluxo
- F2 – Grau de Fraturamento da Rocha (Medianamente Fraturada)
- F5 – Grau de Fraturamento da Rocha (Fragmentada)
- g – Aceleração da Gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$\gamma_s$  – Peso Específico Real dos Grãos  
 $\gamma_{sat}$  – Peso Específico do Solo Saturado  
 $\gamma_w$  – Peso Específico da Água  
 $h$  – Potencial Hidráulico em um Ponto Específico  
 $H$  – Perda de Carga por Atrito nas Paredes da Trinca por onde há Fluxo de Fuga Concentrada  
 $H1$  – Classificação Quanto a Permeabilidade do Meio Poroso (Muito Baixa)  
 $i$  – Gradiente Hidráulico  
 $i_c$  – Gradiente Hidráulico Crítico  
 $k$  – Coeficiente de Permeabilidade de um Meio Poroso  
 $k_x$  – Coeficiente de Permeabilidade de um Meio Poroso na Direção Horizontal  
 $k_z$  – Coeficiente de Permeabilidade de um Meio Poroso na Direção Vertical  
 $L$  – Extensão em metros  
 $N$  – Número de Golpes no Ensaio SPT  
 $n$  – Porosidade de um Meio  
 $n$  – Relação entre a Distância entre as Linhas Equipotenciais e a Distância entre as linhas de fluxo em uma Rede de Fluxo  
 $N_d$  – Número de Linhas Equipotenciais de uma Rede de Fluxo  
 $N_f$  – Número de Linhas de Fluxo de uma Rede de Fluxo  
 $n_g$  – Porosidade de um solo graúdo  
 $p_c$  – Pressão de Contato entre os Grãos de um Solo não Saturado  
 $P_i$  – Percentagem em Peso do Solo para o Diâmetro  $d_i$   
 $q$  – Vazão de Percolação em um Meio Poroso  
 $R1$  – Grau de Qualificação RQD da Rocha (Excelente)  
 $R3$  – Grau de Qualificação RQD da Rocha (Regular)  
 $R4$  – Grau de Qualificação RQD da Rocha (Má)  
 $R5$  – Grau de Qualificação RQD da Rocha (Péssima)  
 $\sigma$  – Tensão Total em um Ponto da Massa de Solo  
 $\sigma'$  – Tensão Efetiva em um Ponto da Massa de Solo  
 $\sigma_1$  – Pressão Principal Total na Massa de Solo na Direção Axial  
 $\sigma_3$  – Pressão Principal Total Confinante da Massa de Solo  
 $u$  – Pressão Neutra ou Poropressão exercida pela Água  
 $u_a$  – Pressão do Ar nos Poros de um Solo Não Saturado

$v$  – Velocidade do Fluxo de Percolação

$W$  - Largura da Trinca por onde há Fluxo de Fuga Concentrada

$W_r$  – Limite de Liquidez (do Inglês Wet, Fig. 2.7 e 2.8)

$X_a$  - Fator Expresso pela Relação entre Área ocupada pela Água no Contato entre Duas Partículas do Solo e a Área Total

$Y_c$  - Fator expresso pela Relação entre a Área de Contato entre as Partículas do Solo e a Área Total

$z$  – Altura Topográfica

$Z$  – Espessura do Tapete Impermeável

$\beta$  - Parâmetro Empírico Relativo a Parcela das Forças de Coesão entre os Grãos no Cálculo da Velocidade Crítica por Erosão Interna de Contato

$\tau$  – Tensão Cisalhante Imposta pelo Fluxo

$\tau_c$  – Tensão Cisalhante Crítica ou Resistência ao Cisalhamento

$\varphi$  – Ângulo de Atrito entre os Grãos do Solo

# - Representação da Malha da Peneira utilizada no Ensaio de Granulometria

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo o ICOLD (2017), os registros estatísticos das rupturas ocorridas em barragens de terra pelo mundo no período de 1800 a 1986 apontam que 46% ocorrem por erosão interna pelo aterro e pela fundação e 48% por galgamento, principalmente devido a incapacidade ou mal funcionamento da estrutura vertente e outras estruturas de saídas. Dados mais recentes de alguns países apontam que as rupturas por erosão interna superam significativamente as rupturas por galgamento em barragens de terra, em razão dos avanços obtidos nas análises, estudos hidrológicos e dimensionamento das estruturas vertentes (ICOLD, 2017).

Segundo publicação do U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation - USBR (2007), sobre os modos de rupturas de barragens e seus respectivos percentuais de ocorrências, o percentual total de incidentes e acidentes que ocorreram em barragens após 1950 associado a erosão interna chega a 54,2%.

Assim, pode-se afirmar que a erosão interna em aterros e suas fundações é assunto atual em segurança de barragens e a principal causa de incidentes e acidentes em barragens de terra o que ressalta a importância dos estudos dos mecanismos de rupturas por erosões internas para a promoção da segurança de barragens.

A Barragem Granjeiro, localizada no limite entre os municípios de Ibiapina e Ubajara no Estado do Ceará, apresentou recentemente ocorrências de incidentes associados à erosão interna, que merecem estudo.

A barragem Granjeiro foi construída na década de 80 e ocorrências de percolações excessivas pela fundação são conhecidas desde o início das operações. Porém na última década mereceram destaques dois incidentes em locais diferentes da barragem onde foram observadas cavidades de grandes dimensões no maciço do aterro. O primeiro evento foi observado próximo a ombreira esquerda no ano de 2012, com a formação de “piping” de dimensão aproximada de 2 metros na vertical na face de montante. O segundo evento foi detectado em março de 2019, com o surgimento de “sinkhole”, que se formou no lado de montante da crista, em seção mais próxima da ombreira direita.

Nos dois eventos as erosões internas se interligaram ao reservatório antes de serem detectadas e mesmo com processos erosivos avançados permitiram que fossem realizadas intervenções emergenciais em tempo de evitar a sua ruptura.

Tal estrutura consiste de uma barragem de seção homogênea de solo com altura máxima de 13,56 m, extensão de 596 m e crista com largura de 6,0 m, com taludes médios

com inclinação de 1V:1,7H a montante e 1V:2H a jusante. A drenagem interna é constituída por um dreno horizontal de areia e dreno de pé em enrocamento e a barragem conta com uma trincheira de vedação localizada à montante do eixo. A estrutura do vertedouro é um canal lateral com taludes escavados em solo e a base em rocha, com 35 metros de largura. A área da bacia de contribuição tem 86 km<sup>2</sup> e o reservatório tem capacidade para 2,9 hm<sup>3</sup>.

Dito isso, o presente trabalho faz uma abordagem teórica dos incidentes ocorridos na barragem Granjeiro, registrados durante sua operação, à luz dos princípios associados às fases de início, de continuidade e de progressão de erosões internas, avaliando as possíveis causas relacionadas a cada uma dessas fases, assim como sugere medidas que poderiam prevenir novas ocorrências do tipo.

## 1.1 APRESENTAÇÃO

O presente trabalho procura identificar os principais fatores que contribuíram para os incidentes observados na barragem Granjeiro, a partir da análise dos possíveis princípios de formação dos processos erosivos observados, a fim de esclarecer as razões associadas à vulnerabilidade da barragem às erosões internas. Também serão abordadas as causas da estabilidade relativa da barragem durante os eventos observados, apesar dos avançados processos erosivos em que se encontrava, de modo a permitir a adoção das intervenções emergenciais em tempo de evitar sua total ruptura.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Como, quando e onde iniciaram as erosões internas no maciço da barragem Granjeiro, quais os fatores que podem estar associados às fases de formação, continuidade e progressão das erosões internas ocorridos em 2012 e 2019 na barragem Granjeiro, por que nas duas situações em que a barragem já apresentava um processo avançado de erosão interna do aterro não houve a ruptura e quais medidas podem e devem ser adotadas como prevenção e controle para evitar que novas erosões internas se formem no aterro?

## 1.3 JUSTIFICATIVA

As barragens podem apresentar locais vulneráveis ao processo de formação de erosões internas, que podem resultar na continuidade e progressão até a situação de ruptura. Reconhecer tais locais de vulnerabilidade na fase de projeto permite avaliar

alternativas e propor soluções para minimizar a probabilidade de ocorrências desse tipo durante a fase de operação da barragem, ressaltando a importância e a necessidade do monitoramento e da manutenção adequada, independente da qualidade do projeto.

Em consonância com esses aspectos o presente trabalho aborda os princípios de formação de erosões internas e os fatores associados a cada um deles, para a partir das informações de projeto e das investigações de campo avaliar os pontos vulneráveis na barragem Granjeiro, que poderiam resultar na formação de novas erosões internas.

#### 1.4 HIPÓTESE

O entendimento dos princípios da formação, continuidade e progressão de erosões internas em barragens de terra e quais são seus agentes causadores, o conhecimento das forças erodíveis atuantes e da resistência dos componentes da barragem a essas forças atuantes, possibilita uma avaliação prévia, na fase de projeto, da existência de locais da barragem de acumulação de água suscetíveis à incidentes relacionados a erosões internas.

#### 1.5 OBJETIVO

O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos, a partir do estudo de caso da Barragem Granjeiro, considerando as informações obtidas com as investigações de campo e as características da barragem obtidas no projeto original:

- a) Realizar uma abordagem do conhecimento teórico acerca dos princípios de formação de erosões internas em barragens de terra para acumulação de água e dos fatores relacionados à continuidade e progressão dessas erosões;
- b) Estudar o processo de formação e progressão de erosões internas na barragem e identificar possíveis pontos suscetíveis à formação de erosões internas no maciço do aterro;
- c) Propor medidas corretivas, de prevenção e de controle de novas erosões internas.

#### 1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa adotou a abordagem hipotética dedutiva e para tanto aplicou o conhecimento teórico ao estudo de caso, para comprovar a hipótese mais provável do que

ocasionou as cavidades observadas no aterro da barragem Granjeiro. Dessa forma, algumas etapas de trabalho foram seguidas:

Etapa 1 – Identificação da barragem e levantamento dos dados;

Etapa 2 – Revisão Bibliográfica;

Etapa 3 – Apresentação das hipóteses e análise das possíveis causas relacionadas à vulnerabilidade da barragem a erosões internas;

Etapa 4 – Discussão dos Resultados e sugestões de intervenções como medidas de prevenção.

## 1.7 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A monografia divide-se em seis capítulos, conforme apresentado a seguir. O Capítulo 1 fornece a justificativa sobre a realização deste trabalho, assim como seu objetivo, a metodologia adotada e a estruturação. O Capítulo 2 é destinado a uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto na monografia, onde são fornecidos o embasamento teórico e os fundamentos encontrados na literatura técnica. No Capítulo 3 é realizada a descrição da metodologia adotada e das ferramentas utilizadas referentes a cada passo aplicado nessa abordagem metodológica. O Capítulo 4 é uma síntese dos resultados das investigações de campo e das vazões de percolação obtidas por modelagem numérica no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA. O Capítulo 5 é destinado a aplicação da metodologia com a apresentação das hipóteses, análise e conclusão sobre as causas relacionadas aos incidentes de 2012 e 2019. Finalmente o Capítulo 6 traz as considerações finais e conclusões do presente trabalho.

Capítulo 1 – Introdução;

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica;

Capítulo 3 – Metodologia;

Capítulo 4 – Investigações de Campo e Resultados Obtidos com o Projeto

Capítulo 5 – Avaliação da Suscetibilidade da Barragem Granjeiro à Erosões Internas: Levantamento das Hipóteses e Análise das Possíveis Causas Relacionadas aos Incidentes de 2012 e 2019;

Capítulo 6 – Considerações Finais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo traz os aspectos relevantes à compreensão do assunto em estudo. Compreende a abordagem do conceito de ruptura por erosão interna em barragens de terra para acumulação de água, aborda os princípios gerais da percolação de águas em solos, as tensões atuantes, as características geomecânicas do solo, que influenciam no processo de formação de erosões internas, continuação e progressão e outros aspectos relevantes como a importância dos dispositivos de filtro e da drenagem interna no controle de erosões internas e dos dispositivos de vedação, destinados a reduzir os gradientes hidráulicos no pé à jusante da barragem.

### 2.1 EROSÃO INTERNA

Erosão interna é o mecanismo de desagregação de partículas do solo no interior do maciço do aterro ou da fundação de uma barragem e o transporte desses grãos até a saída do maciço ou de sua fundação, à jusante da estrutura. Este mecanismo está associado às forças hidráulicas resultantes do fluxo de percolação de água através do maciço do aterro ou da fundação da barragem. Quando essas forças de percolação superam a resistência entre as partículas do solo ocorre o processo de desagregação de partículas e em havendo o transporte desses grãos pelo fluxo de água até a saída, à jusante da barragem, o processo de erosão interna estará estabelecido.

Cruz (2004) afirma que a arte de projetar uma barragem está ligada à arte de controlar o fluxo da água pelo conjunto barragem-fundação, ou seja, fluxos descontrolados favorecem a ocorrência de forças de percolação excessivas, que normalmente são responsáveis pelo início do mecanismo de erosão interna.

Segundo o ICOLD (2017) o início de uma erosão interna é governado pelo mecanismo de equilíbrio entre as partículas e a continuidade é governada pelo mecanismo de transporte dos grãos.

Assim, o início de uma erosão interna ocorre quando há a perda de equilíbrio da massa de solo sob influência da carga hidrostática e o carreamento ocorre quando essas partículas de solo desagregadas são continuamente transportadas pelo fluxo de percolação de água até a saída à jusante. Daí a importância de conhecer essas forças que são mobilizadas em determinados cenários e a capacidade da estrutura em conter ou não o carreamento de partículas de solo pelo fluxo de percolação.



Sabe-se que o mecanismo de erosão interna se inicia por aqueles grãos de menor dimensão, que apresentam menor coesão e resistência ao cisalhamento, por serem mais fáceis de se desagregarem e de serem transportados entre os vazios existentes do meio sem serem bloqueados e, à medida que as forças de percolação e os vazios do solo se ampliam, com o carreamento de partículas finas, a percolação através do maciço se torna mais efetiva e intensa e grãos maiores passam a ser transportados.

Uma vez iniciado o mecanismo de erosão interna e não sendo o mesmo interrompido, pela ação de filtro ou outras medidas de controle de fluxo e proteção, as erosões internas poderão progredir, podendo promover a ruptura do maciço e/ou de sua fundação.

Observa-se que o processo de erosão interna, que conduz a ruptura da barragem de terra desenvolve-se em quatro fases fundamentais denominadas por: i) início da erosão interna, ii) continuidade da erosão interna, iii) progressão da erosão interna e iv) formação de brechas e colapso do maciço/fundação.

Neste contexto, o conhecimento das variáveis que influenciam tal mecanismo é de fundamental importância na fase de projeto, pois favorece simulações de fluxo mais precisas, que possibilitam a previsão adequada dos dispositivos de controle do fluxo de água e de filtro no interior do maciço do aterro e da fundação.

Também são importantes o emprego de um criterioso controle tecnológico na fase construtiva e a realização de um contínuo programa de auscultação, visando a adequada análise do comportamento da barragem na fase de operação. Tais medidas são essenciais para prevenção de acidentes por erosões internas em barragens de terra de acumulação de água.

## 2.2 MODOS DE DESENVOLVIMENTO DE RUPTURAS POR EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA

Existem quatro modos principais de desenvolvimento de rupturas por erosões internas em barragens de terra para acumulação de água, são elas:

### 2.2.1 Erosão interna através do aterro da barragem

Ocorre quando as forças hidráulicas exercidas pelo fluxo de percolação através do aterro são suficientes para causar a desagregação e o transporte das partículas de solo através da seção do aterro até a saída na superfície do talude de jusante. Figura 2.1. a).

### 2.2.2 Erosão interna associada a alguma estrutura adjacente ao maciço do aterro

Ocorre em zonas de contato entre o aterro e tubulações ou paredes de concreto adjacentes ao aterro onde podem ocorrer diferença de tensões pelo efeito de arco resultante de deformações ou recalques diferenciais e surgir aberturas na interface dos diferentes materiais.

Esses são locais potenciais de ocorrência de erosões internas e também podem ainda estar associados a presença de permeabilidade excessiva resultantes de compactações insuficientes ou inadequadas, por dificuldades de acesso do equipamento compactador.

Foster et al (2000a) citado pelo ICOLD (2017) realizaram extensa pesquisa de incidentes e acidentes em grandes barragens pelo mundo de 1800 a 1986, excluindo barragens construídas na China e em barragens no Japão antes de 1930, da qual concluíram que aproximadamente a metade das rupturas ocorrem por erosão interna no aterro das barragens estão associadas a tubulações embutidas no aterro ou paredes de concreto adjacentes ao aterro da barragem, conforme quadro 2.1

**Quadro 2.1** – Rupturas e acidentes graves em grandes barragens pelo mundo, adaptado de Foster et al, 1998, 2000a, citado pelo ICOLD (2017).

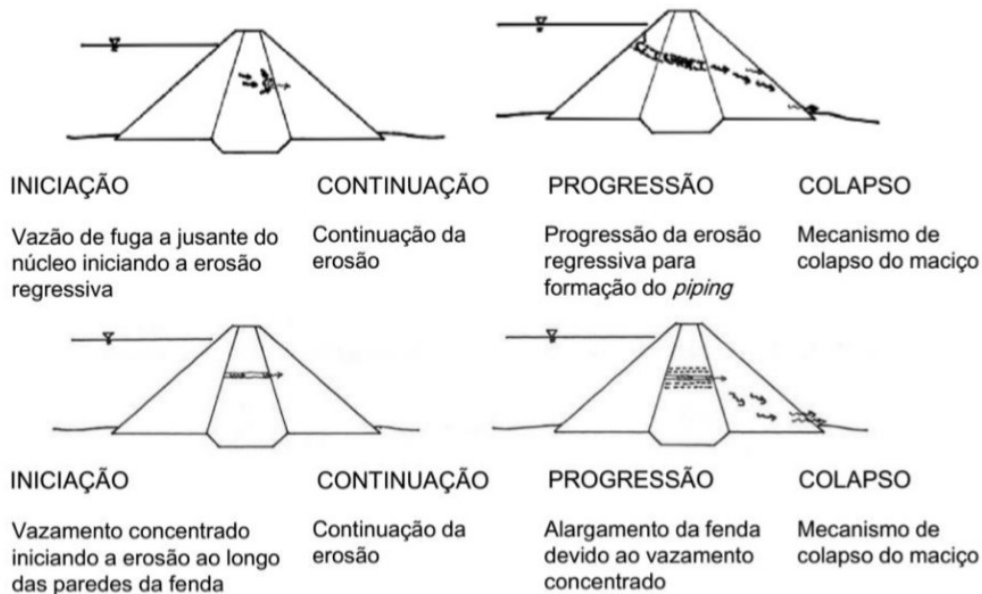
Descrição	Total	Na barragem	Em torno de tubulações embutidas ou adjacentes a muros de concreto
Acidentes por erosão interna	36	19	17
Incidentes por erosão interna	75	52	23
Incidentes com infiltração onde não foram observadas erosões	36	30	6
Total no Número de Incidentes e Acidentes	147	101	46

### 2.2.3 Erosão interna a partir da fundação

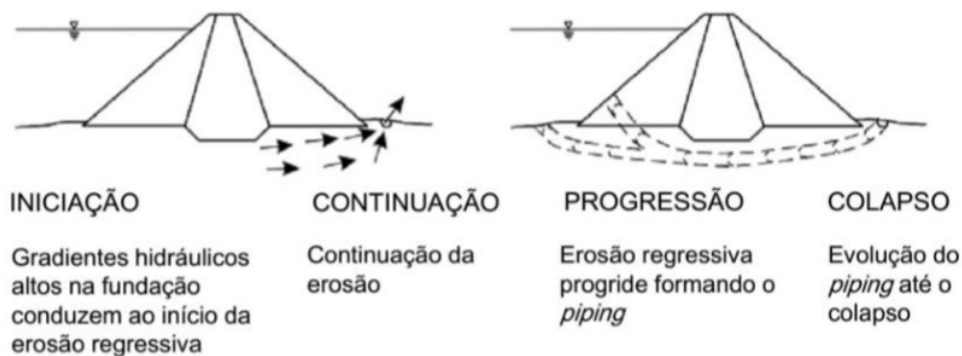
Ocorre quando as forças hidráulicas exercidas pelo fluxo de percolação pela fundação são suficientes para causar a desagregação das partículas de solo e o transporte dessas partículas de solo da fundação através da seção da barragem até a saída na superfície livre à jusante. Figura 2.1. b).

## 2.2.4 Erosão interna do aterro para dentro da fundação

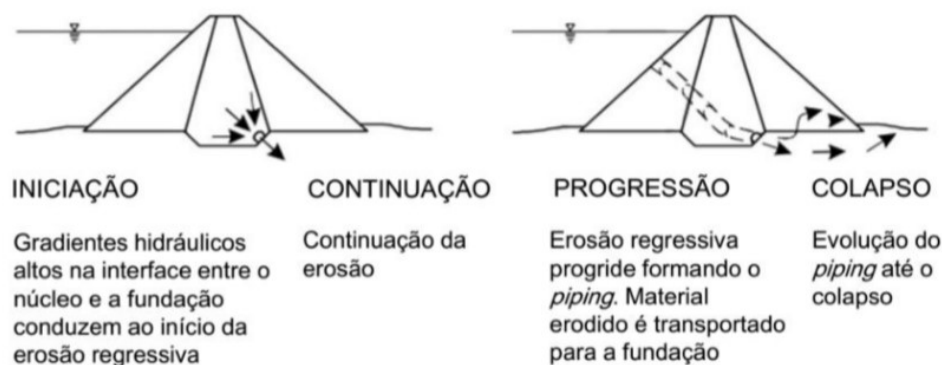
Ocorre quando as partículas de solo desagregadas do maciço do aterro são transportadas pelo fluxo de percolação proveniente do aterro para a fundação ou quando o fluxo de percolação pela fundação resulta na erosão de partículas de solo do aterro no contato aterro/fundação, carreando as partículas de solo provenientes do aterro pela fundação. Figura 2.1. c).



a) Modo de desenvolvimento de rupturas por erosão interna no aterro de uma barragem, iniciadas devido à erosão regressiva e à erosão por percolação concentrada, respectivamente.



b) Modo de desenvolvimento da ruptura por erosão interna através da fundação de uma barragem, iniciada pelo processo de erosão regressiva.



c) Modo de desenvolvimento da ruptura por erosão interna do aterro para fundação de uma barragem, iniciada pelo processo de erosão regressiva.

**Figura 2.1** - Modos de desenvolvimento de rupturas por erosões internas em barragens de terra de Foster e Fell (1999), citado pelo ICOLD (2017).

Foster et al (2000a), citado por Santos e Caldeira (2014), concluíram a partir de análise estatística sobre modos de rupturas conhecidas em grandes barragens pelo mundo, que nos incidentes e acidentes por erosão interna, a incidência através do aterro corresponde a cerca de duas vezes maior em relação a incidência através da fundação e bem maior em relação a incidência do aterro para fundação.

Segundo publicação do U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation - USBR (2007), citado por Silva (2016), sobre os modos de ruptura de barragens e seus respectivos percentuais de ocorrências, os resultados estatísticos de rupturas por erosão interna, que ocorreram em grandes barragens após 1950, corresponde a 54% do total de incidentes e acidentes, sendo que erosões internas através do aterro corresponde a cerca de dez vezes o número de rupturas por erosão interna do aterro para fundação e cerca de duas vezes o total de rupturas por erosão interna pela fundação.

## 2.3 CONCEITOS IMPORTANTES

A seguir são apresentados alguns conceitos sobre propriedades de solos importantes para a compreensão do processo de iniciação das erosões internas.

### 2.3.1 Classificação quanto a graduação do solo

Um solo é constituído fisicamente de partículas granulares de diferentes dimensões. Um solo é considerado bem graduado quando suas partículas apresentam dimensões que se situam dentro de uma ampla faixa de variação, incluindo partículas

graúdas, intermediárias e finas. Quando as dimensões das partículas de solo apresentam frações graúdas e finas e ausência de uma ou mais dimensões intermediárias é denominado de solo de granulometria aberta ou descontínua. Ao passo que solos que contenham apenas algumas frações de medida granulométrica ou uma única fração granulométrica são denominados de solos mal graduados ou solos de granulometria uniforme.

### **2.3.2 Coeficiente de Uniformidade (Cu)**

O Coeficiente de Uniformidade determina numericamente se um determinado solo é ou não uniforme. É definido pela equação:  $Cu = D_{60}/D_{15}$ , onde  $D_{60}$  é o diâmetro tal que 60% do solo em peso tem diâmetros menores e  $D_{15}$  é o diâmetro tal que 15% do solo em peso tem diâmetros menores.

Quanto menor o coeficiente de uniformidade (Cu) mais o solo é uniforme e valores próximo de 1,0 indicam uma curva granulométrica vertical, ou seja, presença de partículas de um único tamanho. Para Cu maior que 15 o solo é considerado não uniforme.

### **2.3.3 Conceito de solos instáveis**

Solos instáveis são aqueles cujas partículas menores podem se deslocar dentro da própria massa de solo sob certas forças impostas nos grãos pelo fluxo de percolação. Os solos instáveis são caracterizados pela sua distribuição granulométrica bem graduada ou granulometria aberta. O fenômeno não requer a presença de fissuras na massa de solo, ou uma superfície livre.

### **2.3.4 Conceito de critério geométrico, critério de tensão e critério hidráulico**

O critério geométrico caracteriza a potencialidade de erosão interna por meio da análise da distribuição granulométrica do solo. O critério de tensão confinante está relacionado a densidade do solo, que está associado a composição granulométrica, a densidade real dos grãos e a presença de vazios na massa de solo e à posição do solo na seção de análise e o critério hidráulico está relacionado a velocidade do fluxo de percolação através da matriz de solo, que ao impor tensões que ultrapassam as tensões confinantes entre as partículas, causam a desagregação das partículas finas do solo e a depender das condições podem carrear-los para jusante.

### **2.3.5 Ruptura de um maciço**

A ruptura de um maciço pode se enquadrar como uma ruptura localizada, que se configura como um incidente onde não há fuga descontrolada de água.

### **2.3.6 Fratura hidráulica**

A fratura hidráulica ocorre no aterro ou fundação de uma barragem quando a pressão exercida pela água (poro pressão ou pressão neutra) igualam a menor tensão principal total confinante da massa de solo ( $\sigma_3$ ) e a tensão efetiva se torna zero, formando a fissura.

### **2.3.7 Efeito de arco**

O efeito de arco é resultante de deformações diferenciais entre zonas adjacentes constituídas de materiais com deformabilidades diferentes, em que há transferências de cargas nas interfaces de contato entre os materiais, em que a zona que sofre o recalque tende a se “pendurar” nas interfaces, resultando na concentração das tensões na interface e redução das tensões na região central daquela zona que sofreu recalque.

### **2.3.8 Argilas dispersivas**

Partículas de argila que se desprendem da estrutura do solo na presença de água, independentemente da existência de fluxo, ficando em suspensão. A característica dispersiva da argila está diretamente relacionada com a sua mineralogia. Em argilas com presença elevada de íons sódio ou cálcio, observado no argilo mineral montmorilonita, facilmente trocáveis na presença de água, tendem a ser dispersivos, enquanto a caulinita e minerais relacionados são não dispersivos. A illita está na condição intermediária entre a montmorilonita e a caulinita.

A dispersão de partículas de argila depende também dos componentes químicos da água. Águas com baixa concentração de sais tendem a ser mais dispersivas e água com alta concentração de sais tendem a suprimir a característica dispersiva de solos suscetíveis.

## 2.4 PRINCÍPIOS DE FORMAÇÃO DE EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA

A erosão interna é um termo abrangente e engloba quatro diferentes princípios de iniciação: erosão de fuga concentrada, erosão regressiva, erosão no contato entre solos e sufusão. A seguir são apresentadas as características de cada um desses princípios de iniciação das erosões internas.

### 2.4.1 Início do processo erosivo por fuga concentrada

Erosão por fuga concentrada ocorre quando há a presença de aberturas no maciço da barragem ou de sua fundação por onde há fluxo de percolação, que são responsáveis em iniciar o processo erosivo de desagregação e arraste das partículas de solo localizadas na superfície da parede da abertura.

Tais fugas concentradas no aterro da barragem podem ter como origem fissuras e trincas transversais, que se formam em solos plásticos e em alguns casos em solos siltsos não saturados.

Os fatores que mais contribuem para a formação de fissuras e trincas em barragens estão relacionados a deformações ou recalques diferenciais no maciço, resultante da consolidação do aterro ou da fundação durante ou após a fase construtiva.

As deformações diferenciais quando não provocam trincas podem resultar em zonas de baixa tensão no maciço, que são propícias a ocorrência de fraturas hidráulicas quando do enchimento do reservatório ou em cenários de cheia.

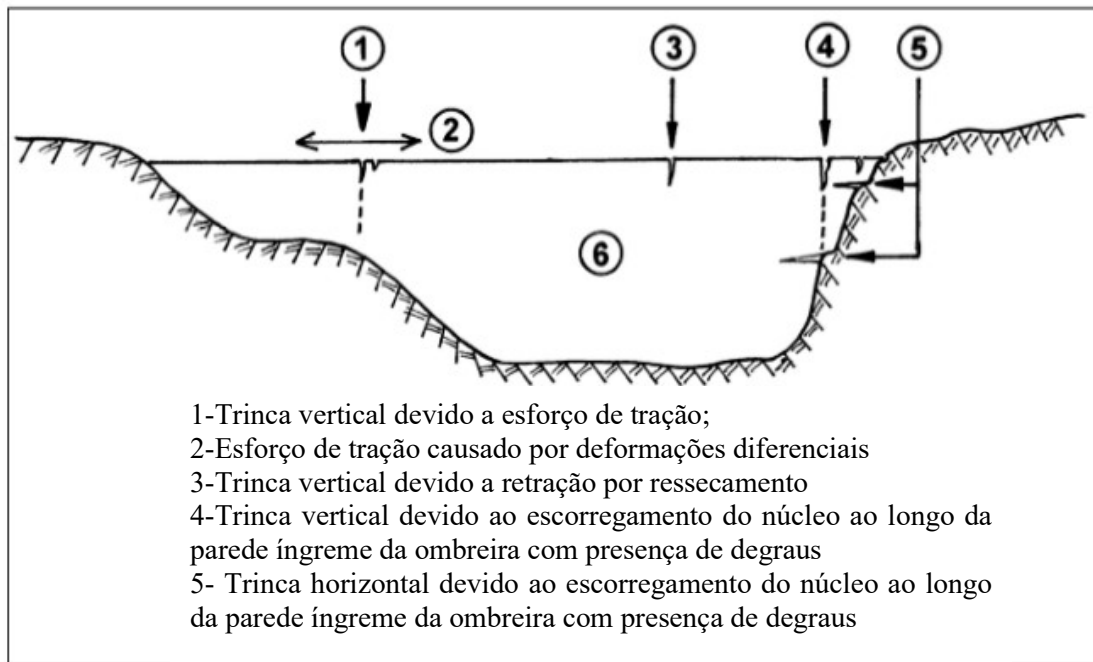
Hunter e Fell (2003), citados pelo ICOLD (2017), identificaram que entre 80 % e 90% das acomodações do aterro, em razão da irregularidade ou variação da superfície da fundação, ocorrem durante a construção, quando se estabelece, na grande maioria dos casos, as tensões internas no maciço.

As figuras 2.2 e 2.3 a seguir apresentam alguns cenários do perfil do vale no qual a barragem está assente, em que ocorrem deformações verticais com possível formação de trincas no aterro da barragem.

A figura 2.2 apresenta um cenário no qual a superfície da fundação nas ombreiras apresenta taludes íngremes e presença de patamares horizontais, que são suscetíveis a ocorrência de recalques diferenciais devido a variações acentuadas na altura do aterro, podendo levar ao surgimento de zonas de baixa tensão, nas quais podem resultar na

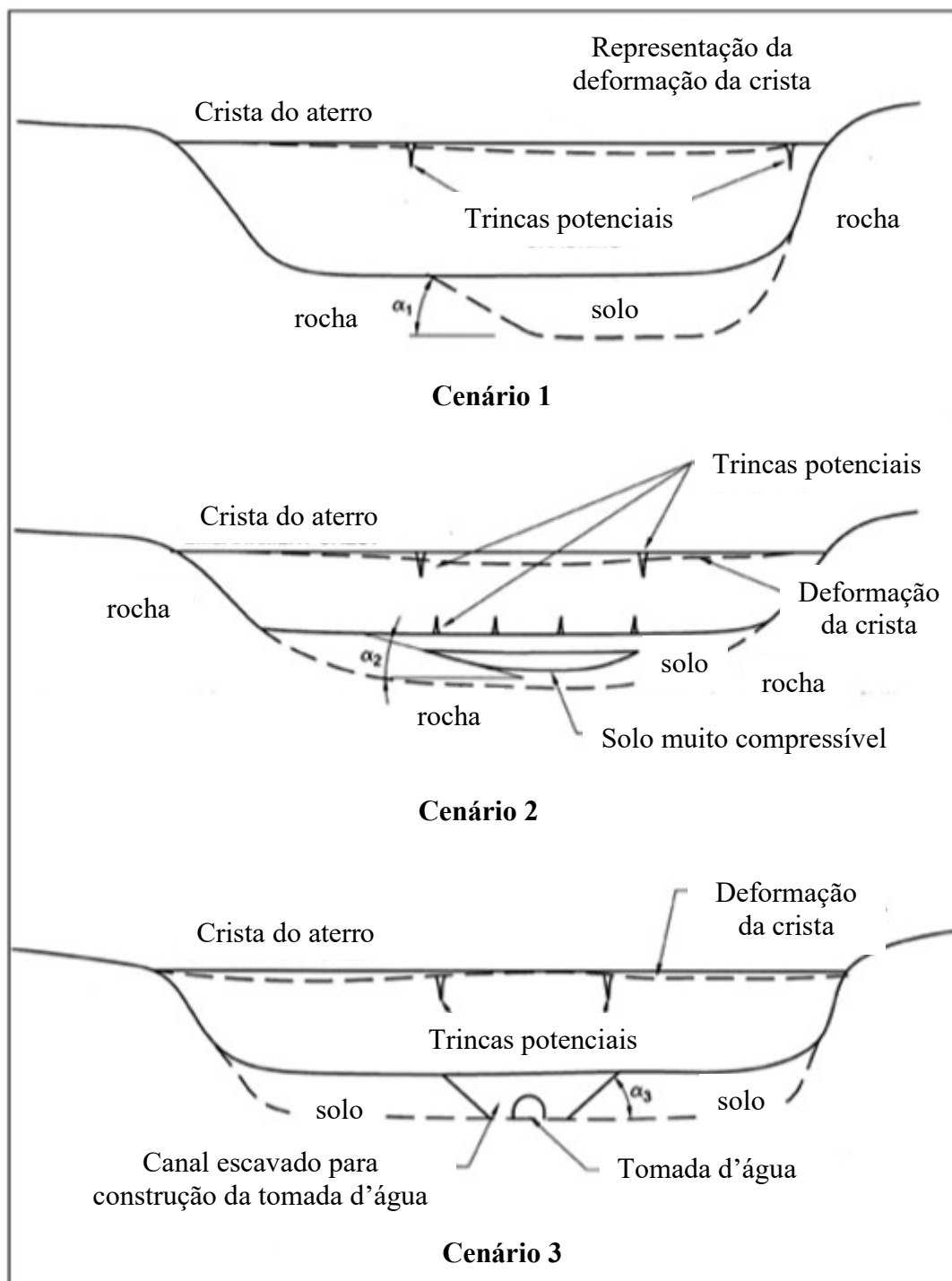
formação de trincas por fratura hidráulica, quando do enchimento ou em cenários de cheia do reservatório.

A figura 2.3 apresenta condições de fundação as quais são prováveis a ocorrência de recalques diferenciais e formação de trincas ou zonas de baixa tensão suscetíveis a fraturas hidráulicas em razão da compressibilidade do solo de fundação ou variação significativa da rigidez entre materiais adjacentes da fundação.



**Figura 2.2** – Situações em que podem ocorrer trincas no aterro em função da superfície da fundação do vale, adaptado do ICOLD (2017).





**Figura 2.3** – Cenários em que podem ocorrer deformações diferenciais no solo da fundação da barragem resultando na formação de trincas no aterro, adaptado do ICOLD (2017).

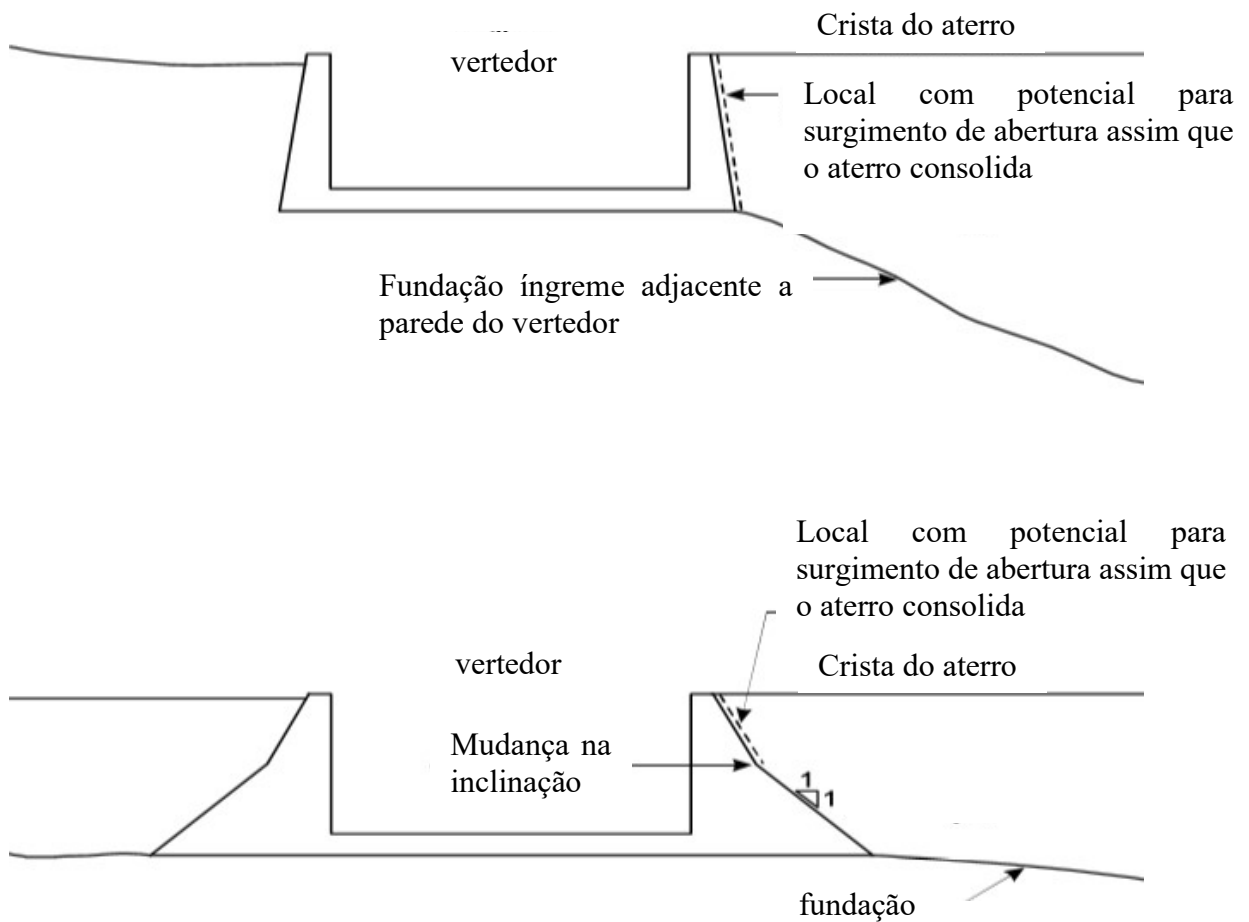
As trincas ainda podem ocorrer por diferentes motivos, quais sejam: por ressecamento de solos coesivos na crista da barragem, por retração de camadas compactadas, que ficam expostas durante a fase construtiva e perdem umidade para o ambiente, em razão dos ciclos de secagem e molhagem, dos ciclos de gelo e degelo, de atividade sísmica, do colapso de camadas de elevada permeabilidade quando saturadas,

de solo mal compactado, ocasionando aumento de vazios, sendo rotas preferenciais de fluxo.

Camadas de solo mal compactadas com elevadas permeabilidades ocorrem com mais frequência adjacentes a tubulações embutidas e nos encontros entre o aterro e muros de concreto ou as ombreiras, conforme mencionado no item 2.2.2..

Isso se dá em razão de dificuldades de acesso do equipamento compactador para compactação nesses locais, gerando zonas de baixa tensão, sujeitas a fraturas hidráulicas e formação de trincas.

A figura 2.4 retrata situações as quais a inclinação do muro do vertedor ou a declividade da fundação adjacente ao muro lateral do vertedor são propícias para ocorrência de acomodação do aterro adjacente ao muro, que podem resultar em aberturas entre o aterro da barragem e o muro do vertedor.

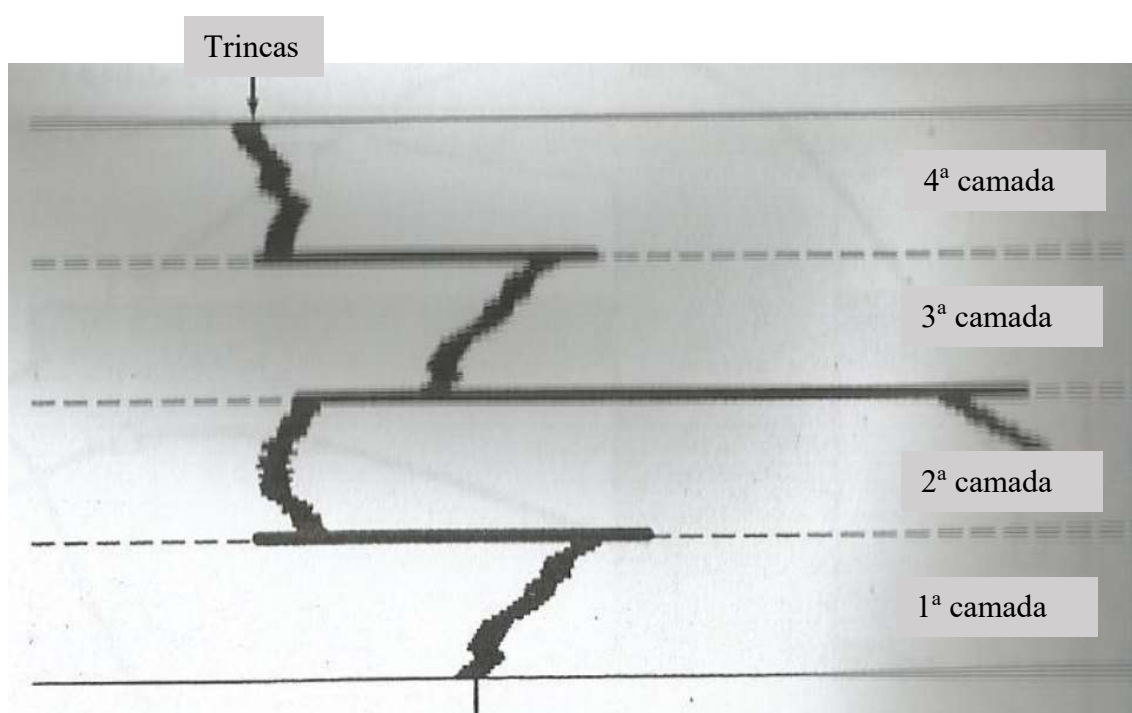


**Figura 2.4** – Situações onde aberturas podem se formar entre o aterro da barragem e a parede de concreto do vertedor, adaptado do ICOLD (2017).

A má compactação do solo também pode ocorrer com menor frequência em camadas do aterro, lançadas com espessuras muito elevadas para uma compactação efetiva do equipamento aplicado no processo de compactação do solo.

Chama-se ainda a atenção para os cuidados requeridos na compactação de camadas de núcleos de barragens, pois formações de juntas construtivas entre as camadas podem aumentar substancialmente a permeabilidade do núcleo, mesmo com as camadas apresentando individualmente baixa permeabilidade. Isso ocorre quando há a interligação de fissuras verticais de retração com juntas horizontais de construção.

A figura 2.5 retrata a condição de trincas horizontais e transversais interligadas entre camadas compactadas do maciço.



**Figura 2.5** – Situação de trincas horizontais e verticais interligadas, adaptado do livro Princípios da Engenharia Geotécnica, adaptado DAS (1941).

Outras ocorrências que também podem resultar em fluxo concentrados no maciço da barragem e que valem a pena serem ressaltadas são a presença de buracos no maciço da barragem devido a ação de animais ou raízes de plantas.

O ICOLD (2017) recomenda avaliar previamente se são prováveis para determinado projeto a formação de trincas no aterro, considerando a presença dos elementos geradores já mencionados. Para auxiliar nessa análise recomenda considerar o Quadro 2.2, adaptado de Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017).

**Quadro 2.2** – Condições nas quais a trinca ou a percolação concentrada no aterro é improvável de ocorrer de Fell et al (2008), citado e adaptado do ICOLD (2017).

<b>Mecanismo de iniciação</b>	<b>Condições em que se pode excluir a possibilidade de Falha</b>
Trinca transversal devido a recalques diferenciais em razão do perfil do vale	Taludes das ombreiras apresentam inclinação inferior a 15° e a altura do aterro é uniforme ao longo do eixo da barragem.
Trinca transversal devido a geometria do vale barrado	Razão entre a largura do vale e a altura da barragem é maior que 2
Trinca transversal devido a recalques diferenciais em razão da característica da fundação abaixo do núcleo da barragem	Não há a presença de solos compressíveis na fundação abaixo do núcleo da barragem
Trincas na crista da barragem devido ao ressecamento	O nível do reservatório se mantém abaixo da profundidade da trinca sob qualquer condição, incluindo cheias extremas
Trincas devido a ações sísmicas	Pico da aceleração sísmica fique abaixo de 0,2g, os taludes das ombreiras apresentam inclinação inferior a 15°, altura uniforme da barragem ao longo da sua extensão e o solo do aterro e da fundação não são suscetíveis a liquefação
Trincas transversais no contato aterro fundação devido irregularidades da superfície da fundação sob o núcleo da barragem	A persistência da irregularidade na superfície da fundação é menor do que a metade da largura da base do núcleo
Camadas do aterro mal compactadas ou com permeabilidade elevadas	O solo foi bem compactado em espessuras menores ou igual a 20 cm com boa documentação e registros de obra, ou seja: Solos plásticos ( $IP > 7$ ), apresentou $GC \geq 98\%$ e o teor de umidade variou entre -2% e +1% em relação a umidade ótima
Camadas mal compactadas ou com permeabilidade elevadas no contato núcleo/fundação	Solo bem compactado sobre uma superfície regular da fundação com boa documentação e registros; ou Superfície da rocha uniforme e regular ou tratada com concreto dental para correção das irregularidades com solo de contato bem compactado; ou Solos da fundação uniformes e bem compactados com boa aderência com a camada de contato e boa compactação da camada de contato
Camadas mal compactadas ou com permeabilidade elevadas na crista devido a ação de congelamento	Clima em que a temperatura não cai abaixo de zero exceto durante a noite ou por um dia ou dois; ou Se o nível do reservatório se mantém abaixo da profundidade da trinca sob qualquer condição, incluindo cheias extremas.

No caso das fundações os caminhos preferenciais de fluxo ocorrem em camadas de solo permeáveis, falhas ou descontinuidades da rocha, fronteiras hidrogeológicas como o contato entre formações ou estratos com permeabilidades diferentes, veios com permeabilidade contrastante do restante da rocha e também podem surgir na interface entre o maciço do aterro e a fundação. Ocorrências de descontinuidades persistentes no sentido montante/jusante na rocha de fundação não podem ser desconsideradas em uma análise de fluxo de percolação.

Nas rochas sedimentares é possível observar a formação de planos de contato, marcando períodos de formações da rocha. Esses planos sub-horizontais são mais suscetíveis a percolação de água e são locais por onde se estabelecem normalmente os processos erosivos, que progridem pelo maciço rochoso. Baixas resistências da rocha agravam esse processo de erosão do maciço.

Para que se inicie o processo de erosão interna por fuga concentrada, duas condições são necessárias: a presença de trincas ou falhas abaixo do nível do reservatório, no maciço do aterro ou fundação, por onde haja fluxo de percolação e a presença de forças hidráulicas capazes de desagregar os grãos componentes do solo ou da rocha e de transportá-los à jusante da barragem através dessas falhas.

Para a erosão progredir e formar “piping” alguns fatores são determinantes, quais sejam:

1. Capacidade de autocicatrização do solo, em fechar ou reduzir as dimensões da trinca, de modo que as forças hidráulicas impostas pelo fluxo de percolação através do caminho preferencial sejam insuficientes para promover a progressão da erosão;
2. Capacidade do solo de sustentar o “teto” da cavidade e manter o aspecto tubular da erosão; e
3. Capacidade das demais zonas da barragem em limitar a continuidade do processo erosivo.

O procedimento para avaliar se a erosão de fuga concentrada irá iniciar em uma trinca ou falha é estimar a tensão hidráulica cisalhante nas paredes da trinca promovida pelo fluxo de percolação através dessa falha, sob determinada condição de carga hidráulica, levando em conta as dimensões e localização da trinca em relação ao nível do reservatório.

Assim, é necessário localizar e estimar a largura e a profundidade de tais trincas ou falhas para verificar se as forças hidráulicas cisalhantes irão exceder a resistência ao

cisalhamento do solo localizado na superfície da parede da trinca ou falha. Caso excedam, o processo erosivo é iniciado.

O ICOLD (2017) recomenda estimar a largura e profundidade de trincas originárias de deformações diferenciais do aterro a partir do método de Fell et al (2008), desenvolvido a partir de observações de trincas.

Em conhecendo a tensão hidráulica cisalhante a mesma deve ser comparada com a resistência do solo localizado na superfície da parede da trinca, considerando o grau de saturação em que se encontra. Deve se levar em conta ainda as propriedades mineralógicas do solo tais como a dispersão e as características químicas da água do reservatório.

Os parâmetros de entrada apresentam certo grau de incerteza e desse modo se deve sempre realizar uma análise de sensibilidade em relação aos parâmetros assumidos.

O processo de erosão interna por fuga concentrada no aterro é mais comum em solos plásticos e coesivos, que são capazes de manter a abertura das trincas, mas podem ocorrer em solos siltosos de graduação ampla.

Para estimar as tensões cisalhantes imposta pelo fluxo de percolação na parede das trincas são recomendadas as equações (2.1) e (2.2) estabelecidas por Fell et al (2008), respectivamente para seções cilíndricas e trincas verticais.

Trincas de seção cilíndrica

$$\tau = \gamma_w \frac{gHD}{4L} \quad (2.1)$$

Trincas do tipo vertical transversal

$$\tau = \gamma_w \frac{gH^2W}{2(H+W).L} \quad (2.2)$$

Onde,

$\tau$  é a tensão cisalhante imposta pelo fluxo em  $N/m^2$ ;  $\gamma_w$  é o peso específico da água ( $kg/m^3$ );  $g$  é a gravidade igual a  $9,8 m/s^2$ ;  $H$  é a perda de carga devido o atrito nas paredes em metros;  $D$  é o diâmetro da seção cilíndrica em metros;  $L$  é o comprimento da falha em metros e  $W$  é a largura da trinca em metros.

A determinação da propriedade erosiva do solo considerando o processo de erosão de fuga concentrada ou da resistência do solo a erosão por fuga concentrada, se dá a partir de ensaios com cilindros rotativos, que permitem determinar a tensão cisalhante crítica,

que ao ser atingida inicia o processo de erosão nas superfícies das paredes laterais das trincas ou falhas.

A taxa de erosão pode ser expressa na forma de um índice denominado de “Hole Erosion Index” -  $I_{HET}$ , resultante do ensaio denominado: “Hole Erosion Test”. Cita-se ainda entre os ensaios mais aplicados o “Jet Erosion Test”.

O índice representativo da taxa de erosão ( $\tilde{I}_{HET}$ ) é o  $I_{HET}$  para solo compactado a 95% da densidade máxima específica na umidade ótima. De acordo com o índice representativo da taxa de erosão ( $\tilde{I}_{HET}$ ) o solo pode ser classificado em seis diferentes grupos, conforme quadro 2.3.

**Quadro 2.3** - Ordem de magnitude do  $\tilde{I}_{HET}$  em escala logarítmica e respectiva velocidade de erosão do solo, citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Wan (2006).

$\tilde{I}_{HET}$	Velocidade de Erosão do solo
<2	Extremamente rápido
2-3	Muito rápido
3-4	Moderadamente rápido
4-5	Moderadamente lento
5-6	Muito lento
>6	Extremamente lento

Na ausência de ensaios de laboratório para determinação do valor do índice representativo da taxa de erosão o mesmo pode ser relacionado às propriedades do solo. O quadro 2.4 foi desenvolvido a partir de dados de ensaios e fornece uma primeira aproximação da provável faixa do índice representativo da taxa de erosão para diferentes solos não dispersivos.

**Quadro 2.4** - Índice representativo da taxa de erosão ( $\tilde{I}_{HET}$ ) associado a classificação unificada dos solos não dispersivos, citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Wan e Fell, (2002)

S.U.C.S.	Descrição do Solo	$\tilde{I}_{HET}$		
		Mínimo	Médio	Máximo
SM	Areias siltosas com menos de 30% de finos	1	<2	2,5
SM	Areias siltosas com mais de 30% de finos	<2	2 a 3	3,5
SC	Areias argilosas com menos de 30% de finos	<2	2 a 3	3,5
SC	Areias argilosas com mais de 30% de finos	2	3	4
ML	Solos siltosos com 50% ou mais de finos e limite de liquidez < 50% com pouca plasticidade	2	2 a 3	3
CL-ML		2	3	4

CL	Solos argilosos com 50% ou mais de finos e limite de liquidez <50% com baixa ou média plasticidade	3	3 a 4	4,5
CL-CH		3	4	5
MH	Solos siltosos plásticos com 50% ou mais de finos e limite de liquidez > 50%	3	3 a 4	4,5
CH	Solos argilosos com 50% ou mais de finos e limite de liquidez <65% com alta plasticidade	3	4	5
CH	Solos argilosos com 50% ou mais de finos e limite de liquidez >65% com alta plasticidade	4	5	6

A tensão cisalhante crítica pode ser associada ao índice denominado de “Hole Erosion Index” -  $I_{HET}$ . Estimativas aproximadas e prováveis intervalos da tensão cisalhante crítica ( $\tau_c$ ), apresentados no quadro 2.5 têm sido utilizados com cautela, quando não se tem disponíveis valores resultantes de ensaios do “Hole Erosion Test”.

**Quadro 2.5** –Prováveis intervalos da tensão cisalhante crítica ( $\tau_c$ ) associado ao “Hole Erosion Index” ( $\tilde{I}_{HET}$ ), citado pelo ICOLD (2017) e adaptado de Fell et al (2008).

Hole Erosion Index ( $\tilde{I}_{HET}$ )	Tensão Cisalhante Crítica ( $\tau_c$ ) medido em Pa			
	Solo com comportamento não dispersivo		Solo com comportamento dispersivo	
	Melhor estimativa	Provável Intervalo	Melhor estimativa	Provável Intervalo
< 2	2	1 a 5	1	0,5 a 2
2 a 3	2	1 a 5	1	0,5 a 2
3,5	5	2 a 20	2	1 a 5
4	25	10 a 50	5	2 a 10
5	60	25 a 100	5	2 a 10
6	100	60 a 140	5	2 a 10

Alguns pontos importantes devem ser ressaltados a respeito da tensão cisalhante crítica de solos. O primeiro é que é melhor executar uma série de ensaios do Hole Erosion Test, variando a carga hidráulica para determinação do  $I_{HET}$  do que confiar nas aproximações indicadas nos quadros 2.4 e 2.5. O segundo ponto a ser ressaltado é a influência do grau de saturação do solo e o efeito da dispersão no índice de resistência a erosão do solo.

Assim, o grau de saturação do solo, a composição mineralógica do mesmo e a composição química da água do reservatório são parâmetros importantes a serem observados ao avaliar a probabilidade de ocorrência de erosão por fuga concentrada.

Fell et al (2005), citado pelo ICOLD (2017), observou que os solos mais suscetíveis a erosões internas por fuga concentrada são aqueles, com percentual limitado



de grãos de argila com a presença de montmorilonita, apenas para garantir certa plasticidade ao solo. Já solos plásticos com presença acima de 50% de argila com comportamento dispersivo apresentam melhor performance que o anterior, provavelmente por apresentarem maior resistência a erosão e maior probabilidade de expansão na presença de água, ocasionando o fechamento ou a redução na dimensão das trincas.

Sherard et al (1976), citado pelo ICOLD (2017), observou que solos cujo percentual de dispersão obtido em ensaios de laboratório é maior do que 50 % são suscetíveis a rupturas por dispersão em barragens enquanto aqueles solos que apresentaram valores menores que 15% nos ensaios, não são suscetíveis a rupturas quando empregados em barragens.

Ressalta-se que observações de campo podem indicar o potencial dispersivo do solo, como a presença de ravinas e erosões profundas em taludes de pequenas barragens e em taludes de cortes em rodovias.

Como ordem de grandeza das informações do quadro 2.5, tem-se que para um gradiente hidráulico médio de 0,5 em uma trinca com 2mm de largura a tensão hidráulica cisalhante é da ordem de 5 Pa, que conforme quadro 2.5, seria o suficiente para igualar a tensão cisalhante crítica do solo dispersivo ou de um solo com  $I_{HET}$  menor que 3 e iniciar um processo de erosão interna por fuga concentrada.

#### **2.4.2 Início do processo erosivo por erosões regressivas**

As erosões regressivas iniciam com a desagregação dos grãos de solo na superfície livre à jusante e progridem de jusante para montante. São principalmente associadas a erosões na fundação contudo, em alguns casos, podem ocorrer no aterro da barragem iniciando à jusante do núcleo. Nos dois casos estão associados à presença de solos não coesivos.

Uma terceira maneira de erosão regressiva pode ocorrer de jusante para montante em barragens de enrocamento com face de concreto, em razão de ocorrência de cheias durante a construção, antes da conclusão da laje de concreto na face de montante, ou falhas na vedação da laje de montante.

As erosões regressivas em fundações arenosas do tipo “piping” se inicia na superfície livre à jusante do pé da barragem e progride através de múltiplos pequenos canais na fundação em direção à montante. Em fundações arenosas o início da erosão

regressiva é frequentemente verificado pela presença de “sand boils” na superfície livre à jusante da barragem.

Uma vez que há presença de “sand boil” à jusante é provável que o gradiente crítico no pé do talude tenha sido excedido e a erosão regressiva irá progredir a menos que o gradiente hidráulico seja reduzido.

Para manter a estabilidade do teto da erosão de forma tubular, geralmente observada nesse tipo de mecanismo, é necessário que haja uma camada coesiva acima do solo de fundação, que tenha capacidade de sustentar o vazio logo abaixo, pode ser uma camada confinante do solo da fundação, constituída de solo coesivo ou o próprio solo do aterro da barragem ou dique.

O ICOLD (2017) considera que erosões regressivas em fundações se formam quando ocorrem gradientes hidráulicos críticos no pé do talude de jusante da barragem, capazes de desagregar as partículas de solo formando pequenos canais de erosão onde a velocidade do fluxo pode carrear as partículas erodidas.

O processo de formação de erosões regressivas em fundações arenosas de diques e barragens é regido pelo gradiente hidráulico crítico e foi descrita por Van Beek et al (2012b) em seus experimentos realizados em modelos de grandes escalas.

Van Beek et al (2012b), citado pelo ICOLD (2017), observaram que no início do processo há um rearranjo dos grãos com movimento de grãos individualmente e a formação de pequenos canais. O processo alcança o equilíbrio para a carga hidráulica aplicada e uma quantidade muito pequena de grãos de areia são transportadas. Com o aumento da carga hidráulica para a carga hidráulica crítica, partículas de areia são transportadas continuamente e “sand boils” são observados a jusante, alcançando o gradiente hidráulico crítico. O fluxo muito pouco aumenta nesta fase do processo e à medida que a carga hidráulica se torna maior que a carga hidráulica crítica a erosão não cessa e essa taxa de carreamento passa a ser da ordem de  $\text{dm}^3/\text{h}$ .

Assim que o “piping” alcança a face de montante ocorre o surgimento de pressão no canal e o alargamento do “piping” desenvolve de montante para jusante. O fluxo e o transporte da areia até a saída não aumentam significativamente de imediato. O processo de alargamento leva alguns dias e quando está quase alcançando a face de jusante o transporte de areia e o fluxo aumentam repentinamente. A situação aparente à jusante pode mudar de “sand boils” para essa condição bruscamente. A ruptura ocorre assim que o estágio de alargamento se torna completo.

O ICOLD (2017) relata que a experiência americana e europeia com erosões regressivas do tipo “*piping*”, em barragens ou diques sobre solos aluvionares, são na sua maioria em fundações onde o solo erodido apresenta partículas de areia com dimensões que variam entre pequena a média e coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) menor que 3.

Terzaghi e Peck (1948), citado pelo ICOLD (2017), mostram que a erosão regressiva inicia quando partículas do solo não coesivo localizadas no pé de jusante do dique ou da barragem, onde as tensões confinantes são mais baixas, se soltam ou a tensão efetiva se iguala a zero.

Este fenômeno ocorre quando se tem fluxo ascendente em que a poropressão ou pressão neutra se iguala a tensão total e o gradiente hidráulico crítico é expresso pela equação 2.3.

$$i_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (2.3)$$

Onde  $i_c$  é o gradiente hidráulico crítico,  $\gamma_{sat}$  é o peso específico saturado da areia e  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

Particularmente nos Estados Unidos o critério de Terzaghi tem influência dominante em projetos de diques e barragens sobre solos aluvionares e o método concentra em evitar a soltura ou elevação de grãos do solo localizados à jusante, no pé do dique ou da barragem. Assim, são frequentemente empregados uma camada de solo coesivo confinante sobre a camada de solo aluvionar da fundação e o dimensionamento da extensão desse tapete confinante à montante e à jusante é determinado para que o gradiente hidráulico não alcance valores críticos no pé da barragem, que resultariam no desprendimento de partículas de areia.

O U.S. Army Corps of Engineers (USACE) utiliza um modelo simplificado para analisar essa condição. A carga hidráulica sob o tapete impermeável à jusante do pé da barragem é estimada da seguinte forma:

$$h_0 = \frac{L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \cdot h \quad (2.4)$$

Para que os grãos de areia se soltem ou sejam elevados para superfície à jusante da barragem a carga hidráulica ( $h_0$ ) deve se igualar a carga hidráulica crítica ( $h_c$ ).

$$h_c = Z_{tj} \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \quad (2.5)$$

Onde,  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  são respectivamente o comprimento do tapete impermeável de montante, o comprimento da base da seção da barragem e o comprimento do tapete impermeável de jusante em metros.  $h_0$  e  $h$  são os níveis da pressão hidrostática a jusante no pé da barragem e a montante em metros.  $Z_{cj}$  é a espessura do tapete impermeável a

jusante em metros e  $\gamma_{sat}$  e  $\gamma_w$  são o peso específico do solo saturado confinante e da água respectivamente.

$L_1$  e  $L_3$  são calculados a partir da raiz quadrada da razão entre o coeficiente de permeabilidade horizontal do solo aluvionar e o coeficiente de permeabilidade vertical do solo confinante, multiplicados pelas espessuras da cama aluvionar da fundação e da camada confinante à montante e jusante respectivamente, ver equações 2.6 e 2.7.

$$L_1 = \sqrt{\frac{k_{hf}}{k_{vc}}} \cdot Z_{cm} \cdot d_f \quad (2.6)$$

$$L_3 = \sqrt{\frac{k_{hf}}{k_{vc}}} \cdot Z_{cj} \cdot d_f \quad (2.7)$$

Onde  $L_1$  é o comprimento do tapete impermeável de montante em metros,  $k_{hf}$  é o coeficiente de permeabilidade horizontal do solo da fundação,  $k_{vc}$  é o coeficiente de permeabilidade vertical da camada confinante,  $Z_{cm}$  é a espessura da camada confinante à montante,  $Z_{cj}$  é a espessura da camada confinante à jusante e “d” é a espessura da camada da fundação.

A experiência do USACE, citado pelo ICOLD (2017), órgão norte americano que divide a responsabilidade com estados e municípios na manutenção de diques, registra centenas de “sand boils” em diques sobre fundações aluvionares, contudo são poucos os casos de formação de brecha por erosão regressiva na fundação. Isto se deve aos serviços de monitoramento e aos esforços em conter os “sand boils” quando detectados. Costuma-se, nesses casos, construir anéis com saco de areias em volta dos “sand boils” como barreira para interromper o fluxo de areia à medida que se reduz a carga hidráulica, mas não o fluxo de água.

Nestes casos o uso de filtro invertido também se apresenta como uma solução adequada, pois eleva a carga hidráulica crítica necessária à formação do fenômeno e passaria a reter possíveis grãos de areia carregados.

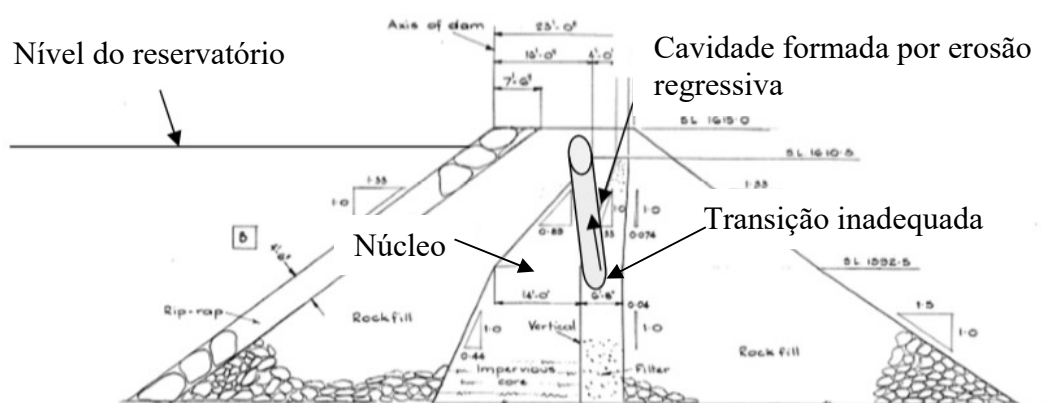
Glynn et al (2012), citado pelo ICOLD (2017), realizou análises estatísticas dos locais de ocorrências de “sand boils” e descobriu que os parâmetros mais significativos em relação aos locais das ocorrências são: as condições geológicas, a espessura das camadas confinantes, o tamanho efetivo dos grãos do solo aluvionar e pontos com histórico de ocorrências de “sand boils”.

Sills e Vroman (2007), citado pelo ICOLD (2017), sugerem que nesses locais com histórico de ocorrências de “ sand boils” durante as cheias, caso não sejam executadas intervenções após a detecção do fenômeno, pode resultar no aumento progressivo da

probabilidade de novas ocorrências, pois se os vazios não são preenchidos após iniciado o “piping”, ocorre o incremento contínuo do coeficiente de permeabilidade do solo, o que reduz o gradiente necessário para reiniciar a erosão regressiva em novos eventos de cheia.

No caso do maciço da barragem, para que o processo de erosão regressiva do tipo “piping” ocorra e se desenvolva internamente, o solo deve ser não plástico. Portanto, é necessária uma condição de superfície livre à jusante do núcleo da barragem onde a erosão possa iniciar, como no caso de barragens com ausência de filtro ou filtro inadequado no contato entre o núcleo e a transição. Após o início do processo de erosão regressiva o núcleo ou algumas camadas do núcleo devem ser capazes de manter a estabilidade do teto sem colapsar para que o “piping” progrida. No momento em que o solo contíguo ou acima da cavidade inicial estabelecida pela erosão regressiva torna instável e colapsa nas primeiras formações de “piping”, ocorre o que se denomina de erosão regressiva global. Se o colapso se mantém na direção sub-vertical há a formação de “sinkhole” ou cavidade tipo chaminé no núcleo da barragem.

Barragens com núcleos esbeltos e paredes verticais com inclinação elevada ou com taludes com inclinação parcialmente elevada apresentam potencial para erosão regressiva global em não sendo adequadamente protegidos por filtros ou zonas de transições. A erosão inicia a partir da superfície à jusante do núcleo e a progressão é assistida por força gravitacional, onde há a formação do “piping” sub-vertical, independente da presença de camada de solo coesivo, conforme observado na figura 2.6.



**Figura 2.6** - Representação gráfica do modo de ruptura por erosão regressiva global, adaptado do ICOLD (2017), que resulta na formação de cavidade sub-vertical no núcleo.

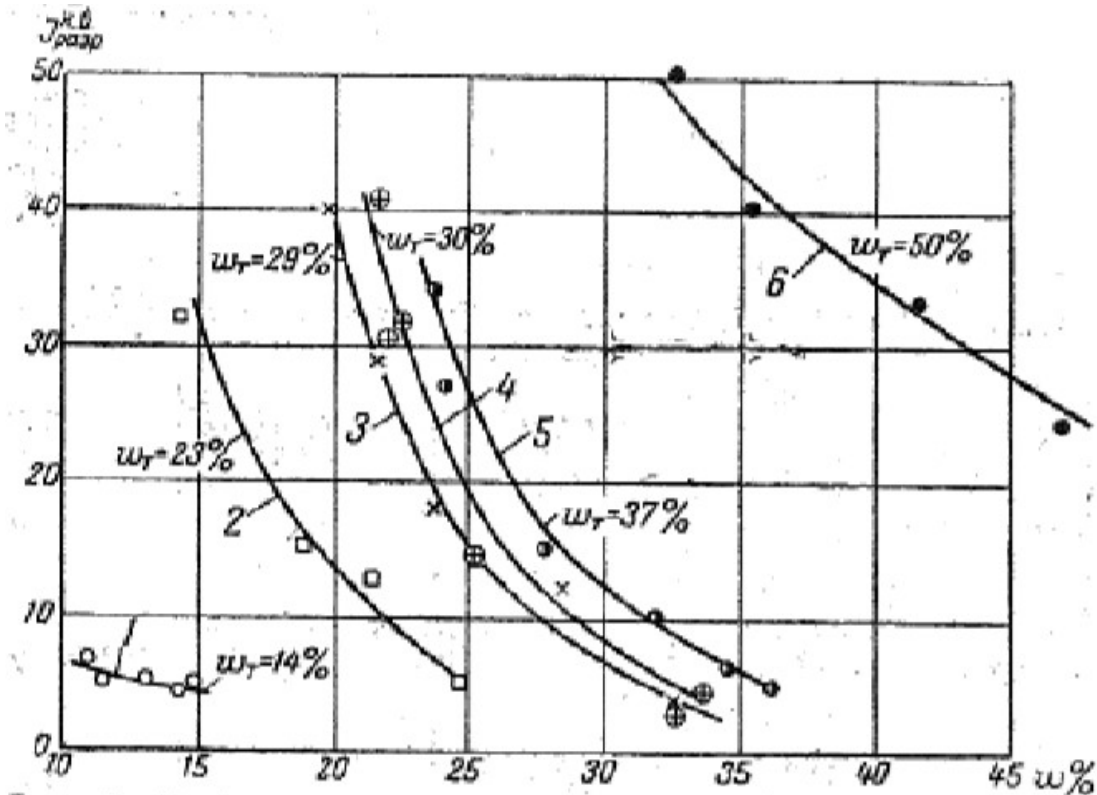
A ocorrência de erosão regressiva global em núcleos de barragens frequentemente está associada a gradientes hidráulicos elevados. Ressalta-se que para variações comuns de gradientes hidráulicos em barragens ou suas fundações a erosão regressiva são

provavelmente restritas a solos não plásticos ou com baixa plasticidade, exceto se o núcleo é constituído de material sujeito a instabilidade (gradação ampla ou descontínua) ou em situações em que haja a presença de grandes cavidades em contato com o núcleo.

De maneira prática, Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017), concluíram, baseados em resultados disponíveis de testes de instabilidade interna e com base em suas experiências e julgamentos, que solos com índice de plasticidade maior que 7 ( $IP > 7$ ) não estão sujeitos a erosões regressivas para as variações previstas de gradiente hidráulico em barragens e suas fundações.

O laboratório de testes de Sun (1989), Marot et al (2007) e Bendahmane et al (2008), citados pelo ICOLD (2017), confirmaram que erosões regressivas podem ocorrer em solos mais coesivos, contudo sob circunstâncias de gradientes hidráulico muito altos, incomuns de ocorrerem em barragens ou suas fundações.

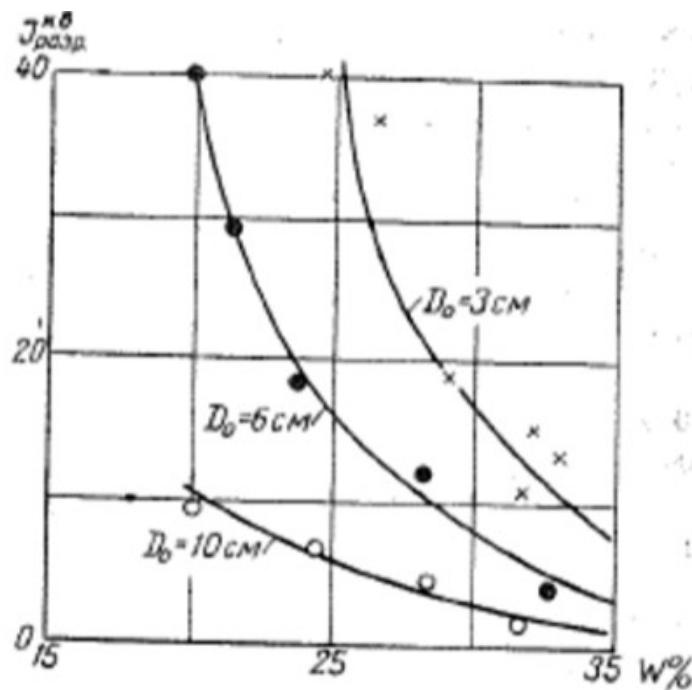
Istomina (1957), citado pelo ICOLD (2017), relatou os resultados de gradiente hidráulico crítico obtidos em laboratório, para ocorrência de erosão regressiva em buracos de 6 centímetros de diâmetro, realizados em amostras de argilas compactadas em diferentes teores de umidade e cujos limites de liquidez variavam entre 14 e 50. Os resultados são apresentados de forma gráfica, conforme se observa na figura 2.7.



**Figura 2.7** - Resultados dos ensaios do gradiente hidráulico crítico para erosão regressiva em furo de 6 cm de diâmetro em amostras de argila de diferentes Limites de Liquidez, adaptado do ICOLD (2017).

Nota-se no gráfico da figura 2.7, representado na abcissa pelo teor de umidade da amostra o resultado do gradiente hidráulico crítico obtido para o início da erosão regressiva, onde se observa que quanto maior o teor de umidade e menor o limite de liquidez da amostra menor o gradiente hidráulico crítico.

Para uma argila com limite de liquidez de 29% foram repetidos os ensaios variando o diâmetro do furo entre 3 cm e 10 cm, tendo sido observado que o gradiente hidráulico crítico reduziu significativamente, de 19 para 3, para um teor de umidade igual ao limite de liquidez do solo, conforme se observa na figura 2.8.



**Figura 2.8** – Resultados dos ensaios do gradiente hidráulico crítico para erosão regressiva em furos variando entre 3 cm e 10 cm em amostras de argila com Limite de Liquidez de 29%, adaptado do ICOLD (2017).

O ICOLD (2017) cita os resultados de ensaios de Marot et al (2007) e Bendahmane et al (2008), que ensaiaram solos argilosos, e Sail et al (2011), que ensaiaram solos não plásticos de granulometria descontínua, com 40% passante na peneira # 200 (0,075 mm), os quais observaram que algum movimento de partículas começavam com gradiente hidráulico próximo de 5.

Ensaaios em solos glaciais realizados para barragem australiana, citados pelo ICOLD (2017), mostraram, ver figura 2.6, que para fluxo vertical em cavidades a erosão regressiva em solos bem graduados não coesivos iniciou com gradiente igual a 9, a erosão progrediu por 40 dias com gradiente igual a 5 e poderia ter alcançado a condição de ruptura sem a elevação do gradiente se os ensaios tivessem sido prolongados.

Essa última experiência evidencia o efeito do tempo nesse tipo de erosão regressiva, que aparentemente pode se desenvolver de forma muito lenta.

Cruz (1996) realizou em uma série de amostras de solos argilosos compactados, que continham na base aberturas desde 0,5 cm até 3 cm e submeteu os mesmos a percolação de água com gradientes entre 2 e 10.

Depois de alguns meses formou-se uma calota esférica no local da abertura, que permaneceu estável durante todos os meses em que a percolação de água foi mantida, concluindo que a resistência à erosão dos solos argilosos pode ser explicada por teorias que consideram a ação das tensões de tração.

Cruz (1996) conclui ainda que o ensaio se realizou seguindo os procedimentos adequados de preparação e compactação das amostras, que não refletem o comportamento de um maciço de uma barragem sujeito ao “piping”, que é regido pela estatística dos extremos, isto é, a resistência a tração ou coesão do solo, que condicionará ao início da erosão por “piping” em uma barragem ocorrerá naquele local de maior fragilidade em razão de um problema de origem.

### **2.4.3 Início do processo erosivo por erosão interna de contato**

Erosões de contato ocorrem quando duas camadas, uma de solo de granulometria grossa e outra de solo de granulometria fina, estão em contato direto e há a presença de fluxo de percolação paralelo ao contato entre as camadas. O fluxo ocorre pela camada de solo com presença de agregado graúdo e a erosão se dá pela desagregação dos grãos do solo fino na região de contato e o carreamento pelos vazios do solo de granulometria grossa.

Assim, para que haja erosão de contato dois critérios devem ser atendidos, o critério geométrico o qual os vazios do solo de granulometria grossa devem ser grandes o suficiente para a passagem dos grãos do solo de granulometria fina e o critério hidráulico o qual a velocidade do fluxo de percolação através do solo graúdo seja elevada o suficiente para desagregar e transportar as partículas da camada de solo de granulometria fina, através do solo de granulometria mais grossa.

É mais provável que erosões de contato ocorram em locais com altas velocidades de fluxo de percolação nas camadas de solos constituídos por agregados graúdos e em que haja uma grande amplitude granulométrica entre as camadas de solos adjacentes, nos quais o critério de filtro não é atendido.

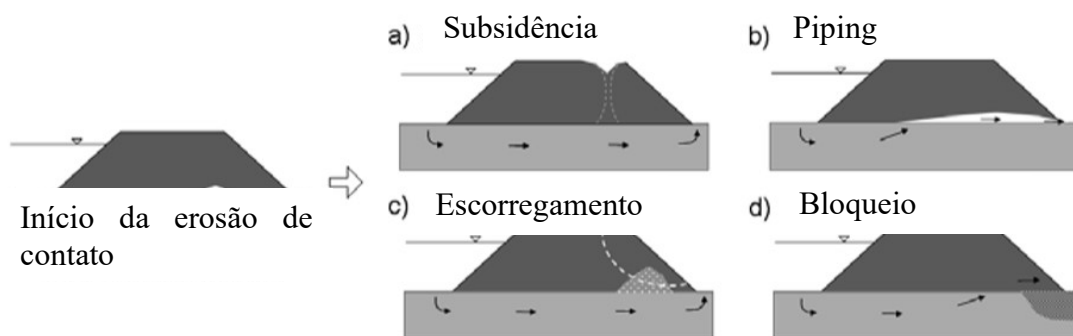


Estas características frequentemente ocorrem em camadas de cascalho aluvionar presentes na fundação em contato direto com o núcleo da barragem, onde o fluxo pela fundação através do cascalho aluvionar pode iniciar o processo de desagregação das partículas finas do solo do núcleo da barragem na interface entre as camadas.

Em alguns casos, a erosão interna de contato, que se inicia na interface entre o solo constituído por agregado graúdo e o solo fino pode progredir para a formação de subsidência, causada pelo colapso progressivo do solo fino do núcleo ou do aterro da barragem de solo homogêneo até a crista da barragem.

O processo de formação da subsidência se dá pela perda de tensão confinante da camada superior em razão da cavidade localizada logo abaixo após a erosão do solo da camada inferior, onde assim que há a queda do material do “teto” da cavidade o fluxo de infiltração diminui e progressivamente vai se reconstituindo carreando lentamente o material colapsado e então o novo teto da cavidade é descomprimido e a cavidade segue progredindo praticamente como uma chaminé em direção a crista ou a face de montante, ver figura 2.9 a).

Outra possível consequência da erosão de contato é não haver o colapso da camada localizada logo acima da cavidade, devido a capacidade do solo sustentar o “teto” da cavidade, o que pode resultar no início de uma erosão regressiva por piping, ver figura 2.9 b). A terceira possibilidade é a perda de estabilidade do talude da barragem, ver figura 2.9 c) e a quarta possibilidade seria o bloqueio da camada permeável pelo volume significativo de finos carregados com o aumento da poro pressão a qual pode resultar em fluxo ascendente à jusante e fratura hidráulica, ver figura 2.9 d).



**Figura 2.9** - Consequências da erosão de contato indicada por Beguin (2011) em camadas permeáveis da fundação sob barragens com baixa permeabilidade, adaptado do ICOLD (2017).

Alguns autores, citados pelo ICOLD (2017), estudando erosões de contato em solos específicos identificaram com base em resultados experimentais, que o critério de filtro é atendido para valores de  $D_{15}/d_{85}$  (razão da graduação entre os solos adjacentes) abaixo do limite inferior observado na coluna 3 do quadro 2.6, independentemente da carga hidráulica, e a erosão de contato pode não ocorrer. Para valores de  $D_{15}/d_{85}$  maiores que os limites superiores observados na coluna 5 do quadro 2.6 o carregamento hidráulico controla a erosão de contato e não há nenhum efeito de filtro dos finos. No intervalo estabelecido entre esses valores limites ocorre algum nível do efeito de filtro, que inibe parcialmente a formação do processo erosivo de contato. Desse modo, para que se inicie a erosão de contato, são necessárias cargas hidráulicas mais elevadas do que as necessárias no domínio exclusivo da influência hidráulica, quando não há filtragem alguma dos finos.

Os autores observaram que próximo a condição limite do critério de filtro, coluna 5 do quadro 2.6, o carregamento hidráulico para iniciar a erosão está aumentando e no cenário oposto, distante da condição limite do critério de filtro, o carregamento hidráulico é constante.

**Quadro 2.6** - Domínio do efeito de filtro e do carregamento hidráulico no processo erosivo de contato, adaptado do ICOLD (2017).

	Razão da graduação dos solos $D_{15}/d_{85}$				
Brauns (1985) Solo com $n^1 = 0,4$	Condição Geométrica	7,5	Condição Geométrica e Hidráulica	25	Condição hidráulica
Worman (1992) Solo com $D_{15}^2=0,88D_H^3$				14,6	
Den Adel et al (1994) Solo com $d_{85}^4=d_{50}/0,9$		8,1		11,7	

O ICOLD (2017) destaca que diferentes autores que tem estudado erosão de contato propuseram expressões para determinação da velocidade crítica na condição de domínio hidráulico de solo graúdo permeável sobre solo fino não coesivo.

Para maioria desses autores a velocidade de percolação determinada pela lei de Darcy tem sido adotada como um bom indicador do carregamento hidráulico, pois a

<sup>1</sup> n é a porosidade do solo.

<sup>2</sup>  $D_{15}$  é o diâmetro do solo constituído por agregado graúdo o qual 15% do solo em peso é mais fino.

<sup>3</sup>  $D_H$  é o diâmetro efetivo do solo constituído por agregado graúdo, estabelecido pela equação 2.10.

<sup>4</sup>  $d_{85}$  é a dimensão das partículas do solo mais fino o qual 85% do solo em peso é mais fino.

velocidade crítica não depende significativamente da permeabilidade do solo graúdo para iniciar a erosão e está relacionada somente com a resistência a erosão do solo fino.

Braun's (1985), citado pelo ICOLD (2017), estudando erosão de contato na configuração de solos finos não coesivos localizadas sob camadas de solos graúdos definiu a velocidade crítica pela expressão 2.8.

$$V_{crit} = 0,65n_g \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}} g d_{50} \quad (2.8)$$

Onde  $n_g$  é a porosidade do solo graúdo,  $\gamma_s$  e  $\gamma_w$  são respectivamente a densidade do solo fino e da água em (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>) e  $d_{50}$  é o diâmetro médio extraído da curva granulométrica do solo fino.

Guidoux et al (2010) citado pelo ICOLD (2017) conduziram alguns testes de erosão de contato cujo solo base eram siltes e argilas e adaptaram a equação de Braun's (1985) com a inserção de um parâmetro empírico, que leva em consideração a parcela das forças de coesão entre os grãos.

$$V_{crit} = 0,65n_g \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}} g d_H \cdot \left(1 + \frac{\beta}{d_H^2}\right) \quad (2.9)$$

O parâmetro empírico  $\beta$  é em função das propriedades coesivas do solo base, definida como  $5,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .

Os estudos consideram na determinação da velocidade crítica a substituição do  $d_{50}$  pelo diâmetro efetivo do solo base ( $d_H$ ), em caso de solos bem graduados ou de granulometria descontínua, definido pela equação 2.10.

$$d_H = \left(\sum_i^n \frac{P_i}{d_i}\right)^{-1} \quad (2.10)$$

Onde  $P_i$  é a percentagem em peso para o diâmetro  $d_i$  na curva granulométrica do solo.

Deve-se ressaltar que a condição hidráulica para erosão de contato depende da configuração considerada. No caso de solos finos não coesivos localizados abaixo da camada de solo graúdo a velocidade crítica de Darcy determinada em experimentos resultou em intervalos entre 0,01 m/s e 0,1 m/s. Os valores mínimos de velocidade se deram para carreamento de grãos de areia da ordem de 0,1 mm.

Um ponto importante observado nos estudos na condição de solos finos não coesivos sobre camadas de cascalho é que as velocidades críticas medidas foram da mesma ordem de magnitude que na configuração inversa (solos finos sob camadas de

cascalho), indicando que para as condições de ensaio, o início da erosão era dependente do transporte dos grãos e não da sua desagregação.

Deve se ressaltar, contudo, a influência da tensão confinante na velocidade crítica as quais para tensões totais de confinamento mais altas tendem a apresentar valores maiores para iniciar a erosão.

O ICOLD (2017) destaca que os estudos de erosão de contato os quais resultaram em equações para determinação da velocidade crítica não podem ser aplicados para vários solos coesivos, os quais exibem diferentes comportamentos relativos às erosões, que não estão vinculados ao diâmetro dos grãos do solo, mas a outras propriedades particularmente mais relevantes tais como a mineralogia da argila e o grau de saturação.

#### **2.4.4 Início do processo erosivo por erosão interna por sufusão**

A sufusão ocorre em solos não coesivos bem graduados ou com granulometria descontínua tais como os solos da figura 2.10, nos quais a presença das partículas finas é menor que a necessária para preencher os vazios formados entre as partículas mais graúdas e se dá quando as partículas finas são transportadas sob forças impostas pelo fluxo de percolação de água através dos vazios formados entre as partículas graúdas.

Nesse caso somente as partículas mais finas são transportadas permanecendo as partículas graúdas do solo e toda a tensão efetiva é transferida para a matriz pétreo de agregado graúdo remanescente.

Para que ocorra a sufusão as dimensões das partículas finas do solo devem ser menores que os vazios formados entre as partículas constituídas por agregado graúdo intertravados, que formam o esqueleto pétreo básico da camada de solo e a velocidade de percolação através da matriz do solo precisa impor uma tensão suficientemente alta para superar a tensão confinante entre as partículas e para mover as partículas finas do solo através das partículas maiores do mesmo solo.

O percentual da fração de finos dos solos mal graduados é definido pelo ponto de inflexão da curva de distribuição granulométrica. O percentual de finos adequado pode ser alcançado quando se obtém a máxima densidade desse solo, ou seja, os vazios da estrutura pétreo, entre as partículas do agregado graúdo, são totalmente preenchidos pelas partículas finas. Em situações em que há excesso de finos o esqueleto pétreo não é formado ou o agregado graúdo não estará em contato entre si, ficando disperso entre as

partículas finas. Nestes casos o solo não está sujeito a sufusão, contudo são vulneráveis a erosão regressiva global.

O ICOLD (2017) ressalta que se deve reconhecer que os solos potencialmente sujeitos a sufusão são também potencialmente sujeitos a segregação granulométrica durante a construção.

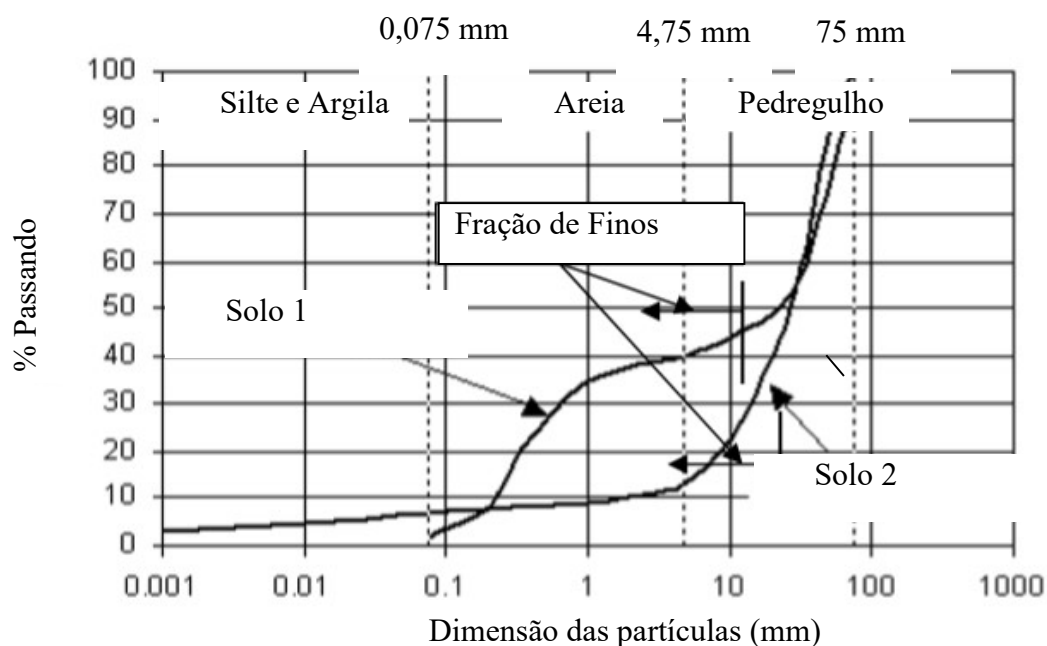
Deve ser observado que a segregação granulométrica de solos não coesivos de granulometria descontínua ou bem graduado é um problema que precisa ser cuidadosamente controlado durante a construção, pois mesmo que a média granulométrica do solo seja adequada, com percentuais de finos e grãos equilibrados granulometricamente, a segregação granulométrica durante a execução pode criar camadas internamente instáveis e sujeitas a sufusão.

Nestes casos, práticas inadequadas de execução, como lançamento do solo na praça de trabalho de grandes alturas do caminhão, ausência de controle na operação de pilhas de estocagem do material, lançamento do solo na praça na condição seca, dependendo ainda de ser umedecido e homogeneizado, sujeitam o solo com presença de agregados grãos à segregação granulométrica das partículas.

A título de exemplo, solos aluvionares do tipo cascalho arenoso ou cascalho areno siltoso com presença de partículas cujo diâmetro máximo ultrapassa 75 mm e com percentual de areia passante na peneira de malha # 4,75 mm menor que 40% estão mais sujeitos a segregação granulométrica e a ocorrência de sufusão.

Wan e Fell (2004c, 2007), citado pelo ICOLD (2017), sugerem que solos bem graduados entre 22 % e 33 % do total em peso correspondente a fração de finos (passante na peneira # 4,75 mm) e solos de granulometria descontínua entre 29 % e 38% do total em peso correspondente a fração de finos (passante na peneira # 4,75 mm) são potencialmente instáveis e estão sujeitos a sufusão.

A figura 2.10 apresenta a curva de distribuição granulométrica de dois solos internamente instáveis sendo o solo 1 de granulometria descontínua e o solo 2 grosseiramente graduado com um caudal nas frações mais finas. Observe a marcação dos pontos de inflexões na curva de distribuição granulométrica, que indicam a fração fina do solo (passante na peneira # 4,75 mm).



**Figura 2.10** - Tipos de solos de graduações granulométricas potencialmente instáveis e sujeitos à sufusão, adaptado do ICOLD 2017.

A sufusão resulta primeiro no aumento da permeabilidade, maior velocidade de percolação mesmo abaixo de gradientes hidráulicos potencialmente elevados, acelerando o processo e podendo resultar no carreamento de uma grande quantidade de finos, que podem causar o entupimento a jusante, bloqueando a passagem de água, podendo resultar em poro pressões elevadas, que podem causar fraturas hidráulicas no aterro.

A sufusão ocorrendo no núcleo da barragem ou na fundação da barragem pode conduzir a alguma deformação/abatimento do aterro. Os solos potencialmente sujeitos a sufusão são aluviões com granulometria descontínua, solos coluvionares bem graduados, saprólitos bem graduados resultantes do intemperismo da rocha e drenos internos de barragens bem graduados contendo um percentual excessivo de finos.

Para propósitos práticos Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017), concluiu com base em dados disponíveis que solos com índice de plasticidade  $IP > 7$  podem ser considerados não sujeitos a sufusão para condições de gradientes usualmente esperados em barragens e respectivas fundações. Se por alguma razão particular o gradiente é maior do que 4 então solos com  $IP \leq 12$ , em uma aproximação conservativa, podem ficar sujeitos a sufusão.

Wan e Fell (2004c, 2007), citado pelo ICOLD (2017), verificaram que solos internamente instáveis foram erodidos com gradientes hidráulicos acima de 0,8 ou menos,

em vários testes a erosão ocorreu para gradientes menores que 0,3. Constataram ainda uma tendência geral em solos com alta porosidade e soltos começarem a erodir para gradientes menores que 0,3 e que na presença de finos plásticos, gradientes mais altos são requeridos para iniciar a erosão.

Adel et al (1988), citado por Li (2008), que por sua vez foi citado por Silva (2016), testaram três solos utilizados em obras de proteção de encostas e diques na Holanda, para simularem as condições de campo foi ensaiado em laboratório uma amostra de 105 cm confinada por uma malha com nenhuma sobrecarga aplicada, que foi submetida a um fluxo unidirecional aplicado segundo uma direção horizontal. Os resultados obtidos sugerem gradientes hidráulicos da ordem de 0,7 para iniciar a erosão em solos estáveis e de 0,16 a 0,17 para iniciar a erosão em solos instáveis.

Existem inúmeros métodos disponíveis para determinar se o solo é sujeito a sufusão, desenvolvido a partir de critérios geométricos ou hidráulicos e, sugere-se que seja utilizado aquele em que o solo em estudo se assemelha mais ao solo considerado no desenvolvimento do método. Dadas as incertezas dos métodos, pode ser necessária a execução de ensaios específicos no solo em estudo quando envolve decisões importantes do uso de determinado material.

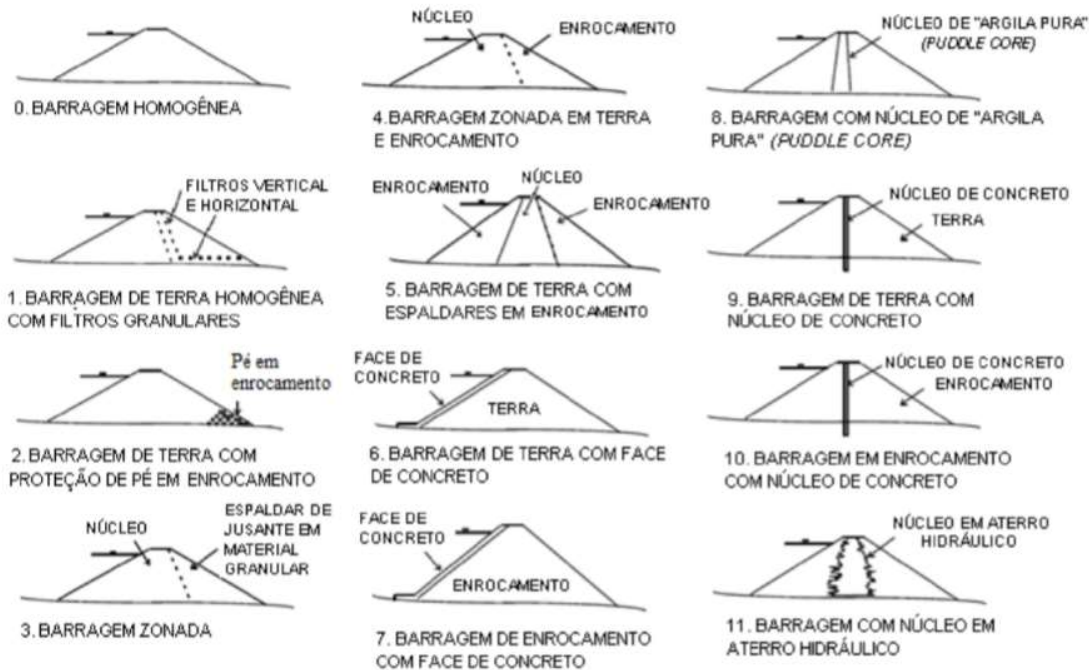
## 2.5 FATORES RELACIONADOS À CONTINUIDADE DE EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA

A continuidade da erosão interna em maciços de barragens, cujo início se deu por um dos princípios apresentados nos itens 2.4.1 a 2.4.4, depende das características da barragem, que está associada a presença ou não de filtro ou zona de transição localizados em locais vulneráveis da barragem e às propriedades do filtro/transição.

No caso de barragens de terra homogêneas, fig. 2.11 0), em que tenha iniciado o processo de erosão interna no maciço do aterro, não haverá barreiras que impeçam a continuidade do arraste de partículas de solo e a erosão interna tende a continuar, a não ser que as forças de arraste sejam reduzidas.

Barragens de terra que dispõem de zoneamento adequado com a conjugação da zona de vedação a montante e zona de drenagem a jusante e estejam providas de filtros posicionados em zonas de transição vulneráveis, projetados segundo critérios modernos de dimensionamento podem evitar a continuidade do processo de erosão interna no maciço do aterro.

A figura 2.11 a seguir relaciona alguns tipos de barragens segundo o zoneamento do aterro e o quadro 2.7 agrupa essas barragens em função da capacidade de prover controle às erosões internas considerando a presença ou não de filtros e as estatísticas de acidentes e incidentes de Foster et al (2000a), citado pelo ICOLD (2017).



**Figura 2.11** – Alguns tipos de zoneamentos de aterros de barragens Foster et al (1998), citado por Filho (2013).

**Quadro 2.7** – Classificação da probabilidade de erosões internas associado ao zoneamento do aterro da barragem Foster et al (1998), citado por Filho (2013).

Tipo / Categoria de maciço (ver Figura 3.3)	Probabilidade de ocorrência de erosão interna	Controle de erosão interna
Barragem homogênea (0)	A. Alta	Pouco ou nenhum controle
Barragem de terra com proteção de pé em enrocamento (2)		
Barragem zoneada (3)	B. Moderada	Algum controle, a depender dos materiais do maciço e da eficiência do filtro
Barragem zoneada de terra e enrocamento (4)		
Barragem com núcleo de "argila pura" ( <i>puddle core</i> ) (8)		
Barragem com núcleo em aterro hidráulico (11)	C. Baixa	Controle moderado, a depender da eficiência do filtro e dos dispositivos em concreto
Barragem de terra com face de concreto (6)		
Barragem de enrocamento com face de concreto (7)		
Barragem de terra com núcleo de concreto (9)		
Barragem em enrocamento com núcleo de concreto (10)	D. Muito baixa	Bom controle, a depender de boa qualidade de projeto e construção do maciço e filtros
Barragem de terra homogênea com filtros granulares (1)		
Barragem de terra com espaldares em enrocamento (5)		



Santos (2014) destaca que os filtros que não satisfaçam adequados critérios de dimensionamento ou que tenham sofrido segregação durante a construção podem conduzir à continuação do processo de erosão interna.

O ICOLD (2017) recomenda seguir algumas etapas para avaliação da continuidade ou interrupção da erosão interna em barragens e verificar a probabilidade de continuidade da erosão.

As etapas recomendadas são: reunir informações disponíveis das curvas granulométricas do material do núcleo, da fundação e dos materiais de filtro em potencial (material do espaldar de jusante, algum filtro ou material de transição), avaliar se o material da região de filtro em potencial tem capacidade de manter aberta trincas e fissuras (critérios modernos de filtro requerem a presença de menos de 5% de finos não coesivos passante na peneira # 0,075mm), avaliar também se o material nas regiões de filtro em potencial são sujeitas a cimentação (mais comum em solos provenientes de rochas calcáreas e dolomíticas), avaliar se o material da região de filtro em potencial está sujeito a segregação granulométrica, de acordo com sua distribuição granulométrica, avaliar se o material da região de filtro em potencial são internamente instáveis, checar, por critérios modernos de dimensionamento de filtros, se os materiais da região de filtro em potencial são capazes de proteger o solo base e evitar a continuidade da erosão e finalmente verificar se o material da região de filtro em potencial é suficientemente permeável para cumprir com eficiência a função de drenar o fluxo de percolação.

Assim sendo, são destacadas a seguir cinco propriedades principais do filtro, que governam sua capacidade de conter erosões, quais sejam:

- 1) Retenção. O filtro é capaz de reter as partículas do solo base o qual protege de erosões;
- 2) Auto filtração ou estabilidade. O material do filtro é estável e não está sujeito a movimentação de partículas finas dentro do próprio solo;
- 3) Não coesivo. O material do filtro não é capaz de sustentar trincas devido a cimentação ou presença de finos no solo, que apresentem plasticidade;
- 4) Drenagem. O filtro é suficientemente permeável para drenar a percolação de água através do solo base encaminhando para drenos a jusante;
- 5) Resistencia. O filtro transfere as tensões internas da barragem sem que seus grãos quebrem e se tornem mais finos.

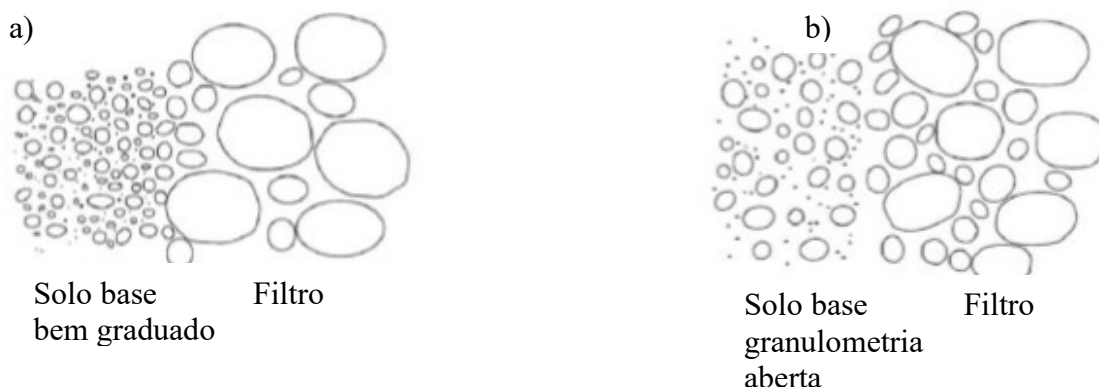
### 2.5.1 Critério de retenção do filtro

O conceito básico do conceito de retenção do filtro é projetar o filtro para que seus vazios sejam suficientemente pequenos para prevenir a erosão do solo base, conforme critério geométrico  $D_{15}/d_{85}$ . Onde  $D_{15}$  é o diâmetro da peneira na qual 15% em peso do material do filtro passam e  $d_{85}$  é o diâmetro do solo base estabelecido pela peneira na qual 85% em peso do solo passam.

O critério geométrico para dimensionamento de filtros foi desenvolvido por Terzaghi (1922) e considera  $D_{15}/d_{85} \leq 4$ , para qualquer situação. Mais tarde, com os resultados dos ensaios de Bertram (1940) passou-se a fixar em 5 a relação de diâmetro e, o critério de filtro evoluiu para  $D_{15}/d_{85} \leq 5$  e é considerado muito conservativo para solos de base finos e nada conservativo para solos de base constituído de agregados graúdos.

O critério geométrico mais moderno de dimensionamento de filtros, desenvolvido por Sherard e Dunnigan (1989), o qual posteriormente, Foster e Fell (1999a, 2001) incluíram no método de Sherard e Dunnigan (1989) a análise de solos dispersivos, sugerindo algumas alterações nos limites considerados por estes, tem sido utilizado para desenvolver guias de projetos tais como o USDA-SCS (1994) e USBR (2004).

O critério desenvolvido por Sherard e Dunnigan (1989) separa os solos de base em quatro grupos e para os solos do grupo 1, 2 e 4, considera no dimensionamento do filtro apenas o material do solo que passa na peneira de # 4,75 mm. Este procedimento é necessário para evitar problemas com solos de base de graduação aberta, que não são auto filtrantes, ver figura 2.12.



**Figura 2.12** – Solo base e Filtro, adaptado do ICOLD (2017)

A figura 2.12 a) mostra um solo de base bem graduado de granulometria contínua, o qual as partículas mais graúdas previnem a erosão das partículas mais finas. A figura

2.12 b) representa um solo de base de granulometria descontínua, com ausência dos grãos de dimensão intermediária.

Na situação da figura 2.12 b) o solo de base não é auto filtrante e os grãos finos irão erodir através dos grãos maiores do solo. Nessa situação o filtro deve ser capaz de controlar a erosão dos grãos mais finos do solo de base, diferente da situação 2.12 a) em que o solo de base dispõe de uma certa capacidade de auto filtração e o filtro pode ser dimensionado para reter as partículas maiores do solo de base.

O critério de Sherard e Dunnigan (1989) segue os seguintes passos para o dimensionamento dos filtros:

Solos do grupo 1, siltes e argilas com mais de 85% em peso passante na peneira de #0,075mm, da porção menor que 4,75 mm, filtro deve atender o seguinte critério  $D_{15} < 9.d_{85}$ .

Solos do grupo 2, siltes arenosos, solos argilosos e siltosos e areias argilosas entre 40% e 85% em peso passante na peneira de #0,075mm, da porção menor que 4,75 mm, filtro deve atender o seguinte critério  $D_{15} \leq 0,7$  mm.

Solos do grupo 3, areias, areias argilosas e siltosas e cascalhos arenosos com 15% ou menos de finos, considerando a porção menor que 4,75 mm. O critério de filtro para o projeto deve atender a relação  $D_{15} < 4.d_{85}$ , onde  $d_{85}$  é o diâmetro em que 85% de todo o material é mais fino, incluindo o agregado retido na peneira de # 4,75 mm.

Solos do grupo 4, solos intermediários entre os grupos 2 e 3, onde entre 15% e 40% passam na peneira de malha #0,075mm, considerando a porção menor que 4,75 mm. Nesses casos o material do filtro deve ser projetado através da interpolação linear entre os valores obtidos pelos critérios dos solos do grupo 2 e 3, conforme equação 2.11.

$$D_{15} = \frac{40 - \% \text{ finos}}{40 - 15} (4 \cdot d_{85} - 0,7) + 0,7 \quad (2.11)$$

Foster e Fell (1999a, 2001) acrescentaram nas análises de Sherard e Dunnigan (1989) ensaios com amostras de solos dispersivos e com os resultados obtidos, sugerem, para esses solos, filtros mais finos, aplicando  $D_{15} < 6.d_{85}$  para solos do grupo 1,  $D_{15} \leq 0,5$  mm para solos do grupo 2 e o deslocamento do limite que separa os solos do grupo 2 e 4 de 40% para 35% de material fino passante na peneira # 0,075mm.

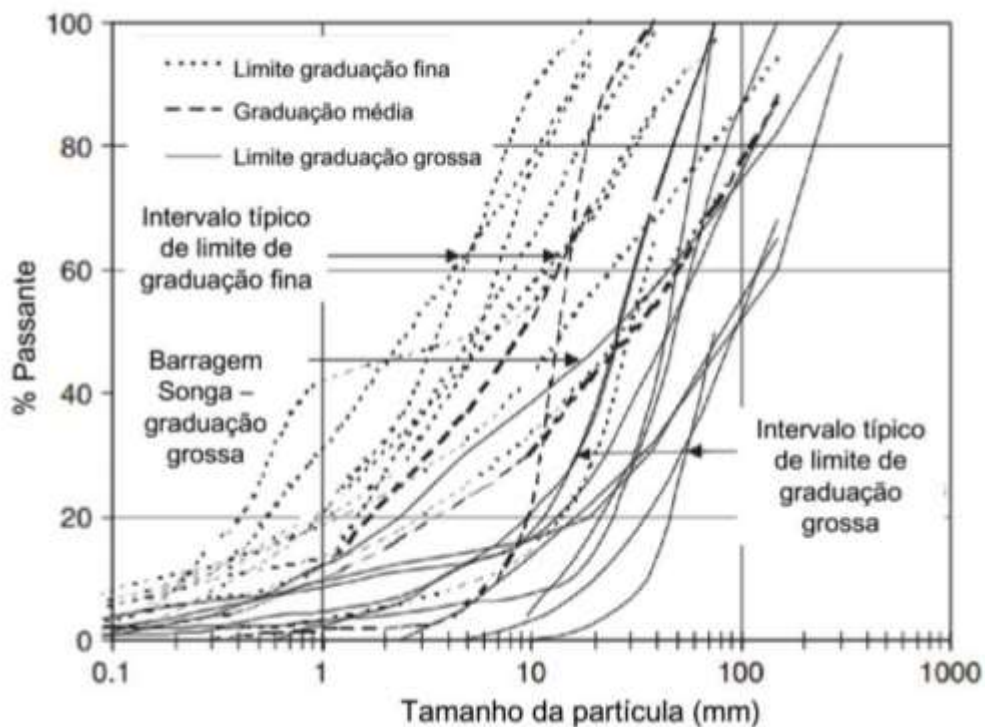
### 2.5.2 Critério de auto filtração ou estabilidade

O critério de auto filtração estabelece que os filtros devem ser internamente estáveis e não podem ser suscetíveis a sufusão, ou seja, a fração mais grossa do material do filtro deve reter a sua fração mais fina.

### 2.5.3 Critério de uniformidade

O critério de uniformidade assegura que a granulometria dos filtros seja suficientemente uniforme para minimizar a possibilidade de ocorrência de segregação durante a estocagem, manuseio e aplicação do material.

A figura 2.13 de Fell et al (2015), citado por Silva (2016), apresenta graduações de filtro ampla com presença de material graúdo e baixo percentual de granulometria média (areia), responsáveis por reter o material fino, tornando-os suscetíveis a segregação durante o manuseio e potencialmente instáveis.



**Figura 2.13** – Curvas Granulométricas de filtros de baixo desempenho, adaptado de Fell et al (2015), citado por Silva (2016).

## 2.5.4 Critério quanto a coesão

O critério quanto a coesão trata da capacidade do material fino em manter ou não fissuras. Santos e Caldeira (2014) afirmam que os filtros devem ser constituídos de materiais granulares que não formam fissuras, mesmo em zonas adjacentes ao núcleo onde esse possa ter sofrido fissuração.

Critério de projetos de filtros modernos requerem menos de 5% de material fino, passante na peneira nº 200 ( $d=0,075$  mm), na composição granulométrica do filtro e que esse material fino não deva ser plástico.

O material usado na construção de filtros também não deve conter grãos suscetíveis a cimentação, que podem ocorrer se o filtro é composto de grãos de rochas carbonáticas, particularmente na fração média de areia.

Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017), sugeriu o critério apresentado no quadro 2.8 para balizar análises de probabilidade do material de solo manter uma trinca.

**Quadro 2.8** – Probabilidade do Filtro com Excessiva Presença de Finos Manter uma Trinca (Fell et al, 2008 citado pelo ICOLD, 2017).

Plasticidade do Material Fino (pp #200)	Percentual de finos passando na peneira # 200 (0,075 mm)	Probabilidade de sustentar a trinca	
		Material compactado	Material não compactado
Não plástico (não há presença de cimentação)	5%	0,001	0,0002
	7%	0,005	0,001
	12%	0,05	0,01
	15%	0,1	0,02
	>30%	0,5	0,1
Plástico ou suscetível a cimentação	5%	0,05	0,02
	7%	0,1	0,05
	12%	0,5	0,3
	$\geq 15\%$	0,9	0,7

## 2.5.5 Critério de drenagem

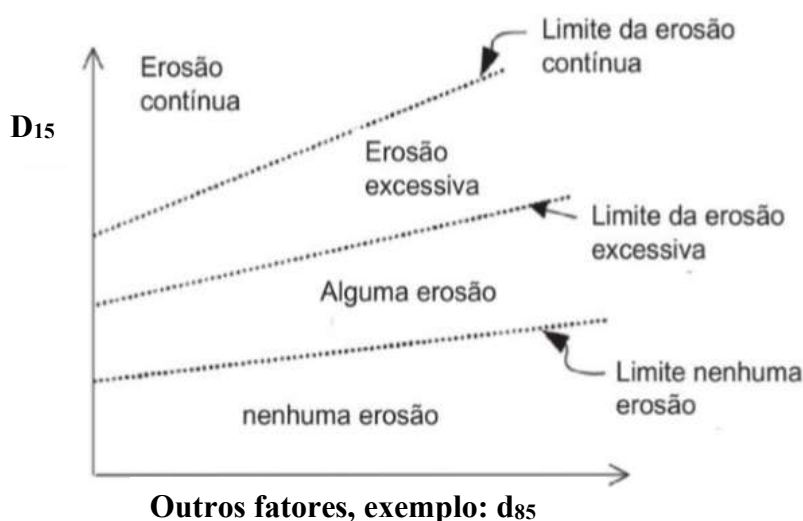
O conceito básico do projeto de drenagem do filtro é projetá-lo para que seus vazios sejam suficientes para permitir o livre escoamento da percolação de água através do solo base, que é alcançado limitando o percentual de finos e considerando o critério geométrico  $D_{15}/d_{15} \geq 5$ .

## 2.5.6 Filtros ou transições em barragens que não atendem a critérios modernos

Barragens existentes nas quais os filtros ou transições existentes não atendem a critérios modernos de dimensionamento e o material apresenta uma curva granulométrica acima da requerida, podem reunir condições de realizar um desempenho adequado após alguma erosão do solo de base.

Foster e Fell (1999a, 2001), citado pelo ICOLD (2019), a partir de análise estatística dos resultados de ensaios laboratoriais de não erodibilidade de filtro (NEF -No Erosion Filter), conhecido por “Pinhole test”, realizados por Sherard e Dunningan (1989) e a partir de testes adicionais de filtro, utilizando equipamento de teste similar aos ensaios NEF, denominado de testes de Filtro com Erosão Contínua (CEF-Continuing Erosion Filter), desenvolveram o conceito dos limites da erosão interna para classificação de filtros constituídos de material mais graúdo, que não satisfazem critérios modernos de dimensionamento, mas que podem eventualmente selarem.

A figura 2.14 representa esse conceito dos limites de erosão para classificação dos comportamentos dos filtros.



**Figura 2.14** - Conceito de limites de erosão do filtro (Foster,1999), Foster e Fell (2001) citado pelo ICOLD (2017) e por Silva (2016).

Conforme observado na figura, são apresentadas várias situações observadas nos ensaios. A situação de *nenhuma erosão* corresponde aquela em que a interface do filtro foi vedada, sem a ocorrência praticamente de qualquer erosão do solo base (menos de 10 gramas de material erodido do solo base em caso de solo pouco coesivo e nenhuma erosão visível para solos coesivos durante os ensaios). A situação de *alguma erosão* corresponde aquela em que antes da vedação da interface do filtro ocorreu alguma erosão no solo base

(entre 10 gramas e 100 gramas de material erodido do solo base pouco coesivo). A situação de *erosão excessiva* correspondeu aquela em que a vedação do filtro ocorreu somente após excessiva erosão do solo base (mais de 100 gramas de material erodido). Finalmente, a situação de *erosão contínua* corresponde aquela em que o material do filtro é muito graúdo para permitir que os grãos erodidos do solo base possibilitem a vedação do filtro em algum momento, permitindo assim, a ocorrência de erosão irrestrita.

Foster e Fell (1999a, 2001) propuseram o critério do quadro 2.9 para limites de erosão excessiva e erosão contínua.

**Quadro 2.9** – Critério de Erosão Excessiva e Contínua Foster e Fell (1999a, 2001), citado pelo ICOLD (2017).

Solo Base <sup>5</sup>	Critério proposto para delimitação da Erosão Excessiva	Critério proposto para delimitação de Erosão Contínua
Solo com $d_{95} < 0,3$ mm	$D_{15} > 9d_{95}$	Para todos os solos $D_{15} > 9d_{95}$
Solo com $0,3 < d_{95} < 2$ mm	$D_{15} > 9d_{90}$	
Solo com $d_{95} > 2$ mm e teor de finos $> 35\%$	$D_{15} > D_{15}$ que proporciona uma perda de $0,25$ g/cm <sup>2</sup> no ensaio CEF	
Solo com $d_{95} > 2$ mm e teor de finos $< 15\%$	$D_{15} > 9d_{85}$	
Solo com $d_{95} > 2$ mm e teor de finos entre 15-35%	$D_{15} > 2,5 D_{15}$ de projeto, onde: $D_{15}$ de projeto = $(35 - pp\% \cdot 0,075$ mm). $((4 d_{85} - 0,7) / (35 - 15)) + 0,7$	

Foster e Fell (1999a, 2001), citado pelo ICOLD (2017), sugerem, a partir de informações de casos históricos, o máximo potencial de infiltrações internas de filtros de baixa performance, provenientes do fluxo de fuga de água, que podem se desenvolver devido ao piping.

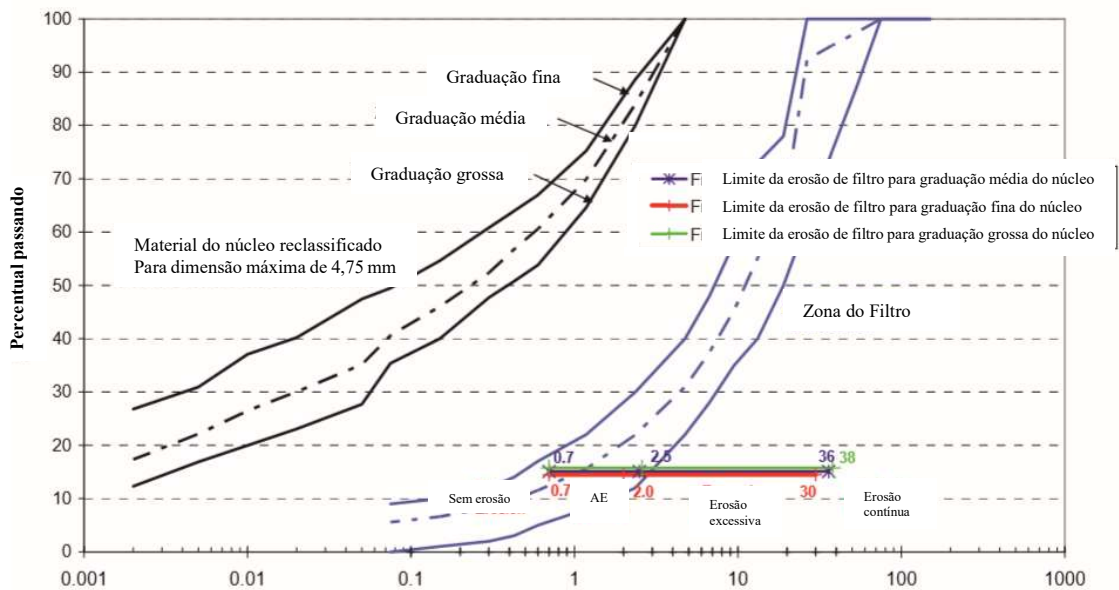
Os autores sugerem para filtros que se enquadram na categoria de alguma erosão a ocorrência moderada de fluxo de fuga de água, podendo chegar a valores de até 100 l/s. Já para os filtros que permitem erosão excessiva sugerem o desenvolvimento potencial de fluxos de fuga com valores entre 100 l/s até 1000 l/s, com potencial para formação de túneis provenientes da erosão e subsidência na crista. Para filtros enquadrados na categoria de erosão contínua, sugerem que podem desenvolver fluxos com valores a partir de 1000 l/s, com aumento progressivo na medida em que ocorre a progressão da erosão.

<sup>5</sup> Critério diretamente aplicado para solo base  $d_{95}$  até 4,75 mm. Para solos com granulometria maior o  $d_{95}$  e o  $d_{85}$  deve ser determinado após ajustada a curva granulométrica para a dimensão máxima 4,75 mm.

O ICOLD (2017) ressalta que na prática núcleos, filtros ou transições de uma barragem apresentam um intervalo na variação das dimensões de suas partículas e é importante que se considere as implicações dessas variações na análise e dimensionamento destes dispositivos. Para isto recomenda alguns passos a serem seguidos, cujos resultados são apresentados graficamente na figura 2.15.

Conforme os passos propostos, deve-se:

- 1) Avaliar os valores de  $D_{15}$  e delimitar esses valores para as situações de nenhuma erosão (de acordo com o critério de Sherard e Dunnigan, 1989), de alguma erosão (limite entre erosão excessiva e nenhuma erosão), de erosão excessiva e de erosão contínua (usando o critério do quadro 2.9);
- 2) Executar o procedimento acima descrito para a graduação mais fina do solo, para a graduação média e para graduação mais grosseira; e
- 3) Plotar os valores limites de  $D_{15}$  nos limites da curva granulométrica do material de filtro/transição.



**Figura 2.15** – Curvas granulométricas do solo base e do filtro ou transição e valores limites de erosão, adaptado do ICOLD (2017).

### 2.5.7 Continuidade de erosões para dentro de descontinuidades, trincas e juntas

O ICOLD (2017) ressalta que não há um critério comum adotado para avaliar a probabilidade da continuidade da erosão neste cenário. Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017), sugerem que ocorrerá a erosão contínua do solo pela abertura da trinca ou da junta, quando a abertura for igual ou maior a  $d_{95}$ , onde  $d_{95}$  corresponde a curva



granulométrica média do solo que a cerca, reclassificada para grãos de dimensão abaixo de 4,75 mm.

Este critério assume o conceito de erosão contínua de Foster e Fell (1999a, 2001) em filtros, no qual a erosão contínua ocorre quando a dimensão dos vazios do filtro é maior que  $d_{95}$ . Sherard et al (1984) citado pelo ICOLD (2017) mostraram que a dimensão do vazio do filtro é definida pela relação  $D_{15}/9$ .

## 2.6 FATORES RELACIONADOS A PROGRESSÕES DE EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA

A progressão da erosão uma vez iniciada e que não foi interrompida pela ação de filtro irá progredir se a erosão formada não provocar o colapso do solo que a cerca, fechando-a, ou seja, o solo provê condições para sustentar a cavidade formada e, se o fluxo de percolação for suficiente para manter o processo contínuo de arraste das partículas de solo para jusante da barragem.

Na medida em que a seção da erosão aumenta, as forças hidráulicas cisalhantes também aumentam e desse modo a erosão irá progredir a menos que o nível do reservatório seja rebaixado ou ocorra alguma restrição do fluxo que mantenham as forças hidráulicas iguais ou inferiores às forças resistentes do solo.

A restrição do fluxo está associada ao zoneamento da barragem, que se originam na perda de carga na zona de montante ou zona de jusante, como por exemplo ocorre em barragem de enrocamento com núcleo central de terra.

Solos coesivos podem manter a abertura ocasionada pelo processo erosivo na condição saturada, atuando como um teto ou paredes laterais para a cavidade. Solos não plásticos como siltes, areias e cascalhos geralmente não são capazes de manter a estabilidade da cavidade tubular e o teto vai colapsar. Contudo, na condição parcialmente saturada solos não coesivos com alto teor de finos podem eventualmente manter a estabilidade da cavidade tubular ao longo da superfície freática pela ação da tensão de sucção, em que há ocorrências de pressões neutras negativas.

Baseado nos estudos de Foster (1999) e Foster e Fell (1999b), citado pelo ICOLD (2017), os fatores mais importantes na estabilidade da cavidade tubular é a condição de saturação e o teor de finos, do solo, passante na peneira n° 200 (# 0,075mm). Os estudos realizados concluíram, que para teores acima de 15% de finos é provável que o solo seja capaz de manter a estabilidade da cavidade tubular.

Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017), desenvolveram um quadro, ver quadro 2.10, baseado em dados e resultados de ensaios, que indica como regra geral, que siltes não plásticos, areias e cascalhos não podem manter a estabilidade da cavidade tubular, exceto quando parcialmente saturado e siltes coesivos e argilas podem manter a estabilidade da cavidade tubular em qualquer situação, saturado ou parcialmente saturado.

**Quadro 2.10** – Probabilidade do solo manter a estabilidade da cavidade tubular de uma erosão por “piping” adaptado de Fell et al (2008), citado pelo ICOLD (2017).

Sistema Unificado de Classificação do Solo	Percentual de Finos	Plasticidade dos Finos	Condição de Saturação	Probabilidade <sup>6</sup>
Argilas e Argilas Arenosas (CL, CH, CL-CH)	> 50	Plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Solos siltosos com 50% ou mais de finos (ML ou MH)	> 50	Plástico ou não plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Areias argilosas e cascalhos argilosos (SC, GC)	15-50	Plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Areias siltosas, cascalhos siltosos, cascalho silto arenoso (SM, GM)	> 15	Não Plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,7-1,0 0,5 -1,0
Solos granulares com algum teor de finos coesivos (SC-SP, SC-SW, GC-GP, GC-GW)	5 - 15	Plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,5-1,0 0,2 -0,5
Solos granulares com algum teor de finos não plásticos (SM-SP, SM-SW, GM-GP, GM-GW)	5 - 15	Não Plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,05-0,1 0,02 -0,05
Solos granulares (SP, SW, GP, GW)	< 5	Não Plástico Plástico	Independente	0,0001 0,001 -0,01

A probabilidade igual a 1,0 indica que o solo apresentou em 100% dos resultados capacidade de manter a cavidade de forma tubular e probabilidades muito baixas indicam que o solo não é capaz de manter a cavidade de forma tubular.

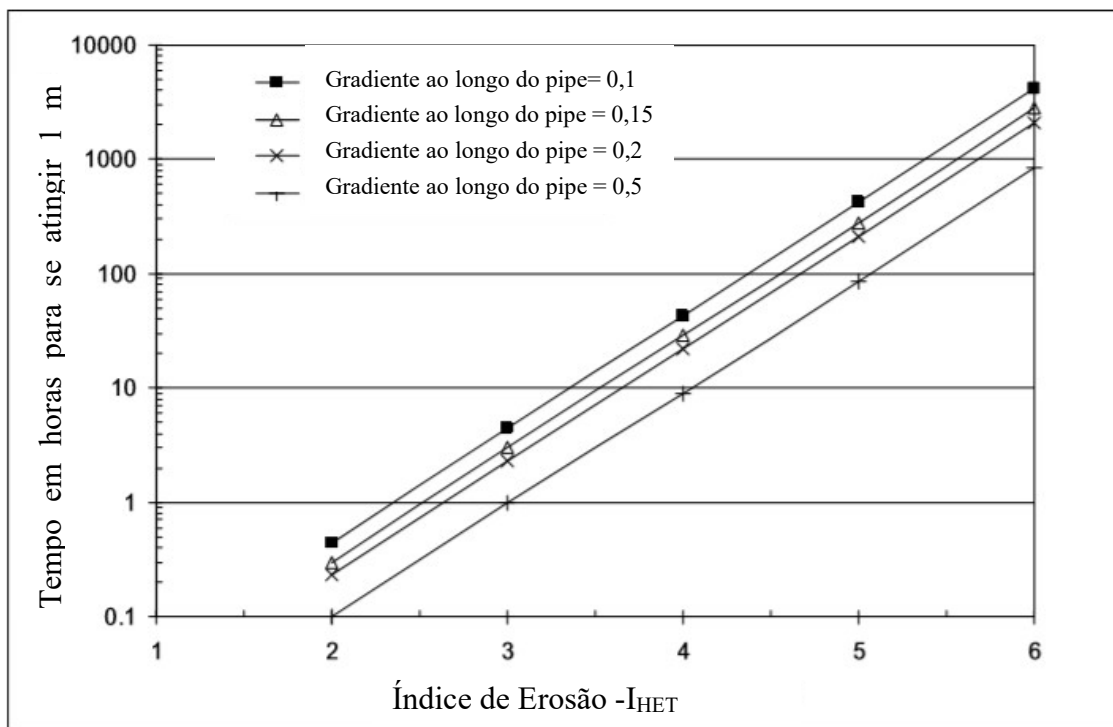
A variação da probabilidade, indica solos bem compactados no limite superior e solos mal compactados no limite inferior.

<sup>6</sup> Na presença de material cimentado as probabilidades indicadas são mais altas.

Nota-se que a progressão da erosão está normalmente associada a manutenção da cavidade de forma tubular no aterro ou na fundação durante o carreamento de material com consequente ampliação da seção erodida.

Uma vez reconhecido que as fugas concentradas serão mantidas e não havendo o colapso da erosão a partir da erosão por “piping” é possível estimar a taxa de aumento da erosão (taxa de erosão) a partir do índice de erosão definido pelo  $I_{HET}$  e considerando o gradiente hidráulico médio ao longo da cavidade tubular formada.

Os resultados resumidos no gráfico 2.16 consideram uma condição de ampliação da erosão sem restrição até o diâmetro de 1 (um) metro, a partir de uma erosão inicial com diâmetro de 25 mm, no qual a tensão cisalhante crítica é igual a zero, que é conservadora para solos com  $I_{HET} > 3,5$ , e na condição de nível constante do reservatório.



**Figura 2.16** – Tempo aproximado do aumento da erosão por “piping” de 25 mm para 1 metro de diâmetro, adaptado do ICOLD (2017).

Do gráfico se pode extrair que a progressão da erosão está diretamente associada às propriedades do solo expressas pelo  $I_{HET}$ , ver quadros 2.3 e 2.4.

Uma vez alcançado o diâmetro de um metro o tempo para a ampliação da seção erodida dobrar de tamanho, de 1 para 2 metros, é estimada pelo acréscimo de 20% do tempo obtido no gráfico, o que indica que o tempo de ampliação reduz significativamente à medida que a erosão aumenta.

Bonelli e Benahmed (2011), citado pelo ICOLD (2017), simularam pelo modelo de “piping” 14 rupturas ocorridas em grandes barragens e concluíram que o  $I_{HET}$  inferido para esses casos históricos variaram entre 2 e 3. Para  $I_{HET}$  com magnitude da ordem de 2 as rupturas ocorreram muito rapidamente, dentro de poucos minutos e para  $I_{HET}$  com magnitude da ordem de 3 as rupturas se deram após várias horas.

Esta avaliação do tempo estimado até o colapso é um fator significativo na avaliação da probabilidade de sucesso de intervenções emergenciais de contenção, considerando o momento da identificação da erosão interna.

## 2.7 SISTEMAS DE CONTROLE DE PERCOLAÇÃO PELA FUNDAÇÃO

A necessidade de construção de barragens sobre as mais diversas condições de fundação, deu origem a diversos dispositivos de controle de percolação pela fundação. Cruz (1996), destaca que todo o esforço deve ser concentrado no sentido de vedar ao máximo a barragem e sua fundação a montante do eixo.

A percolação pela fundação é majoritária na grande maioria das barragens de terra e o controle dessa percolação é de fundamental importância e pode constituir um dos itens mais difíceis do projeto e da execução da obra.

Os sistemas de controle de percolação pela fundação têm como objetivos principais reduzir os gradientes hidráulicos no pé à jusante da barragem e reduzir as subpressões, podendo ser classificados segundo o efeito que têm sobre a percolação com interceptação total, interceptação parcial e elementos drenantes.

A seguir são abordados alguns dos principais sistemas de controle de percolação na fundação.

### 2.7.1 Trincheira de vedação

A trincheira de vedação consiste na escavação de valas nas feições permeáveis da fundação, de maneira que essas feições sejam interceptadas integralmente ou parcialmente pela escavação e o material escavado seja substituído por solo selecionado compactado, de baixa permeabilidade. Normalmente se utiliza no preenchimento da trincheira escavada o mesmo solo aplicado para o núcleo da barragem.

A trincheira de vedação que intercepta integralmente a camada permeável da fundação são efetivas, já as trincheiras parciais não são efetivas e sua eficácia, no controle de percolação de água, pode ser verificada conhecendo a perda de carga hidráulica no

sistema de vedação, dispondo de piezômetros localizados imediatamente à montante e à jusante do sistema de controle de percolação.

Oliveira (2008), analisou a eficácia da trincheira de vedação em barragem de fundação permeável em relação ao percentual de penetração na camada permeável, considerando os parâmetros de vazão percolada através da fundação, gradiente hidráulico no pé à jusante da barragem e subpressão sob o espaldar de jusante, para diferentes condições de anisotropia do solo de fundação e, verificou que somente para trincheira integral todos os parâmetros são atendidos.

As trincheiras estão localizadas na região central da barragem, abaixo do núcleo ou à montante, onde além da função de vedação podem contribuir para a estabilidade do talude de montante. A base da trincheira deve ter um mínimo de 4 metros para permitir o acesso de equipamentos de compactação.

Os cuidados que devem ser tomados, durante o projeto e a execução da trincheira de vedação, são na seleção, homogeneização e compactação do solo de preenchimento, verificar a compatibilidade das deformações do solo de preenchimento com o solo adjacente da fundação, a fim de evitar deformações diferenciais, que possam levar a um processo de arqueamento com concentração de tensões na interface e redução de tensões no interior da trincheira e verificar a estabilidade dos taludes da escavação, para que não ocorra deslocamentos do solo de fundação adjacente, que resultariam na redução da densidade e compacidade deste solo.

A trincheira de vedação de solo compactado é uma solução de baixo custo quando executado em pequenas profundidades e em condições em que não se faz necessário o rebaixamento excessivo do lençol freático. Ao contrário a construção da trincheira se torna uma solução custosa em condições de camadas permeáveis da fundação de grande profundidade e com necessidade de rebaixamento excessivo do lençol freático.

### **2.7.2 Injeções de cimento em maciços rochosos**

As injeções de cimento são largamente empregadas no Brasil como solução para preencher fraturas na rocha e reduzir a permeabilidade do meio. São realizadas com a implantação de uma ou mais linhas de furos executadas à montante do eixo da barragem com perfuratrizes roto-percussivas, empregando caldas grossas no processo de injeção, onde, normalmente, a relação água/cimento oscila entre 0,5 e 0,8 em peso.

As pressões de injeção empregadas nos furos variam com as condições encontradas no furo e de acordo com a resistência da rocha e de maneira geral ficam situadas entre  $0,25 \text{ kg/cm}^2$  e  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

O controle do espaçamento entre os furos executados e o número de linhas de furos são definidos à medida que são verificados o consumo da mistura por metro de furo injetado e se considera como intervenção mínima a execução de uma linha de furos com espaçamento de 3(três) metros entre eles.

Cruz (1996), destaca que a permeabilidade média residual dos maciços rochosos injetados tem ficado na casa de  $10^{-4} \text{ cm/s}$  e que a eficácia do sistema depende de um sistema de drenagem das fundações, este de fundamental importância no controle do fluxo, devendo a vedação ser considerada como uma segunda linha de defesa.

### **2.7.3 Tapetes impermeabilizantes à montante**

Os tapetes impermeabilizantes localizados à montante constituem de camadas de solo compactado de baixa permeabilidade, que visam aumentar o caminho de percolação pela fundação, reduzindo as pressões e gradientes hidráulicos à jusante.

Cruz (1996), ressalta que constituem em uma solução mais econômica para o controle de fluxo pela fundação da barragem, porém exigem cuidados especiais e tem se mostrado pouco eficientes, devido ao fissuramento por ressecamento e por recalques diferenciais junto ao pé de montante da barragem.

Cruz (1996), explica que o fissuramento de tapetes impermeáveis é de difícil controle, em geral pela extensão dos mesmos e a manutenção constante de lâmina d'água sobre os mesmos é sempre problemática.

O comprimento do tapete impermeável, conforme apresentado no item 2.4.2, depende da carga hidráulica do reservatório, das espessuras e permeabilidades do tapete e da feição permeável da fundação. Valores frequentes para a espessura dos tapetes variam de 0,6 a 3,0 metros.

Oliveira (2008), observou em suas análises de vazão, gradiente hidráulico e subpressão para a condição de barragem sobre fundação permeável, que o comportamento desses parâmetros são semelhantes, comparando os sistemas com a presença de tapete impermeável à montante e uma barragem sem dispositivos de controle e, somente as vazões obtidas atingiram valores aceitáveis, na condição de comprimentos de tapetes com uma relação L/B acima de 1,70.

Os tapetes impermeáveis, como sistema de vedação de uma barragem sobre feição permeável, devem estar sempre acompanhados de um sistema de drenagem interna, responsáveis por manter o gradiente hidráulico e as subpressões abaixo de valores máximos aceitáveis estabelecidos em projeto.

#### **2.7.4 Trincheiras Drenante e Poços de Alívio**

As trincheiras drenantes são dispositivos de drenagem interna constituídas por estruturas lineares pouco profundas, preenchidas com material de permeabilidade elevada, normalmente instalados junto ao pé de jusante da barragem com a função de interceptar as feições permeáveis da fundação de modo a drenar as águas de percolação pela fundação e de modo a controlar os gradientes hidráulicos e reduzir as subpressões à jusante.

Cruz (1996), ressalta que para as trincheiras permeáveis serem eficazes como elemento drenante, o material de preenchimento deve apresentar permeabilidade pelo menos 10 vezes maior do que a permeabilidade do material da fundação.

Quando não se obtém com as trincheiras drenantes níveis de gradiente hidráulico e subpressões satisfatórios sob o maciço à jusante, que podem ocorrer quando se tem uma fundação estratificada com camada inferior mais permeável, preferencialmente na direção horizontal, sob uma camada superior da fundação menos permeável, o uso de poços de alívio pode ter grande eficiência, pelo fato de atravessar os vários estratos.

Os poços de alívio são drenos verticais, que assim como a trincheira drenante têm a função de drenar as águas de percolação da fundação de modo a reduzir os gradientes hidráulicos e subpressões à jusante.

Cedergren (1977), citado por Oliveira (2008), ressalta que uma das vantagens das trincheiras permeáveis / poços de alívio é a facilidade com a qual elas podem ser adicionadas, se o projeto inicial se mostrar insuficiente no controle de fluxo pela fundação.

A Eletrobras (2003), recomenda, por razões construtivas, valores mínimos de 0,60 metros de largura para as trincheiras drenantes e 0,10 metros de diâmetro para os poços de alívio.

Cruz (1996), ressalta como lições aprendidas que o controle das vazões pelas fundações quase sempre deve envolver outros recursos de drenagem, além do dreno

horizontal, em vista da anisotropia de permeabilidades sempre presentes em fundações em solo.

As trincheiras drenantes devem ser empregadas obedecendo a critérios de filtro, assim como os poços de alívio onde deve ser prevista a colocação de filtro, a fim de evitar o carreamento de materiais sólidos.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O objetivo deste estudo é identificar por que a barragem Granjeiro é suscetível à formação de erosões internas no aterro, conforme constatado com as ocorrências de 2012 e 2019, observadas em locais diferentes no maciço do aterro da barragem. Para isso, o presente trabalho procura apresentar hipóteses factíveis, relacionadas aos principais fatores intervenientes, que poderiam ser os responsáveis pela formação, continuidade e progressão dessas erosões no corpo da barragem Granjeiro.

Para alcançar o objetivo esse estudo associa o conhecimento formado da barragem Granjeiro a partir do projeto e das investigações de campo ao conhecimento teórico abordado no capítulo 2, para através de uma abordagem hipotética dedutiva, sejam verificadas as hipóteses mais prováveis, que poderiam ter conduzido à formação das erosões no aterro até o estágio de progressão em que essas erosões se encontravam, quando interrompidas nos anos de 2012 e 2019.

Apresentadas todas as hipóteses e por associação com as informações do material constituinte do aterro, obtidas nas investigações de campo, a etapa seguinte é quantificar a possível resistência do solo do aterro a processos de erosão interna, para assim verificar quais seriam as condições necessárias impostas pelo fluxo de percolação pela fundação para iniciar a erosão interna no aterro e assim verificar se a hipótese considerada é factível ou não, selecionando aquelas factíveis, até convergir àquela hipótese mais provável.

As informações referentes as propriedades físicas do solo do aterro e da fundação da barragem Granjeiro foram extraídas dos relatórios de levantamentos de campo e ensaios de laboratório realizados no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA, firmado entre a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico-ANA e a empresa Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A, celebrado para elaboração de projeto básico para controle e minimização de risco de rompimento da barragem Granjeiro.



No âmbito do contrato nº 037/2019/ANA foram seguidas as seguintes etapas de reconhecimento e caracterização física do maciço do aterro e da fundação da barragem Granjeiro:

1. Avaliação de informações de documentos técnicos existentes (Projeto da Barragem e Relatórios de Vistoria);
2. Inspeção de campo para avaliação técnica preliminar das condições da barragem e suas anomalias;
3. Realização de levantamento topográfico planialtimétrico;
4. Realização de investigações geológico/geotécnicas no maciço do aterro e da fundação e na ombreira direita da barragem;
5. Análise teórica de percolação e estabilidade para diferentes cenários de operação dos descarregadores hidráulicos (vertedouro principal e vertedouro emergencial)

Cabe destacar que o evento de 2019 levou o órgão fiscalizador de segurança de barragens a fazer uso do parágrafo 2º, art. 18 da Lei 12.334/10, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, alterada recentemente pela Lei 14.066/2020, para intervir emergencialmente na barragem. Dentre as ações adotadas foi realizado o rebaixamento do nível do reservatório com a escavação de um vertedouro emergencial na ombreira direita, executada com cota de soleira aproximadamente 4 metros abaixo da cota de soleira do vertedouro original.

As investigações geológico/geotécnicas realizadas no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA compreenderam a realização de:

1. Sondagens à percussão e sondagem mista (percussão e rotativa);
2. Ensaio SPT;
3. Ensaio de infiltração no maciço do aterro (tipo Lefranc) e de perda de água sob pressão na fundação (tipo Lugeon);
4. Ensaio de permeabilidade a carga variável e resistência ao cisalhamento em amostras indeformadas do solo do maciço do aterro;
5. Ensaio em amostras deformadas para determinação dos limites de Atterberg, granulometria e densidade real dos grãos.

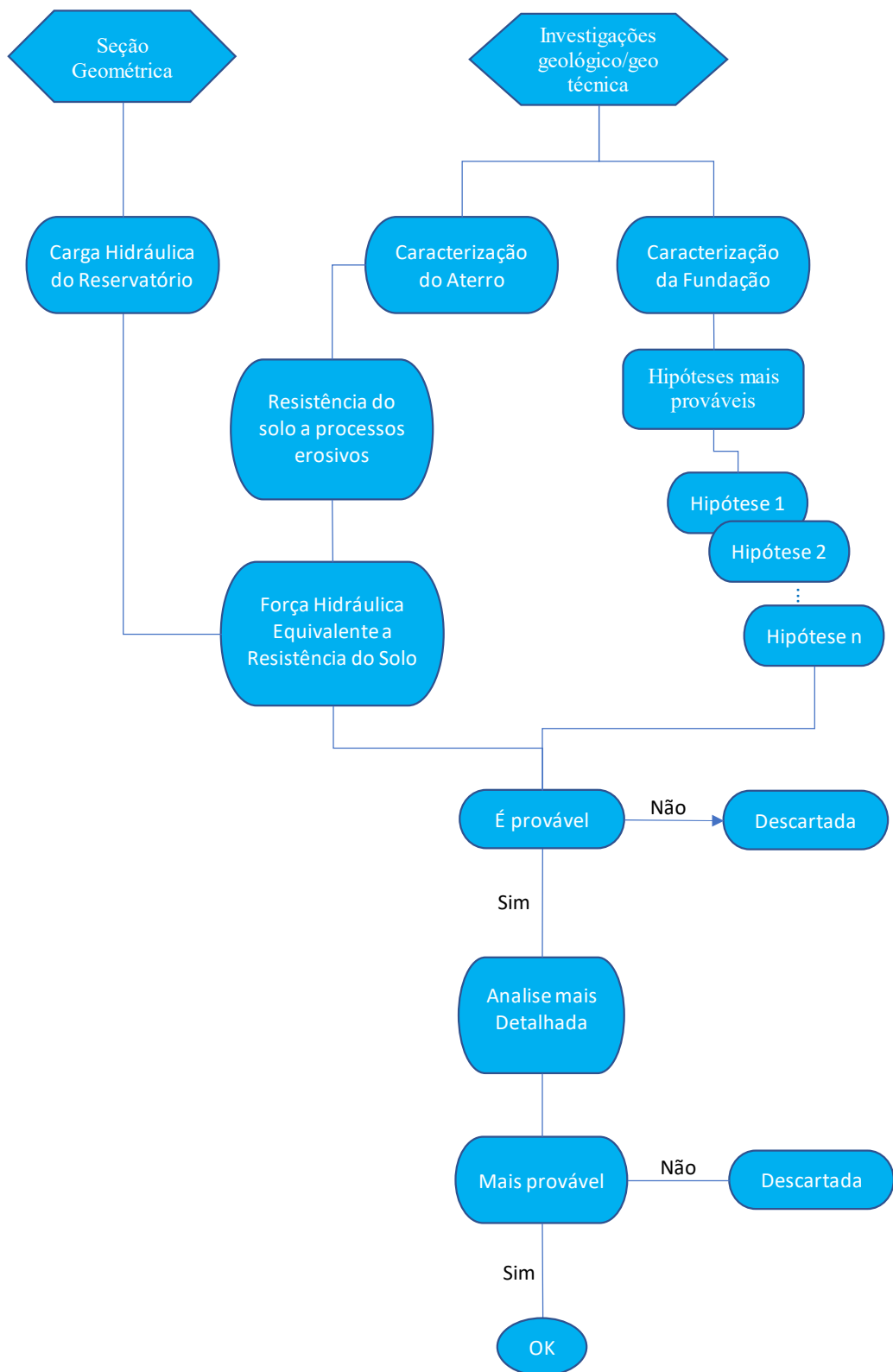
De posse dos resultados das investigações de campo e ensaios de laboratório associados ao levantamento topográfico planialtimétrico foram estabelecidos no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA o perfil longitudinal da barragem Granjeiro, com as seções principais de análise e realizadas avaliações numéricas bidimensionais, com o uso do

software SEEP/W para identificar a linha piezométrica, perda de carga, poropressões e gradientes hidráulicos no aterro e na fundação.

Os resultados das análises de percolação e estabilidade, realizadas no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA, são o ponto de partida desse trabalho e tem como finalidade confirmar ou não se as previsões de projeto poderiam indicar a possível causa para o início de erosões internas ocorridas no aterro.

Sendo a resposta para o questionamento acima positiva a hipótese apresentada no capítulo 1 estará confirmada e as condições para a formação das cavidades observadas na barragem estarão identificadas. Caso contrário, se a resposta para o questionamento acima for negativa, tem-se que o projeto não conseguiu através da abordagem tradicional de rede de fluxo identificar condições hidráulicas críticas para iniciar um processo de formação de erosão interna e assim sendo, aplica-se a metodologia proposta no presente estudo, no intuito de convergir a uma hipótese mais factível das ocorrências observadas em 2012 e 2019.

O fluxograma a seguir ilustra os passos aplicados dessa abordagem metodológica na avaliação e na definição da hipótese mais factível para o mecanismo de ruptura por erosão interna, considerando as fases identificadas nos incidentes de 2012 e 2019 de início, continuidade e progressão.



**Figura 3.1** - Fluxograma metodológico de análise.

Os quadros do fluxograma indicam os passos da abordagem metodológica e na sequência são apresentadas a descrição de cada um deles.

### 3.2 SEÇÃO GEOMÉTRICA

A seção geométrica indicada no fluxograma representa o arranjo típico da estrutura da barragem os materiais componentes e a geometria da barragem nas seções principais, que oferecem condições de maiores esforços e carregamentos, consideradas nas análises.

As informações do projeto da barragem, que são os parâmetros de entrada em uma análise de percolação e estabilidade, estão comumente representadas nas seções principais de análise, com destaque para o nível d'água a montante ou nível d'água máximo normal no reservatório, que nesse caso representa o carregamento hidráulico na análise do processo de ruptura por erosão interna.

### 3.3 INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO/GEOTÉCNICA

As sondagens são realizadas em solo e rocha como processo de investigação e reconhecimento geológico/geotécnico, fornecendo parâmetros para caracterização desses materiais. As informações comumente extraídas durante as sondagens de campo são classificação tátil-visual, localização e delimitação dos horizontes, nível do lençol freático, resistência do solo, permeabilidade das camadas, fraturamento, alteração, coerência, recuperação e índice de qualidade da rocha.

A sondagem direta com extração de amostras pode ser realizada através da escavação de poços de inspeção, sondagem a trado, sondagem a percussão e sondagem rotativa em rocha.

A sondagem a Percussão ou simplesmente SPT é um dos mais tradicionais procedimentos de investigações geotécnicas diretas de solos para projetos e obras de engenharia e consiste em fornecer a resistência a penetração a cada metro de profundidade e informações como estratigrafia, classificação dos solos e posição do nível d'água.

O índice de resistência a penetração do solo pelo ensaio SPT corresponde ao número (N) de golpes de um martelo de 65 kg, em queda livre de uma altura de 75 cm, necessário para fazer penetrar no fundo do furo o barrilete de 45 cm. São contabilizados o número de golpes necessários para cravação da terça parte do barrilete e somados o número de golpes necessários à cravação dos últimos 30 cm.

A medida correspondente à penetração do barrilete é realizada com anotações em centímetros com o simples apoio do martelo sobre o ressalto da haste conectada ao barrilete ou após a cada golpe do martelo.

A cada SPT realizado prossegue-se o avanço da sondagem empregando-se o trado quando se está acima do nível freático ou a perfuração por circulação de água até a profundidade do novo ensaio. O ensaio SPT atinge o impenetrável quando a penetração do barrilete é inferior a 5 cm após 10 (dez) golpes consecutivos, não se computando os cinco primeiros golpes do ensaio, ou quando o número de golpes alcançar 50 em um mesmo ensaio.

O avanço da sondagem em materiais impenetráveis pela sondagem SPT se dá com o emprego da sondagem rotativa, que se destina à perfuração e amostragem de maciços rochosos e consiste no uso de equipamento motomecanizado para obtenção de testemunhos de formato cilíndrico através da ação cortante de coroa em razão da aplicação simultânea de rotação e pressão para avanço vertical ou sub-vertical. A sondagem rotativa quando executada associada ao ensaio SPT é denominada sondagem mista.

A obtenção de testemunhos de sondagens rotativas visa a identificação das características da rocha como fraturamento, alteração, coerência, recuperação e índice de qualidade da rocha e permite a execução de ensaio de perda d'água para determinação da permeabilidade da rocha a diferentes profundidades.

Os serviços de investigação geológico/geotécnico podem ser complementados por métodos indiretos (geométricos e sísmicos) dos quais se extraem as propriedades das camadas do subsolo pela medida da sua resistividade elétrica ou da propagação da onda.

Os métodos indiretos de sondagens associados às sondagens destrutivas tradicionais tem sido cada vez mais empregados em projetos de engenharia, permitindo o mapeamento de toda a área de estudo e por associação com as informações das investigações diretas traçar perfis geológicos com bom nível de detalhe, com identificação de variação na resistência dos materiais em diferente profundidades, zonas de falhas, zonas alteradas, contatos litológicos, acrescentando informações importantes, que podem ser imprescindíveis em uma análise com ocorrências específicas.

### 3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO (ATERRO)

As propriedades dos solos estão relacionadas a composição mineralógica da rocha que lhe deu origem ou rocha matriz e aos processos de intemperismo químico e físicos aos quais foram submetidos ao longo do tempo.

A depender do processo de formação os solos são divididos em solos residuais, encontrados no mesmo local da rocha que lhe deu origem ou solos transportados, onde, através da ação da água (aluvionar), da gravidade (coluvionar), ou glacial (de geleiras) são depositados em locais diferentes aos da rocha matriz.

Os solos residuais em climas tropicais úmidos podem apresentar dezenas de metros de profundidade e os horizontes superficiais são mais afetados pelo processo de laterização, resultantes de intensos processos de oxidação e lixiviação e caracteriza-se pela presença de algum agente cimentício devido à presença de óxido hidratado de ferro e alumínio. Cruz (1996) ressalta que o fenômeno de laterização também ocorre em solos coluvionares e até mesmo em aluviões.

O horizonte de solo residual localizado abaixo de camadas de solos lateríticos são constituídos de solos saprolíticos, que guardam a estrutura reliquiar da rocha de origem.

Cruz e Maiolino (1983 e 1985) agruparam em quatro grandes grupos os solos lateríticos e saprolíticos aplicados em projetos de barragens considerando os resultados de mais de 1000 ensaios triaxiais procedidos nesses solos.

Os solos estudados foram agrupados em solos lateríticos argilosos, solos saprolíticos, solos lateríticos arenosos e solos transportados.

A aplicação do solo em obras de engenharia, e especialmente em barragens de terra depende do conhecimento prévio de suas propriedades físicas para aplicação em projetos e obras de aterro e fundação. Os ensaios de reconhecimento comumente empregados são:

- a. Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação;
- b. Ensaio para determinação do peso específico dos grãos;
- c. Ensaio de consistência, limites de Atterberg;
- d. Ensaio de compactação;
- e. Ensaio de adensamento;
- f. Ensaio de compressão simples;
- g. Ensaio triaxiais;
- h. Ensaio de permeabilidade.

### 3.4.1 Ensaios de granulometria ou classificação granulométrica

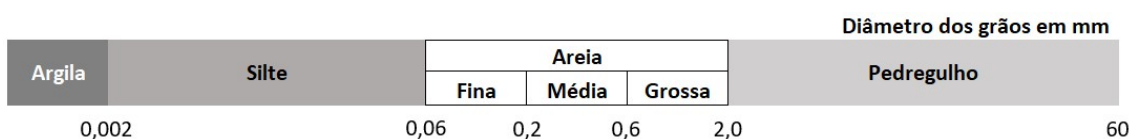
A classificação dos solos de acordo com o tamanho de suas partículas é bastante útil em projetos de barragens e um exemplo de sua aplicação está no dimensionamento de filtros ou zonas de transições.

A NBR 7181 estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento para partículas com diâmetro até 0,075 mm, correspondente a peneira de malha 200 e por sedimentação para o material que passa na peneira de malha 200, correspondentes as partículas de siltes e argilas.

O resultado do ensaio de granulometria é representado na curva de distribuição granulométrica, onde no eixo logarítmico da abscissa é expresso o tamanho das partículas em milímetros e na ordenada a porcentagem em peso da amostra de solo, que está abaixo daquele diâmetro equivalente.

De acordo com a dimensão das partículas constituintes do solo as mesmas são classificadas em pedregulhos, areias grossas, areias médias, areias finas, siltes e argilas.

Segundo a ABNT NBR 6502/95, a classificação dos grãos do solo, de acordo com sua dimensão é realizada conforme escala abaixo.



**Figura 3.2** – Classificação do solo de acordo com sua dimensão granulométrica.

A identificação das propriedades mecânicas de um solo pela análise granulométrica é mais significativa para solos granulares, como pedregulhos e areias, já em argilas outras propriedades como plasticidade e consistência exercem muito mais influência em seu comportamento mecânico.

A classificação do solo segundo a sua distribuição granulométrica é definida em três tipos principais, quais sejam, solos uniformes, onde a maioria dos grãos possuem a mesma dimensão, solos de granulometria ampla, onde as dimensões das partículas abrangem uma extensa faixa de valores e solos de granulometria descontínua ou aberta, onde há ausência de partículas com dimensões intermediárias.

A curva granulométrica dos solos uniformes apresenta alta declividade aproximando da vertical, a curva granulométrica dos solos bem graduados apresenta curva granulométrica côncava e suave e a curva granulométrica dos solos descontínuos apresentam segmentos quase horizontais.

### **3.4.2 Ensaios para determinação do peso específico dos grãos**

A determinação do peso específico seco dos grãos de solo, que passam na peneira de 4,8 mm é descrito na norma ABNT NBR 6458. Consiste em tomar 250 g da amostra preparada segundo a ABNT NBR 6457, homogeneizar e pesar em balança, com resolução de 0,01 gramas, 50 gramas do solo (argiloso ou siltoso) ou 60 gramas (solo arenoso) previamente seco ao ar. Na sequência o solo é levado à estufa e novamente pesado para determinar sua umidade higroscópica. O volume dessa massa de solo é determinado pelo volume de água deslocado, determinado em laboratório com uso de picnômetro (balão volumétrico) de 500 ml e água destilada.

A determinação do peso específico dos grãos de solo é necessária na avaliação do índice de vazios de uma amostra desse solo compactada.

### **3.4.3 Ensaios de consistência -Limites de Atterberg**

Os limites de consistência ou limites de Atterberg caracteriza os solos finos ou a porção fina dos solos, que passa na peneira de malha 40 (0,42 mm), quanto ao seu comportamento plástico.

Os solos coesivos podem apresentar quatro estados característicos de consistência (líquido, plástico, semi-sólido ou sólido) a depender do teor de umidade presente nesse solo.

O solo no estado líquido, ou seja, com quantidade excessiva de água e resistência ao cisalhamento nula, à medida que vai perdendo água em um processo de secagem começa a oferecer alguma resistência, podendo ser facilmente moldado, sem perder em volume e sem aparecer trincas, caracterizando o estado plástico. Ao continuar perdendo água para o ambiente o solo sofre uma redução de volume e aumenta sua rigidez até que se torna quebradiço, o que caracteriza o estado semi-sólido.

O teor de umidade que representa a mudança de estado do solo líquido para o solo plástico é definido pelo Limite de Liquidez (LL) e o teor de umidade do solo que representa a mudança do estado plástico para o estado semi-sólido é definido pelo Limite de Plasticidade (LP).

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg (LL e LP) são descritos respectivamente pela ABNT NBR 6459 e 7180. O índice de plasticidade do solo (IP) é definido pela diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) e esses parâmetros de plasticidade estão associados ao comportamento mecânico do solo.



Os resultados dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg quando interpretados em conjunto com os resultados da distribuição granulométrica permitem classificar o solo pela metodologia TRB-AASHTO, utilizada mais no meio rodoviário, ou pela classificação unificada (SUCS) e estimar, dentro das suas limitações, prováveis comportamentos do solo.

#### **3.4.4 Ensaio de compactação**

O ensaio de compactação consiste em preparar amostras do solo segundo a NBR 6457 e ensaiar segundo a NBR 7182. O ensaio permite determinar o peso específico aparente seco do solo compactado na energia especificada com diferentes teores de umidade para obtenção da curva de compactação desse solo, representado no eixo da abscissa pela umidade em percentual e no eixo da ordenada pelo peso específico aparente seco. O gráfico é traçado e dele se extrai a umidade ótima de compactação do solo, obtida para a condição de maior peso específico aparente seco.

A curva de compactação pode ser interpretada, ao ser dividida por um eixo vertical na umidade ótima, em ramo seco, caracterizado pelo ramo à esquerda da umidade ótima, ou seja, umidade abaixo da ótima e em ramo úmido, caracterizado pelo ramo à direita da umidade ótima. Conhecer o comportamento do solo nessas condições de ramo seco e ramo úmido é fundamental em um projeto de barragens de terra, pois vai direcionar recomendações e especificações de compactação de campo.

O solo apresenta resistência superior no ramo seco se comparada com o ramo úmido e neste ramo a compactação do solo pode resultar em pressões neutras positivas.

Adota-se como procedimento de campo manter a umidade do solo, imediatamente antes da sua compactação, entre -2% a +1% em relação a umidade ótima obtida no ensaio proctor normal em laboratório.

Assim, como já observado, nota-se que o ensaio de compactação subsidia a elaboração das recomendações e cuidados técnicos durante a compactação do aterro da barragem, a qual se emprega a energia de compactação proctor normal.

Em campo o aterro da barragem é homogeneizado e compactado em camadas horizontais com espessuras pré-definidas de modo que o grau de compactação alcançado em cada camada seja de no mínimo 96% em relação ao ensaio de compactação proctor normal em laboratório, medido pela densidade de campo dividida pela densidade de laboratório, sendo que os resultados na média devem indicar Grau de compactação igual

ou superior a 98%. Camadas adequadamente compactadas garantem o atendimento dos parâmetros de resistência e permeabilidade, requisitos imprescindíveis para o bom desempenho do maciço do aterro.

Camadas super compactadas de solo, com resultados de peso específico aparente seco acima do determinado em laboratório na umidade ótima de compactação, devem ser vistas com ressalvas, pois podem indicar alteração em relação ao material base ensaiado ou laminação e neste último caso a camada compactada deve ser refeita.

Aterros mal compactados devem ser terminantemente evitados pois perdem em resistência e são mais permeáveis tornando mais suscetíveis a rupturas por erosões internas. Nestes casos a camada compactada deverá ser sempre removida e refeita.

### **3.4.5 Ensaio a compressão simples**

O ensaio a compressão simples permite entender o comportamento mecânico do solo submetido a uma sobrecarga e consiste na determinação da resistência de uma amostra não confinada e não drenada submetida a um carregamento axial.

As amostras são ensaiadas segundo a NBR 12770 utilizando amostradas indeformadas de solo, procurando manter as condições de campo e, o ensaio pode ser realizado controlando a velocidade de deformação de modo que esteja compreendida no intervalo de 0,5% e 2 % de deformação a cada 30 segundos, procedendo a leitura da carga aplicada nesse intervalo.

No ensaio de carga controlada aplica-se uma carga inicial estimada em 1/10 a 1/15 da carga de ruptura já estimada e vai realizando acréscimo de carga a cada 30 segundos, igual à carga anterior aplicada e procedendo a leitura das deformações correspondentes neste intervalo.

Traça-se a curva pressão deformação e a resistência à compressão do solo é determinada pelo valor da pressão máxima obtida ou, quando não se atinge a carga máxima de ruptura, pelo valor da pressão correspondente a uma deformação plástica específica de 20 % do corpo de prova.

Um ensaio largamente empregado como referência da resistência a compressão axial de um solo é o ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia-ISC, que representa a resistência do solo em percentual comparada a resistência de uma estrutura de brita graduada padrão.

O ensaio consiste em submeter os corpos de provas compactados, conforme item 3.4.4, 96 horas imersos em água com uma sobrecarga aplicada, procedendo leituras de expansão a cada 24 horas, após esse tempo são extraídos, aguarda-se o escoamento do excesso de água e são levados à prensa e realizado o ensaio de deformação controlada, onde são realizadas leituras da carga aplicada na amostra ensaiada, para penetrações padronizadas do pistão.

No cálculo são utilizadas as pressões lidas nas penetrações 2,54 mm e 5,08 mm, que é dividida pela pressão padrão da brita graduada de referência para essas duas deformações e dos dois resultados obtidos o ISC é definido considerando aquele de maior valor percentual.

### **3.4.6 Ensaio de compressão triaxial**

Os carregamentos aplicados na superfície do solo ou mesmo a própria geometria da superfície da massa de solo contribuem para o desenvolvimento de tensões tangenciais ou de cisalhamento. Conhecer a resistência do solo às tensões cisalhantes em uma determinada condição é elemento essencial no emprego em taludes de barragens de terra e obras de contenção.

A resistência ao cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) pode ser descrito pela máxima tensão cisalhante que ocorre no plano de ruptura antes da ruptura e conceitualmente pode ser definida como consequência imediata da pressão normal ao plano de ruptura ou pressão efetiva, que mobilizam resistência por atrito no contato entre as partículas, definido por  $(\sigma - u) \cdot \tan \phi$  e das forças de atração entre as partículas, expresso pela coesão ( $c$ ).

Os ensaios mais utilizados para determinar a resistência do solo às tensões cisalhantes são os triaxiais por sua condição de aparelhagem, que possibilita o controle absoluto da drenagem e a medição do valor da pressão neutra durante o ensaio.

O ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões, que atua em todas as direções inclusive na direção vertical, denominada de pressão confinante ou pressão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e na aplicação de carregamento axial ( $\sigma_1$ ) sobre o corpo de prova cilíndrico do solo. Para isto a amostra de solo a ser ensaiada é envolta por uma membrana de borracha e colocada dentro da câmara de ensaio. A câmara é preenchida com água e aplica-se a pressão hidrostática de confinamento. No ensaio com carga controlada o carregamento axial acionado pelo pistão é crescente e no

ensaio com deformação controlada, ocorre sob velocidade de carregamento constante do pistão.

Durante o ensaio são realizadas as leituras da tensão devido ao carregamento axial, definido como tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), da poropressão ( $u$ ) e dos deslocamentos verticais do corpo de prova, que permitem traçar a curva tensão x deformação.

Do gráfico tensão x deformação se extrai o valor máximo da tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), que corresponde a condição de tensão que provoca a ruptura da amostra. O valor de  $\sigma_1$  é obtido somando a tensão desviadora com a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ), definida no início do ensaio.

Com as informações de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  delimita-se o círculo de Mohr à situação de ruptura. Ao realizar mais ensaios para diferentes pressões de confinamento em outros corpos de prova moldados com o mesmo solo e nas mesmas condições da primeira amostra possibilita que seja determinada a envoltória de resistência conforme o critério de Mohr-Colomb e extrair os parâmetros de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) do solo.

O ensaio triaxial procura reproduzir a situação de campo na condição mais desfavorável, ou seja, os parâmetros de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) são obtidos para o solo na condição saturada, comumente representado pelo grau de saturação igual a 95%.

### **3.4.7 Ensaios de permeabilidade**

Cruz (1996) ressalta que a permeabilidade de um meio poroso pode ser interpretada como a facilidade (ou a dificuldade) que ele oferece à passagem de um fluido pelos seus poros ou vazios e é resultante da combinação das dimensões e formas dos vazios do meio.

Considerando as dimensões e formas dos vazios o coeficiente de permeabilidade sofre influência da presença de ar nesses vazios, que dificultam o fluxo de água, sendo sempre maior a permeabilidade quando o solo se encontra saturado.

Os ensaios de permeabilidade de um solo na condição saturada podem ser realizados tanto em campo quanto em laboratório. O ensaio em laboratório é adequado para situações em que se consegue reproduzir ou se aproximar com as amostras de laboratório as condições do solo em campo, como ocorre em aterros de barragens de terra, pelo fato de tratarem de meios homogêneos com compactação conhecida. Para o solo de fundação o ensaio em laboratório de amostras indeformadas pode apresentar problemas

devido a pouca ou nenhuma representatividade, onde se soma a esta variável o efeito do amolgamento da amostra indeformada durante o preparo em laboratório.

Os ensaios de permeabilidade em laboratório podem ser realizados à carga constante (NBR 13292), indicados para solos de elevada permeabilidade como pedregulho e areia ou realizados à carga variável (NBR 14545), indicados para solos de baixa permeabilidade, como siltes e argilas.

Já os ensaios convencionais de campo para determinação do coeficiente de permeabilidade de um meio poroso na condição saturada do solo consiste na medida de vazão, que pode ser definida pelo volume de água absorvido ou retirado durante um intervalo de tempo em furos de sondagem e, requerem o conhecimento prévio de parâmetros como altura livre da perfuração não revestida, diâmetro do furo, posição do nível d'água e espessura das camadas ensaiadas.

Em horizontes superficiais, acima do lençol freático, a permeabilidade do solo pode ser determinada com a escavação de uma cava rasa de dimensões conhecidas, tipo Matsuo. O ensaio é realizado com nível constante de água na cava e mede-se a vazão até o estabelecimento de fluxo permanente, que define a condição de solo saturado.

Em horizontes mais profundos realiza-se o ensaio de permeabilidade do solo no próprio furo da sondagem à percussão onde é realizado o ensaio SPT, ou seja, nos 45 cm finais de cada camada de 1 (um) metro. Nos ensaios realizados acima do lençol freático o furo é revestido até a cota a ser ensaiada, o solo é saturado e adiciona-se água até o topo do furo, podendo ser realizado com carga hidráulica constante ou variável, procedendo a leitura do volume de água absorvido no tempo com o auxílio de uma proveta. No ensaio de carga variável mede-se a velocidade do rebaixamento até o decréscimo de carga atingir cerca de 20 % da carga inicial.

Os ensaios de permeabilidade realizados abaixo do lençol freático, o nível da água no furo é rebaixado em cerca de 1 (um) metro até a estabilização da vazão de bombeamento. Então se interrompe o bombeamento e mede o tempo para recuperação do nível d'água a condição inicial.

Em maciços rochosos o ensaio convencional empregado na determinação da permeabilidade ou condutividade do meio consiste na realização de ensaios de perda d'água, com diferentes estágios de pressão, no decorrer das sondagens rotativas, cujos trechos ensaiados são limitados pelo fundo do furo e superiormente pelo obturador, devendo a perfuração ser interrompida para cada trecho a ser ensaiado.

Ressalta-se a dificuldade de reproduzir em ensaios convencionais a permeabilidade equivalente do meio, em virtude das incertezas associadas aos parâmetros inerentes ao ensaio ou devido à pouca representatividade dos furos em relação ao meio.

Essa questão é ainda mais complexa em fundações rochosas, cujo fluxo de percolação é condicionado pela natureza da rocha e pelo seu estado de fraturamento e alteração.

Cruz (1996) afirma que a melhor informação que se pode obter quanto ao fluxo num meio poroso ou num maciço rochoso é a referente a ensaios de campo de grandes dimensões, denominados ensaios tridimensionais, nos quais a água é injetada ou preferencialmente bombeada de um ponto do maciço, sendo feitas observações de variação de pressão piezométrica em vários pontos do mesmo maciço à distâncias variáveis conhecidas.

Os resultados de permeabilidade com piezômetros são obtidos pela equação de Hvorslev (1951), a partir das informações de variações das poropressões e dos respectivos tempos de resposta dos piezômetros, calculado em razão do fator de forma da ponteira, que é uma função resultante da geometria do piezômetro.

### 3.5 PROPRIEDADES DO MACIÇO DA FUNDAÇÃO-FLUXO DE PERCOLAÇÃO

Cruz (1996) destaca que a fundação condiciona de maneira marcante a escolha da seção típica de uma barragem e que as principais condicionantes da fundação para um projeto de barragem são a estabilidade, deformação e estanqueidade dos materiais.

A previsão do comportamento de um projeto de uma barragem quanto a estabilidade, deformação e estanqueidade são avaliados utilizando-se de programas computacionais como ferramenta de análises de percolação e estabilidade, considerando a geometria da seção do aterro e fundação da barragem e as propriedades dos materiais constituintes do aterro e da fundação.

Quando o assunto é estanqueidade, em que se deve conhecer o fluxo de percolação em um meio poroso devemos lembrar que a permeabilidade do meio pode variar em diferentes direções (horizontal e vertical) e para diferentes profundidades, conforme o nível de tensões atuantes.

Em fundações a sequência de formações de solo e rocha apresentam um perfil de permeabilidade própria. Em formações rochosas o fluxo de percolação é ainda mais

complexo, de difícil previsibilidade na fase de projeto, pois conforme a ocorrência de descontinuidades na rocha, estas podem ser a responsável por controlar o fluxo pela fundação.

O fluxo em um meio confinado, como ocorre em fissuras e trincas no solo e descontinuidades na rocha apresentam individualmente valores bem superiores a permeabilidade do meio em que se inserem. Distingue-se aqui a permeabilidade de um meio poroso da condutividade de um meio confinado. Este último descreve a facilidade que um meio confinado oferece ao fluxo. Cruz (1996) destaca que as condutividades em fissuras e fraturas rochosas são da ordem de  $10^1$  a  $5 \times 10^2$  cm/s, equivalente ou maior a porosidade de um enrocamento limpo.

Deve-se destacar que o fluxo de percolação pela fundação na maioria dos casos exerce um papel dominante, ou seja, é bastante superior ao fluxo pelo maciço de aterro compactado. Cruz (1996) evidenciou isso em seus estudos direcionados a 100 (cem) barragens brasileiras de terra.

Cruz (1996), ressaltou as incertezas quando o assunto é fluxo pela fundação e destacou que sendo a afirmativa de que “a arte de projetar uma barragem é essencialmente a arte de controlar o fluxo” válida, deveriam ser gastos mais tempo em estudos sobre por quais caminhos de fluxo a água pode passar, priorizando o tempo gasto no projeto do controle de fluxo, do que em muitas e exageradas análises de estabilidade que, além de cobrir os mecanismos prováveis de ruptura, varrem um vasto campo de rupturas improváveis e mesmo impossíveis.

Informações da rocha de fundação obtidas nas investigações de campo a partir das sondagens e extração de testemunhos, possibilitam avaliar a presença e a direção das descontinuidades, o grau de fraturamento, de alteração, de coerência o percentual de recuperação e a designação de qualidade da rocha (RQD), contudo esses parâmetros pontuais não dizem muito quanto a estanqueidade do meio, se não avaliados em conjunto com ensaios de permeabilidade.

Os ensaios tridimensionais quando aplicado em maciços rochosos fornecem dois tipos de informação da maior importância quanto ao fluxo no meio, quais sejam: os tensores de permeabilidade, o qual o maciço rochoso pode ser associado a um meio poroso anisotrópico e se o maciço rochoso tem o seu fluxo controlado por descontinuidades preferenciais, que, neste caso, deverão ser consideradas e analisadas através de um modelo de fluxo descontínuo.

Nota-se assim, a dificuldade de se reproduzir com exatidão as condições de fluxo pela fundação empregando um coeficiente equivalente de permeabilidade para o meio ou horizonte estudado, conforme tradicionalmente empregados em projetos a partir de ensaios de permeabilidade convencionais e pontuais.

Mello (1991) citado por Cruz (1996) afirmou que “traçar redes de fluxo em barragens é um bom exercício para divertir os filhos, mas essas redes pouco têm a ver com o fluxo que ocorre em barragens.”

Ressalta-se que quando Mello (1991) citado por Cruz (1996) chamou a atenção para o traçado das redes de fluxo em projetos ele não questionou a Lei de Darcy, válida para a condição de fluxo laminar e a equação de Laplace, mas sim a grande dificuldade de se prever, na fase de projeto, o comportamento da linha de fluxo da barragem em serviço.

Perceba que o se quer chamar a atenção em relação a observação de Mello é a dificuldade, na fase de projeto, de se estimar as variações de permeabilidade de um meio poroso anisotrópico, a partir de ensaios pontuais de permeabilidade, uma vez que podem ocorrer mudanças de permeabilidade nas direções horizontal e vertical e em diferentes profundidades e, assim sendo, faz-se uso de recursos como a adoção de fator de segurança no cálculo das vazões de percolação, que visa garantir a segurança no dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna de uma barragem.

### 3.6 MECANISMO DE FLUXO EM MEIOS POROSOS

A compreensão adequada dos mecanismos de fluxos de percolação em barragens é requisito fundamental à análise de percolação e por conseguinte à segurança da obra. Para tanto deve-se conhecer as forças atuantes em um processo de percolação de um fluido em um meio poroso.

A percolação de um fluido em meios porosos se dá pela diferença de potencial hidráulico entre dois pontos, resultante da energia acumulada no tempo e no espaço reportada a qualquer partícula fluida, em estado de repouso ou de movimento, sob a forma de energia gravitacional, piezométrica e cinética. Em hidráulica de meios permeáveis o potencial hidráulico é simbolizado pela letra “h”.

A afirmação anterior pode ser entendida como a ocorrência de fluxo de um ponto de elevada energia para outro ponto de menor energia pela interconexão de vazios ou poros do meio.



A diferença de potencial hidráulico entre dois pontos ocorre devida a perda de energia do fluido ao longo do percurso, que é dispendida para vencer a resistência do meio imposta ao fluido. Essa resistência que o meio poroso impõe ao fluido é medida através da sua permeabilidade, conforme já tratado.

A equação de Bernoulli é aplicada para o fluxo de água em meio poroso e representa o potencial hidráulico em um ponto específico.

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.1)$$

Na análise de percolações em solos sob regime laminar a parcela da energia cinética pode ser desconsiderada, por ser desprezível em razão das baixas velocidades. Logo, o potencial hidráulico em um ponto específico do fluxo de percolação pode ser adequadamente representado pela equação:

$$h_1 = z_1 + \frac{u_1}{\gamma_w} \quad (3.2)$$

onde  $h_1$  é o nível piezométrico medido em metros no ponto 1,  $z_1$  é altura topográfica do ponto 1 em relação ao plano de referência, medido em metros,  $u_1$  é a pressão neutra ou poro pressão exercida pelo fluido no ponto 1 e  $\gamma_w$  é a densidade específica da água.

A diferença de potencial hidráulico ( $\Delta h$ ) entre o ponto 1 e o ponto 2, representada por  $h_1 - h_2$  divididos pela distância percorrida pelo fluxo entre esses dois pontos é conhecido como gradiente hidráulico ( $i$ ).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.3)$$

O gradiente hidráulico tem relação linear com a velocidade do fluxo em um regime laminar,  $v \propto i$ .

Darcy (1856) realizando observações do comportamento do fluxo de água através de areias limpas verificou que a velocidade do fluxo através de solos saturados pode ser expressa pela perda de energia da água no solo (gradiente hidráulico), que deu origem a equação 3.4, conhecida como a Lei de Darcy.

$$v = k \cdot i \quad (3.4)$$

$v$  = velocidade de descarga do fluxo de água por uma camada de solo em (cm/s);

$k$  = coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica) em (cm/s);

$i$  = gradiente hidráulico adimensional.

A Lei de Darcy é válida para condições de fluxo laminar e é aplicável para a maioria dos solos saturados, destacando a relação linear do gradiente hidráulico com a velocidade do fluxo.

Em descontinuidades das rochas, em meios pedregulhosos, cascalho e areias grossas podem resultar em regime de fluxo turbulento, para isso requerem altos valores de gradientes hidráulicos e a proporção linear entre velocidade do fluxo e gradiente hidráulico não é válida.

O fluxo de água através de uma área unitária ( $A$ ) do meio poroso no tempo pode ser expressa pela equação:

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (3.5)$$

$q$  = vazão de infiltração em ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$A$  = área da seção em  $\text{cm}^2$ .

No caso de barragens a percolação de água pelo maciço do aterro e da fundação não ocorre em apenas uma direção e em muitas das vezes não é uniforme nas direções horizontal e vertical ao longo de toda a seção, como já observado, assim faz se uso do conceito de rede de fluxo, baseada na equação da continuidade de Laplace a qual governa a condição de regime permanente, na condição de solo saturado, para determinação da percolação de água pelos maciços.

A taxa de percolação em uma unidade de solo nas direções horizontais e verticais podem ser expressas:

$$k_x \frac{d^2 h}{dx^2} + k_z \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad (3.6)$$

Para solos isotrópicos  $k_x = k_z$  a expressão pode ser reduzida para:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad (3.7)$$

Os dois grupos de funções da equação diferencial de Laplace podem ser representadas graficamente por duas famílias de curvas ortogonais entre si: as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais.

Para a resolução da equação de fluxo pelo método gráfico faz se necessário determinar as condições de contorno, as quais são diretamente ligadas à geometria do problema a ser tratado. Três tipos de condições de contorno são geralmente observados nas análises de percolação, são eles:

- a) Tratar uma das superfícies como impermeável no caso de haver uma diferença significativa entre os coeficientes de permeabilidade entre dois meios adjacentes. Assim o fluxo ocorre integralmente no meio mais permeável e o

alinhamento da superfície impermeável corresponde a direção da linha de fluxo, logo as linhas equipotenciais são perpendiculares a superfície impermeável.

- b) Todos os pontos da superfície localizada no fundo do reservatório têm o mesmo potencial hidráulico, logo todas as linhas de fluxo são perpendiculares ao fundo do reservatório.
- c) A linha freática é a fronteira superior das linhas de fluxo em um meio saturado, logo as equipotenciais são perpendiculares a linha freática.

Definidas as condições de contorno se deve traçar a rede de fluxo representada graficamente pelas linhas de fluxo e pelas linhas equipotenciais. O traçado da rede de fluxo requer experiência e conhecimento da variação da permeabilidade no meio. A determinação das vazões de percolação pelo método gráfico é calculada considerando o número de canais de fluxo ( $N_f$ ) e o número de perdas potenciais ( $N_d$ )

A taxa de percolação ( $\Delta q$ ) por linha de fluxo em solos isotrópicos com rede de fluxo com malha retangular é determinada pela seguinte equação:

$$\Delta q = k\Delta h \frac{n}{N_d} \quad (3.8)$$

Onde  $n = l/b$ , “l” representa a distância entre as linhas equipotenciais e “b” representa a distância entre as linhas de fluxo.

A taxa de percolação total é determinada multiplicando a equação 3.8 pelo número de linhas de fluxo ( $N_f$ ).

$$q = k\Delta h \frac{N_f}{N_d} n \quad (3.9)$$

Lembrando que  $\Delta h$  é a diferença de carga entre montante e jusante da seção da barragem analisada,  $N_f$  é o número de linhas de fluxo e  $N_d$  é o número de linhas equipotenciais e  $k$  o coeficiente de permeabilidade do meio poroso.

A rede de fluxo em solos anisotrópicos pode ser traçada alterando a escala horizontal ( $x$ ) para  $x = \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}$  vezes a escala vertical ( $z$ ).

Assim, as linhas de fluxo são traçadas interceptando as linhas equipotenciais em ângulo de  $90^\circ$  formando uma malha quadrada e a taxa de percolação pode ser expressa pela equação 3.10.

$$q = \sqrt{k_x k_z} \frac{\Delta h N_f}{N_d} \quad (3.10)$$

A dificuldade de resolver problemas de fluxos por métodos analíticos em caso de seções mais complexas, com diferentes materiais de diferentes permeabilidades levou

a aplicação de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas.

Os métodos numéricos permitem subdividir a zona de fluxo em uma série de pequenos elementos geométricos, sendo o comportamento do fluxo estudado em cada um deles. Quando se dispõe de ferramenta computacional eficiente a resolução de problemas de fluxo por métodos numéricos se torna mais fácil, fornecendo soluções com nível de aproximação que pode ser bastante razoável. A confiabilidade dos resultados vai depender do tipo de formulação, das condições de contorno impostas e dos parâmetros adotados.

Conhecendo os valores de poro pressões em serviço, as razões de anisotropia do meio poroso podem ser variadas até que a rede de fluxo da simulação computacional se aproxime dos resultados verificados em campo.

### 3.7 PRESSÕES ATUANTES EM SOLOS COMPACTADOS

Qualquer elemento ou volume de solo, seja da fundação ou do maciço compactado de uma barragem, contido na massa de solo que o envolve está sujeito a um estado de tensões externas, que está em equilíbrio, com o estado das tensões internas (Cruz, 1996).

As tensões internas que resistem as tensões externas, por assim dizer, às variações de volume e ao cisalhamento são denominadas de tensões efetivas.

Nos solos saturados a tensão efetiva ( $\sigma'$ ) é traduzida pela expressão original de Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (3.11)$$

onde  $\sigma$  = tensão total de confinamento e  $\mu$  é a poro pressão ou pressão exercida pela água, medidos em  $\text{kg/cm}^2$  ou kPa.

Em solos não saturados a presença de ar e água nos vazios do solo fornecem alguns componentes a mais que são a tensão de sucção ou sucção matricial, resultante da soma dos efeitos capilares e forças elétricas, que retém as partículas de água nos vazios, a pressão do ar e a pressão que existe na área de contato entre as partículas do solo.

A sucção matricial é definida pela diferença entre a pressão do ar e a pressão da água ( $u_a - u$ ). A parcela decorrente do excesso de pressão sobre a pressão no ar é definida pela pressão total menos a pressão do ar ( $\sigma - u_a$ ) e a pressão de contato é em função da área de contato entre as partículas do solo.

Em solos compactados no entorno da umidade ótima (densidade seca máxima) podem conter o ar na estrutura sob a forma contínua ou isolado sob a forma de ar ocluso (bolha).

Quando o ar ocupa um volume tal que tenha livre comunicação pelos vazios, a pressão do ar deve ser igual ou próxima a atmosférica. Na condição de ar ocluso a pressão do ar deve ser maior do que a da água e havendo o aumento da pressão da água pelo acréscimo de água o ar é dissolvido na água até a condição de saturação completa do solo.

Quando o solo se aproxima da saturação a pressão no ar tende a zero. Quando o solo se torna progressivamente seco a sucção aumenta podendo crescer significativamente, tendo em vista que a pressão da água se torna cada vez mais negativa.

Para materiais porosos não saturados a tensão efetiva que exerce influência direta no comportamento do solo à compressão e ao cisalhamento pode ser expressa da seguinte forma:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + X_a(u_a - u) + Yp_c \quad (3.12)$$

Onde  $\sigma'$  é a tensão efetiva,  $\sigma$  é pressão total,  $u_a$  é a pressão do ar,  $u$ , é a pressão exercida pela água,  $p_c$  é a pressão de contato entre as partículas sólidas,  $X_a$  é um fator expresso pela área ocupada pela água no contato entre duas partículas do solo dividido pela área total, que é expressa pela soma da área de contato entre as partículas, da área ocupada pela água e da área ocupada pelo ar e finalmente  $Y$  é um fator expresso pela área de contato entre as partículas dividido pela área total.

### 3.8 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

As forças de contato entre os grãos ou blocos de rocha são determinantes no comportamento dos materiais granulares (Cruz, 1996).

O problema da ruptura em materiais granulares tem dois aspectos fundamentais: a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento (Cruz, 1996).

Havendo um aumento das pressões internas ou tensões efetivas, ocorre um aumento das forças de contato e um proporcional aumento das áreas de contato entre os grãos.

A resistência ao cisalhamento para solos saturados é determinada por uma reta definida pela equação:

$$\tau_c = c + \sigma' \cdot \tan \phi \quad (3.13)$$

onde  $\tau_c$  = resistência ao cisalhamento do solo,  $c$  é a coesão do solo,  $\sigma'$  é a tensão efetiva medidos em  $\text{kg/cm}^2$  ou kPa e  $\phi$  é o ângulo de atrito entre as partículas medido em graus.

Em solos argilosos a parcela da coesão é significativa devido as forças elétricas de atração entre as partículas. Em areias essa parcela é desprezível e a resistência ao cisalhamento é mobilizada pelo ângulo de atrito entre os grãos, diretamente relacionada a tensão efetiva de confinamento entre as partículas.

#### **4 RESULTADOS E INFORMAÇÕES DO PROJETO.**

As informações que se tinham disponíveis da barragem Granjeiro, antes das investigações de campo, é que se trata de uma estrutura de terra com altura máxima de 13,56 m, extensão de 596 m e crista com largura de 6,0 m, de seção homogênea, que barra o rio Jaburu, no limite entre os municípios de Ibiapina e Ubajara no Estado do Ceará, que conta com um cut-off a montante do eixo até o topo rochoso e com um sistema de drenagem interna constituído de dreno horizontal de areia de 50 cm de espessura e dreno de pé em enrocamento à jusante, posteriormente confirmados com os levantamentos de campo para o segmento nas proximidades da calha original do rio, representado pelas seções das estacas 10+7,75 e 14+12,75, localizadas respectivamente próxima da margem direita e na região central da barragem, figuras 4.1 e 4.2, onde o aterro apresenta maior altura.

Em vistorias de campo também foram identificados que a barragem conta com rip-rap no talude de montante, localizado acerca de 1m abaixo da cota de coroamento e tapete impermeável à montante, ao longo de toda a extensão da barragem. O tapete impermeável é um indicativo da preocupação, durante a construção, com o gradiente hidráulico proveniente de percolações pela fundação.

Os levantamentos de campo, realizados no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA, complementaram as informações disponíveis com dados geométricos da seção da barragem e com resultados provenientes das investigações geológicas/geotécnicas dos materiais constituintes do aterro e da fundação da barragem.

Pode-se resumir, conforme resultados que serão apresentados na sequência, que o aterro da barragem consiste em uma estrutura de seção homogênea de solo, que apresentou permeabilidade muito baixa e coesão elevada. A fundação é constituída por um solo coluvionar/aluvionar remanescente, de até 5 metros, seguida de um pacote de rocha medianamente alterada por lixiviação (A3), medianamente coerente (C3), de até

3,5 metros de espessura, marcada por fraturas sub-verticais e descontinuidades sub-horizontais e logo abaixo pacotes de arenito pouco alterado (A2) separados por planos sub-horizontais, preenchidos por siltito ou argilito, que marcam períodos de formações da rocha.

À jusante do eixo da barragem, entre as seções da figura 4.1 e 4.2, foi identificada entre o solo coluvionar/aluvionar e o topo rochoso, constituído por rocha medianamente coerente, uma lente de aproximadamente 50 cm de cascalho aluvionar, observado na região da brecha aberta pelo empreendedor para injeção de calda de cimento na fundação, serviços que foram realizados após as intervenções emergenciais iniciais.

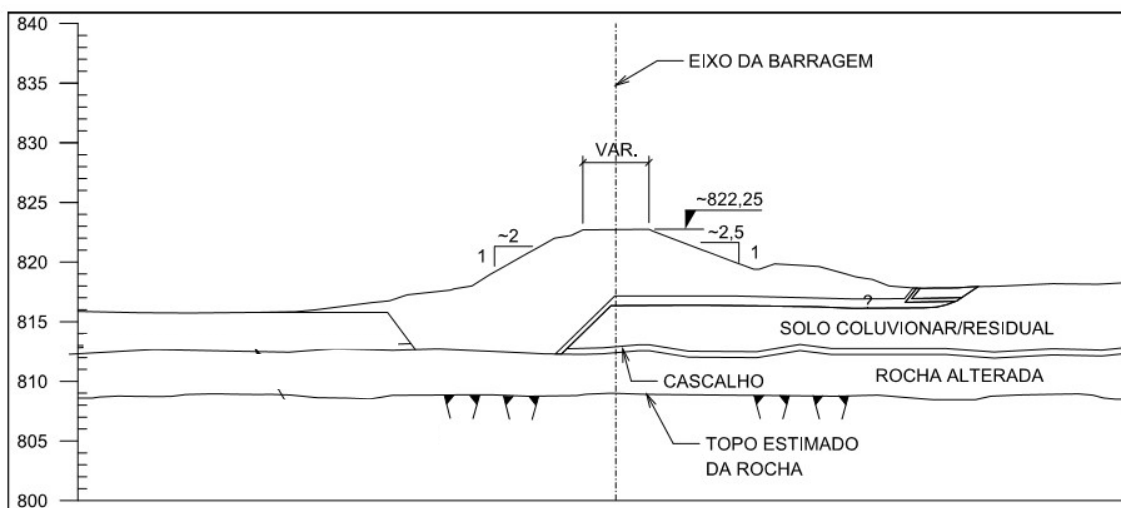
Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos com os levantamentos topográficos e as investigações geológicas/geotécnicas realizadas no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA BARRAGEM GRANJEIRO

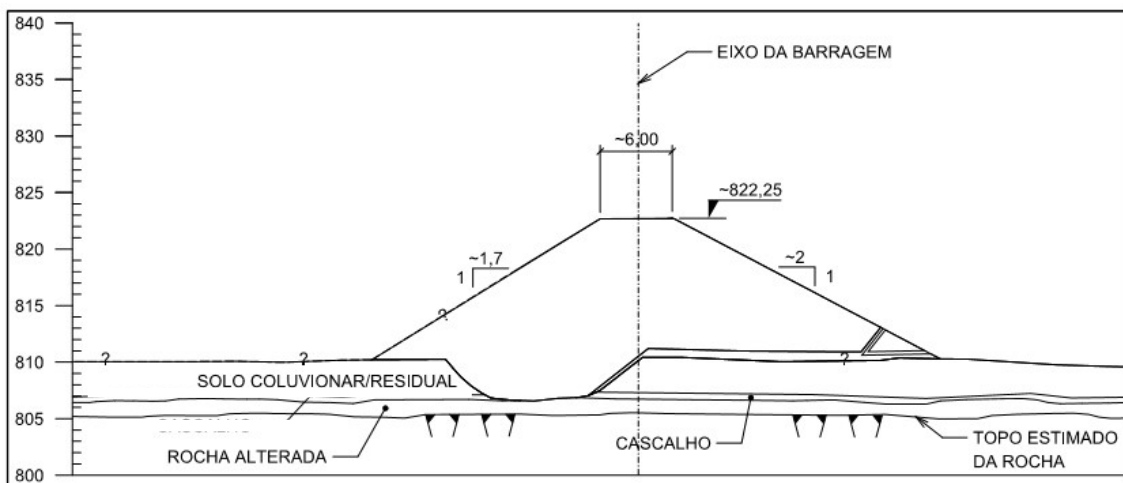
A Seção geométrica da barragem Granjeiro foi definida em levantamento topográfico tipo “as built” no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA e possui altura máxima de 13,56 m e taludes com inclinação média de 1V:1,7H a montante e 1V:2H a jusante. A crista possui largura de aproximadamente 6,0 m e se encontra na EL. 822,25 m.

A barragem conta com um cut-off a montante do eixo até o topo rochoso, um dreno horizontal a jusante do eixo e um dreno de pé em enrocamento, porém não constatados nas investigações geológicas/geotécnicas entre as estacas 21+00 e a ombreira esquerda.

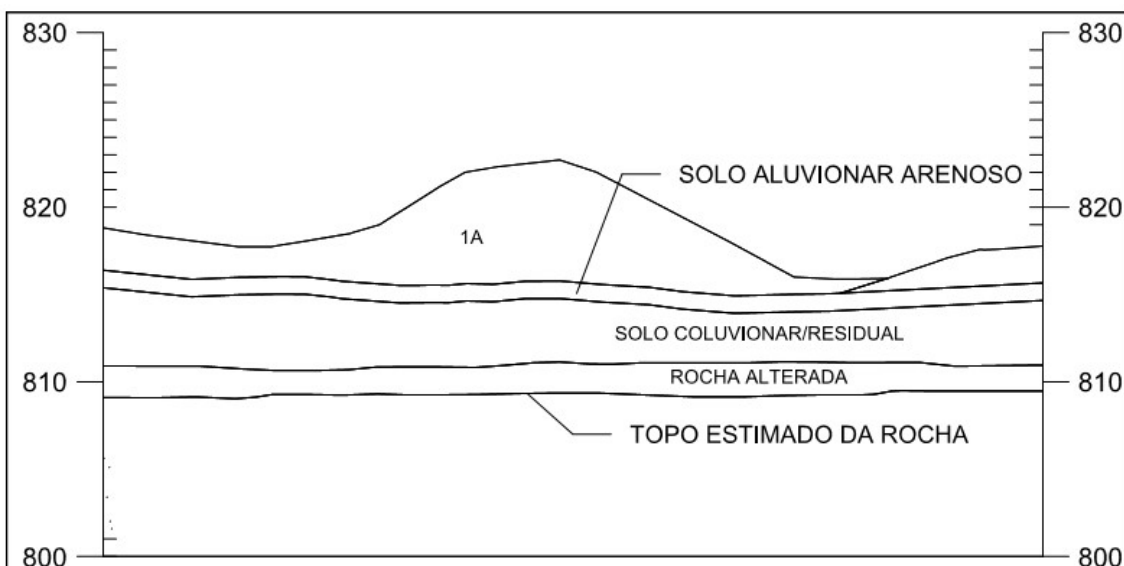
As seções da barragem Granjeiro estão retratadas nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.



**Figura 4.1** - Seção da barragem Granjeiro na estaca 10+7,75, adaptada de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.



**Figura 4.2** - Seção da barragem Granjeiro na estaca 14+12,75, adaptada de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.



**Figura 4.3** - Seção da barragem Granjeiro na estaca 25+12,60, extraída de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO DO ATERRO E FUNDAÇÃO – INVESTIGAÇÕES DE CAMPO

As investigações geológicas/geotécnicas na área da barragem Granjeiro consistiram na realização de sondagens a percussão e sondagens mistas no aterro da barragem e fundação.

Foram realizadas cinco sondagens a percussão na barragem Granjeiro a fim de investigar o maciço do aterro e da fundação, sendo três ao longo do eixo da barragem e duas sondagens na ombreira direita.



A sondagem a percussão SP-101 localizada na ombreira direita a montante do eixo da barragem ficou limitada a profundidade de 1 (um) metro de um solo silte areno argiloso muito compacto, atingindo o impenetrável. A sondagem SP-102 também localizada na ombreira direita à jusante do eixo da barragem atingiu o impenetrável na profundidade de 10,55 metros.

De 0,00 m a 4,50 m a sondagem SP-102 cortou três horizontes de solos silto-arenosos e areia-siltosa, com cores entre o marrom avermelhado e roxo amarelado, variegados, de pouco a medianamente compactos. Os valores de SPT variaram entre 7 e 11 golpes para cravação dos últimos 30 cm em toda a extensão deste trecho. Pelo parâmetro de resistência é provável se tratar de solos coluviais ou residuais.

De 4,50 m a 10,55 m a sondagem SP-102 cortou um solo silto-argiloso, com fragmentos laterizados, de cor roxa, variegado, rijo a duro. Os valores de SPT neste trecho variaram entre 15 e 23 golpes para cravação dos últimos 30 cm. Pelas características geológicas este material deve se tratar de um solo de alteração do material laterizado encontrado na parede direita do talude de escavação do vertedouro de emergência.

A sondagem SP-103 está localizada no eixo da barragem na porção centro-direita onde o aterro apresenta maior altura, aproximadamente 13 metros. Na profundidade entre 0,0 e 12,0 metros a sondagem cortou um material descrito pela classificação táctil-visual como silte areno argiloso, com SPT nos primeiros 2 metros igual a 21 golpes para cravação dos últimos 30 cm e SPT médio de 16 golpes para cravação dos últimos 30 cm nas demais profundidades até 12 metros abaixo da superfície.

Entre 12,0 e 13,0 metros a sondagem cortou uma camada de material pouco compacta, SPT igual a 7 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que é provável se tratar do dreno horizontal da barragem.

Na profundidade de 13,0 a 15,5 metros a sondagem SP-103 cortou um material descrito como silte areno argiloso, medianamente compacto, com SPT variando entre 10 e 16 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que pelo parâmetro de resistência é provável se tratar da trincheira impermeável de montante.

Entre 15,50 e 17,55 metros foi identificado solo fofo, com valores de SPT entre 4/25 e 3 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que possivelmente se trata de um remanescente de solo coluvionar ou aluvionar da fundação da barragem, que não foi removido durante as escavações das obras de terraplenagem. O impenetrável se deu na cota 17,55 metros.

A sondagem SP-104 localizada no eixo da barragem na porção centro-esquerda atingiu o impenetrável na profundidade de 10,35 m. De 0,0 a 8,2 metros a sondagem cortou um material descrito como silte areno argiloso, com SPT variando entre 10 e 24, cujo valor médio são 17 golpes nos primeiros 6 metros e 10 golpes nos últimos 2 metros para cravação dos últimos 30 cm, que indicam se tratar do aterro da barragem.

Destoa dessa condição camada localizada na profundidade de 4,0 metros, que indica passagem por camada pouco compacta com SPT de 5/25 golpes, que pode estar relacionado a fatores diversos, desde o descuido na seleção e compactação do material durante a execução da barragem até a condição de camada que vem perdendo resistência ao longo dos anos em razão de processo de erosão interna.

De 8,20 a 9,50 metros a sondagem atravessou solo pouco compacto, com SPT igual a 7 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que possivelmente indica se tratar de um remanescente de solo coluvionar da fundação da barragem, localizado à jusante da trincheira de vedação. O impenetrável se deu ao final dessa camada de solo.

A sondagem a percussão SP-105, localizada à margem esquerda, cortou entre 0,0 e 2,65 metros de profundidade solo silto areno-argiloso, de cores marrom avermelhado/marrom acinzentado, de medianamente compacto a compacto, com valores de SPT entre 14 e 21 golpes para cravação dos últimos 30 cm. Pelas características geológicas/geotécnicas e geométricas estes solos devem fazer parte do aterro compactado da barragem.

De 2,65 a 5,90 metros a sondagem SP-105 cortou solo silte areno argiloso cinza, medianamente compacto, com valores de SPT entre 12 e 17 golpes para cravação dos últimos 30 cm. Pelas características geológicas/geotécnicas este solo deve ser do aterro da barragem.

Entre 5,90 e 8,0 m de profundidade foi detectada uma areia fofa fina a média, provavelmente de origem aluvionar, com valores de SPT entre 1/25 e 1/43 golpes para cravação dos últimos 30 cm. Nesta sondagem o impenetrável se deu na cota 8,05 m alcançando o arenito.

As sondagens mistas foram executadas no eixo da barragem sendo uma na ombreira direita e três alternadas às sondagens à percussão ao longo do eixo da barragem, totalizando 76 metros de perfuração com o objetivo de investigar o aterro e a fundação em solo e rocha.

As amostras obtidas nas sondagens extraídas do amostrador padrão do SPT e pela coleta de testemunhos de rocha passaram por avaliação táctil-visual e algumas

características geotécnicas dos materiais foram obtidas através dos ensaios de penetração SPT, de permeabilidade nos solos e de perda de água sob pressão em rocha.

A sondagem mista SM-101 realizada na ombreira direita cortou em sua totalidade uma rocha sedimentar laterizada, de cor vermelho-escuro, com trechos incoerentes não recuperados, determinando perdas de material na perfuração, similar ao encontrado em afloramento junto ao talude direito do canal de emergência.

A recuperação de material foi da ordem de 67 %, sempre fragmentado (F5) e muito alterada (A4) a solo de alteração (A5), coerente (C2 - no material recuperado) e com RQD igual a zero, indicando maciço de qualidade péssima (R5).

O ensaio de perda de água sob pressão em rocha na profundidade de 4,0 a 6,0 metros indicou uma permeabilidade de  $2.10^{-5}$  cm/s para o meio.

A sondagem SM-102 foi perfurada a partir da crista da barragem, localizada próximo a ombreira direita, entre o vertedor executado durante intervenções emergenciais em março/2019 e o local do incidente provocada pela erosão interna. Os primeiros metros de 0,0 a 3,80 metros o material é descrito como argila arenosa marrom amarelada não plástica, com SPT variando entre 15 e 33 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que dizem respeito ao aterro compactado da barragem. De 3,80 a 6,50 metros o material é descrito como argila arenosa não plástica e de 6,50 a 9,70 o material é descrito como areia fina argilo siltosa, nestas profundidades o SPT variou entre 5 e 7 golpes para cravação dos últimos 30 cm, que pelo parâmetro de resistência é provável se tratar de solo coluvionar ou residual da fundação.

Na sequência, na profundidade de 9,70 até 10,80 metros a sondagem cortou uma camada descrita como areia fina a média siltosa, pouco argilosa com pedregulho grosso de cor amarela-acizentada, sem recuperação, que aparenta tratar de um cascalho aluvionar, também verificada na parede do talude da brecha, aberta pela intervenção do proprietário, como medida para realização de serviços de injeção de calda de cimento, após o incidente ocorrido em março/2019. A sondagem SPT foi interrompida atingindo o impenetrável nessa camada.

Na sequência a sondagem atinge um pacote de arenito com 3,20 metros de espessura cor cinza-claro com granulometria grossa, estratificado, medianamente coerente (C3), com sinais de descoloração indicando alteração por lixiviação (A3). A recuperação neste trecho variou entre 36 % e 70 % e, RQD entre 14 % e 17%, indicando maciço de qualidade péssima (R5).

De 14,30 a 19,30 metros a sondagem cortou arenito pouco alterado (A2) e medianamente fraturado (F2) com recuperação entre 75 % e 94 % e RQD entre 64 % e 25 %, indicando que o maciço tem qualidade regular (R3) a má (R4). Aos 15,50 m é descrita uma passagem silto-argilosa, a qual está relacionada a uma interface de camadas.

Os resultados dos ensaios de infiltração nesta sondagem indicam que no trecho em solo o aterro compactado da barragem não apresentou infiltração, o solo coluvionar da fundação apresentou permeabilidade da ordem de  $1,5 \times 10^{-5}$  cm/s na profundidade de 8 metros, enquanto o ensaio de perda d'água sob pressão (tipo Lugeon) indica para profundidades de arenito pouco alterado, que o maciço rochoso apresenta permeabilidade de  $10^{-5}$  cm/s.

A sondagem mista SM-103 foi perfurada a partir da crista da barragem no seu trecho central. De 0 a 10 metros corta o aterro compactado da barragem descrito como argila areno siltosa não plástica a pouco plástica, com SPT variando entre 11 a 27 golpes nos últimos 30 cm, com média de 18 golpes e desvio padrão de 5 golpes.

Entre 10 e 11 metros tem-se uma areia fina argilosa, que é provável se tratar do dreno horizontal da barragem, contudo apresentou valores de SPT alto igual a 25 para os últimos 30 cm. Entre 11 e 15 metros o material é descrito como argila arenosa não plástica com SPT variando entre 14 e 16 golpes nos últimos 30 cm, sendo mais provável se tratar da trincheira impermeável de montante.

Na profundidade de 15 a 29 metros a sondagem cortou arenito de cor cinza claro, medianamente coerente (C3), de pouco a medianamente alterado (A2/A3) e medianamente fraturado (F2), com recuperação entre 80 % e 100 % e RQD e entre 10 % e 79 %, indicando que o maciço tem qualidade variando de regular (R3) a péssimo (R5). Observam-se 4 passagens silto argilosas nas profundidades de 19,00 m (El. 803,99), 21,50 m (El. 801,49), 27,00 m (El. 795,99) e 27,50 (El. 795,49), as quais estão relacionadas ao material de preenchimento das interfaces de camadas de formação do arenito.

Os resultados dos ensaios de infiltração nesta sondagem indicam que o aterro compactado da barragem não apresentou infiltração e o ensaio de perda d'água sob pressão (tipo Lugeon) indica que o maciço apresenta permeabilidade característica H1 com coeficiente  $1,20 \times 10^{-5}$  cm/s, no trecho entre 24 a 29 metros.

A sondagem SM-104 foi perfurada a partir da crista da barragem no seu terço final junto a ombreira esquerda. De 0,0 a 5,75 metros a sondagem cortou um material descrito como argila siltosa pouco arenosa, com SPT variando entre 8 e 31 golpes para cravação dos 30 cm finais, com valor médio de 17 e desvio padrão elevado igual a 9. Essa grande

variação do SPT se deve ao valor obtido de 8 golpes na profundidade entre 3 a 4 metros, na qual se identificou uma argila areno siltosa cinza escura.

A sondagem SM-104, adjacente à sondagem SP-104, confirma a presença de uma camada pouco compacta na profundidade de 4 metros, descrita na sondagem SP-104 como um material silte areno argiloso pouco compacto, com SPT igual a 5 golpes nos 30 cm finais.

Assim, entre a sondagem SP-104 e SM-104, à profundidade de 4 metros, há uma camada pouco compacta, que se apresenta de maneira destoante em relação ao valor médio de resistência do solo do maciço do aterro da barragem.

Na profundidade de 5,75 a 11,8 metros a sondagem SM-104 corta predominantemente uma areia fina a média, siltosa a pouco argilosa, com cor predominante cinza. Os valores de SPT determinados nos ensaios executados variam entre 4/25 e 7 golpes para cravação dos 30 cm finais. As características geológico-geotécnicas indicam provavelmente se tratar de solos colúvio-aluviais do arenito presentes na fundação da barragem, com índice de resistência compatíveis com solos moles, de baixa compacidade e alta deformabilidade.

Na profundidade de 11,8 a 13,3 metros cortou arenito medianamente alterado (A3) com recuperação de 31% e RQD de 3 %, indicando que o maciço tem qualidade péssima (R5).

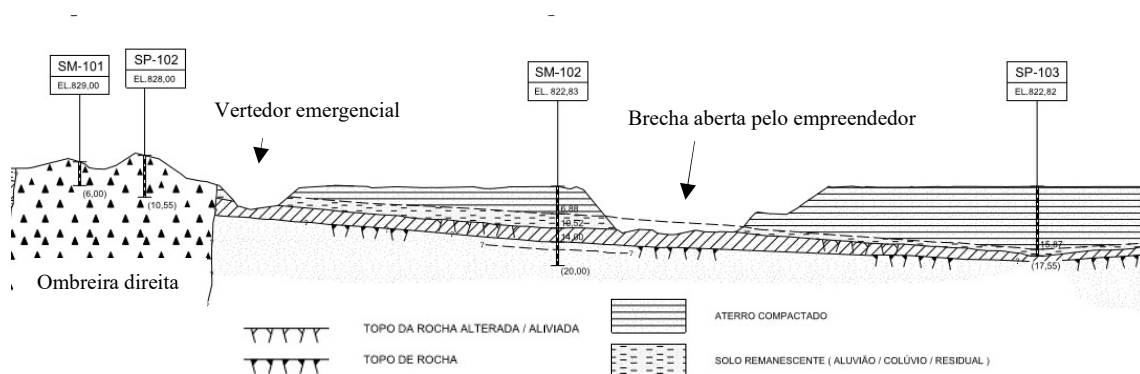
A partir de 13,3 metros até a profundidade de 21 metros o arenito se apresenta coerente (C2), pouco alterado (A2), com recuperação entre 95 % e 100% e RQD entre 69 % e 100 %, indicando que o maciço tem qualidade variando de regular (R3) a excelente (R1).

Os resultados dos ensaios de infiltração em solo (tipo Lefranc) realizados na sondagem SM-104 indicam nos primeiros 2 m de profundidade que o aterro da barragem não apresentou infiltração. Entre as profundidades de 2 a 7 m a permeabilidade característica é H1, com coeficiente médio de  $9,86 \times 10^{-8}$  cm/s, característico de um solo argiloso bem compactado.

Assim, as investigações geológico/geotécnicas de campo na barragem Granjeiro indicam a presença de um aterro constituído por uma argila areno siltosa de cor marrom avermelhado com índice de resistência adequada, com valor médio da ordem de 17 golpes no ensaio SPT e muito baixa permeabilidade, seguida de uma camada de depósito de solo colúvio- aluvionar na fundação com espessura entre 1,50 e 4,50 metros, que apresentou baixa resistência, variando entre 3 a 7 golpes no ensaio SPT, seguida de um pacote de

rocha medianamente alterada (A3), com espessura de até 3,50 metros, medianamente coerente (C3) e fraturada, com sinais de alívio superficial (fraturas abertas e oxidação), tratando-se de uma zona de baixa qualidade geomecânica e abaixo do topo rochoso a rocha se apresenta coerente (C2), e pouco alterada (A2), composta por arenitos estratificados, por vezes com lentes de siltitos e argilitos de pequena espessura.

O resumo da investigação geológico/geotécnica realizada na parte central até a ombreira direita da barragem Granjeiro está representado graficamente, conforme seção geológica indicada na figura 4.4 e o quadro 4.1 resume as características desses materiais do aterro e da fundação, conforme resultados da investigação de campo.



**Figura 4.4** – Seção Geológica da parte central até a ombreira direita da barragem Granjeiro, adaptado do relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

**Quadro 4.1** – Resultados da Investigação Geológico/Geotécnica do maciço da barragem Granjeiro.

Origem	Caracterização Tátil Visual	Prof. (m)	N <sub>SPT</sub>	K (cm/s)
Aterro da barragem	Argila areno siltosa	variável	17	$9,86 \times 10^{-8}$
Solo coluvionar / aluvionar	Silte arenoso / areia fina a média argilo siltosa	1,5 – 4,5	3-7	$1,50 \times 10^{-5}$
Rocha medianamente alterada	Arenito de péssima qualidade	0 – 3,2	-	-
Rocha Sã	Arenito fraturado de qualidade variando de excelente a péssimo	-	-	$1,0 \times 10^{-5}$

Nota-se que não se tem resultados de ensaio de infiltração para a camada de rocha medianamente alterada. Cruz (1996) esclarece essa questão, ao tratar da permeabilidade na interface solo/rocha, afirmando que quando os ensaios de infiltração são realizados em sondagens SPT ao se alcançar o impenetrável os ensaios são então interrompidos. Na retomada das sondagens por processo rotativo, há dificuldade inicial de fixar o obturador

nessa superfície e os primeiros ensaios de perda d'água já são executadas em profundidades inferiores.

Com a ausência dos ensaios de infiltração nos metros iniciais da sondagem rotativa não se obteve a permeabilidade do pacote de rocha medianamente alterada pelos ensaios de infiltração, logo onde poderiam estar ocorrendo fluxos preferenciais de percolação pela fundação.

Supõe-se que o horizonte do topo rochoso apresente permeabilidade elevada, sendo mais provável que tenha sido afetado por severos processos de carreamento de material, formando os evidentes caminhos preferenciais de percolação no sentido montante/jusante observados ao longo da operação da barragem Granjeiro.

Ressalta que o sistema de vedação da barragem, trincheira impermeável de montante, não intercepta a camada de rocha medianamente alterada e chama também a atenção a sondagem SP-103, localizada na porção onde a barragem apresenta maior altura e próxima ao local do incidente de 2019, que indicou camada de solo coluvionar ou aluvionar remanescente fofo, entre 15,50 e 17,55 metros de profundidade, abaixo da trincheira impermeável, o que é um indicativo que a trincheira impermeável não interceptou toda a espessura de solo da fundação em toda a extensão da barragem em que foi executada.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO DO ATERRO – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A partir das investigações de campo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do maciço do aterro para realização de ensaios em laboratório. Os ensaios tiveram como objetivo caracterizar o material do aterro da barragem Granjeiro em termos de resistência mecânica e permeabilidade.

As amostras indeformadas foram extraídas do aterro nos espaldares de montante e jusante e compreendeu os ensaios de resistência a compressão triaxial do tipo adensado não drenado (CU) e permeabilidade a carga variável.

As amostras deformadas do solo do aterro da barragem foram submetidas a ensaios de caracterização granulométrica por peneiramento e sedimentação, limites de consistência (limites de Atterberg) e peso específico real dos grãos.

Os resultados dos ensaios de granulometria e plasticidade realizados no maciço do aterro indicam tratar de um solo não plástico constituído de uma areia fina a média argilo siltosa, com 63% de areia 29% de argila e 8% de silte.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade permitem concluir que se trata de um maciço com permeabilidade muito baixa, que se situa na faixa de  $1 \times 10^{-8}$  cm/s, característico de solos argilosos bem compactados, não se observando diferença de resultados entre os ensaios efetuados a montante e a jusante do eixo da barragem.

Os resultados dos ensaios triaxiais indicaram valores de coesão e ângulo de atrito respectivamente de 84,7 kPa e 27,8°, não se observando diferença de resultados entre os ensaios efetuados a montante e a jusante do eixo da barragem. O ângulo de atrito obtido se apresenta compatível com o material do aterro, constituído por 63% de areia. Chamo a atenção para os valores de coesão obtidos, considerados acima do reportado na bibliografia para materiais semelhantes e uma possível incongruência entre os resultados dos ensaios de plasticidade e triaxiais, o que pode ser indício de erro em um ou nos dois tipos de ensaios, contudo não é possível precisar o erro.

Os resultados dos ensaios granulométricos informam que o solo do maciço do aterro apresenta em sua constituição da ordem de 30% de argila, o que é um forte indicativo de que o solo é coesivo.

Ressalto as características de diferentes misturas de areia e finos publicadas na literatura, que indicam ocorrer uma transição de comportamento quando o percentual de finos alcança 30 a 40% da composição da mistura, a partir da qual o comportamento da argila passa a se ressaltar no comportamento da mistura. No caso do solo do aterro o percentual médio de finos é de 37%.

Apesar da diferença de passante na peneira #200 entre as amostras oriundas de montante (41,7%) e de jusante (28,9%) da barragem não se observa variação nos valores de permeabilidade e de resistência entre os materiais dos espaldares de montante e jusante e, em campo, não se consegue verificar a olho “nu” diferença entre o material do maciço compactado a montante e a jusante do eixo, que corrobora com a consideração de maciço homogêneo.

O resumo com os resultados dos ensaios em laboratório do maciço do aterro pode ser verificado no Quadro 4.2.



**Quadro 4.2 – Resumo dos Resultados dos Ensaios de Laboratório do solo do aterro da barragem Granjeiro**

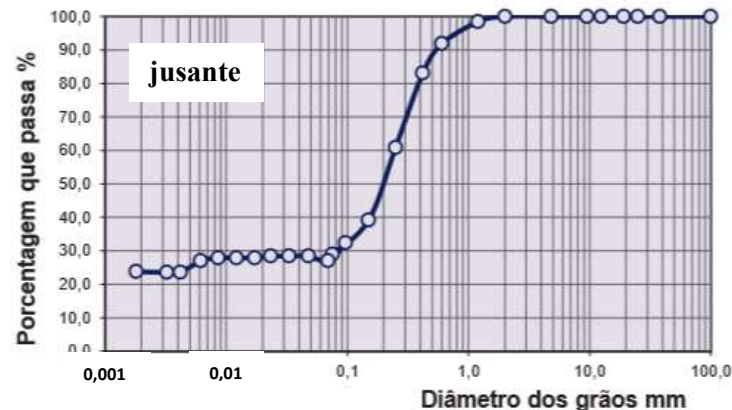
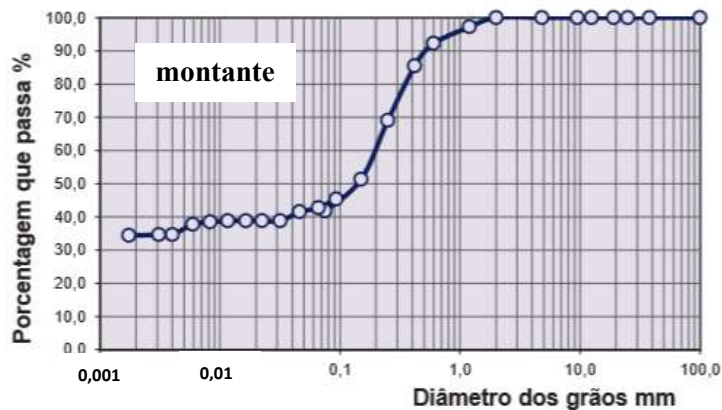
Local da coleta	Amostra	Prof. da Coleta (m)	Limites de Atterberg			Peso Esp. Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Análise Granulométrica									
			LL (%)	LP (%)	IP (%)		Passantes nas peneiras				Frações					
							# n° 4 (%)	# n° 10 (%)	# n° 40 (%)	# n° 200 (%)	Ped. (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
jusante	01	1,00	NL	23	0	2,146	100	100	83,1	28,9	0	8,2	41,9	21,7	4,6	23,7
montante	02	1,00	NL	16	0	2,165	100	100	85,5	41,7	0	7,8	32,0	15,3	10,4	34,4
Valor médio			NL	19,5	0	2,156	100	100	84,3	35,3	0	8,0	37,0	18,5	7,5	29,1

Ensaio de Permeabilidade a Carga Variável

Local da coleta	Amostra	Prof. da Coleta (m)	K (cm/s)
montante	Indeformada	1,00	1,0E-08

Ensaio Triaxial (CU)

Local da coleta	Amostra	Prof. da Coleta (m)	$\phi$	c
jusante	01	1,00	27,5	86,7
montante	02	1,00	28,0	82,6
Valor médio			<b>27,8</b>	<b>84,7</b>



#### 4.4 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO E ESTABILIDADE NA BARRAGEM GRANJEIRO

Uma vez definida a seção geológica da barragem (aterro e fundação) e os parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade dos materiais constituintes foram realizadas simulações bidimensionais de percolação do fluxo através dos maciços do aterro e da fundação da barragem Granjeiro, no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA, nas principais seções de análise.

Os parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade dos materiais constituintes das seções de análise de projeto, figuras 4.1 e 4.2, estão relacionados no quadro 4.3. Para o horizonte superficial da rocha foi adotado o parâmetro de permeabilidade dez vezes maior que o maciço rochoso. Os materiais drenantes tais como areia, transição e enrocamento foram considerados valores usuais de resistência e permeabilidade utilizados em projetos e obras similares.

**Quadro 4.3** – Parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade das seções de análise da barragem Granjeiro.

Material	Peso Específico (KN / m <sup>3</sup> )	Ângulo de Atrito $\phi$ (°)	Coesão (kPa)	Coef. de Perm. (K) (cm/s)	Coef. de Perm. (K) (m/s)
aterro compactado	19	28	28	1,0E-08	1,0E-10
solo coluvionar	19	22	15	1,5E-05	1,5E-07
cascalho de fundação	20	40	0	1,0E+00	1,0E-02
rocha alterada	21	35	100	1,0E-04	1,0E-06
maciço rochoso				1,0E-05	1,0E-07
areia de filtro	19	35	0	1,0E-02	1,0E-04
transição	21	38	0	1,0E+00	1,0E-02
enrocamento( rip-rap e dreno de pé)	21	42	0	1,0E+00 *	1,0E-02 *

Devido a condição do dreno de pé, que se encontra parcialmente contaminado entendeu por bem reduzir o coeficiente de permeabilidade em dez vezes nas verificações.

A análise do problema do fluxo em meio poroso se deu com a aplicação de ferramenta computacional baseada no método dos elementos finitos (MEF), a partir do uso do software SEEP/W, desenvolvido e distribuído pela GEO-SLOPE INTERNACIONAL Ltda.

A partir das seções, foram geradas as malhas não-estruturadas de elementos finitos. Adotou-se o modelo triangular, com dimensão global de 1,0 m. Nas seções de análise foram ainda definidas duas redes para mensuração do fluxo provenientes da percolação pelo maciço do aterro e pela fundação.

As análises consideraram que todo o fluxo percolado pelo maciço e parte do fluxo pela fundação seja captado e esgotado pela drenagem interna (dreno horizontal existente e dreno de pé). Dessa forma, o modelo apresenta condição permanente bidimensional. A definição da posição da linha freática ocorreu através de um processo de variação da condição de contorno dos nós aos quais é atribuída a condição de superfície de percolação. Considerou-se na análise uma situação de isotropia dos materiais e permeabilidade constante, independente do estado de saturação do material.

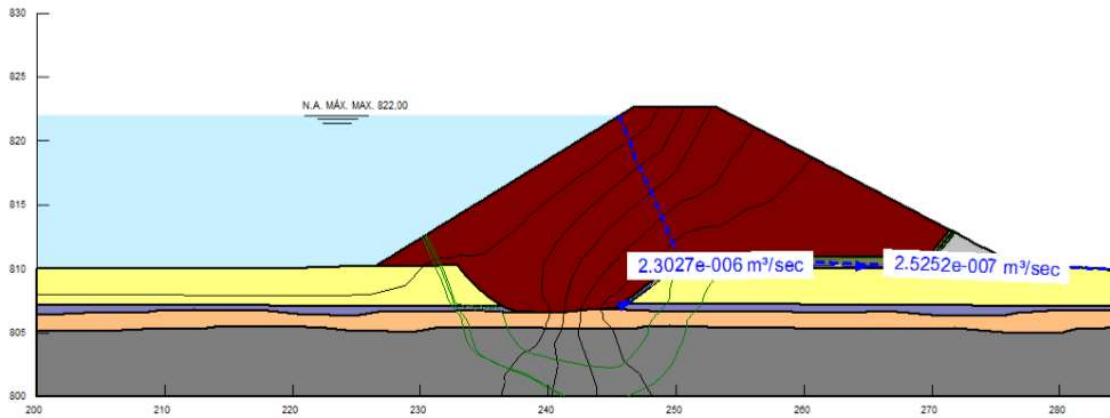
Faz-se aqui uma observação de que a razão ( $k_x/k_z$ ) para os materiais constituintes da seção de análise adotada igual 1 ou seja, isotrópico, se deu em razão da ausência de informações adicionais a respeito do comportamento da rede de fluxo da barragem Granjeiro, adotando-se então critérios convencionais de projeto para definição da rede de fluxo.

Nota-se a incerteza na fase de projeto quanto a rede de fluxo, pois ainda não se conhece ou não há informações reais de como a mesma irá se comportar em operação, haja vista as possíveis variações da permeabilidade nas direções horizontais e verticais em vista da variação dos estados de tensões nas diferentes profundidades do maciço.

Neste caso a adoção de valores de  $k_x/k_z$  diferente de 1 em diferentes profundidades do aterro seriam meros chutes, que não teriam efeito prático na análise de projeto, pois não teriam como ser aferidos. Na fundação considerou as permeabilidades obtidas nos ensaios de infiltração e também não foram realizadas considerações quanto a possibilidade de anisotropia dos materiais.

Modelou-se o fluxo através do terreno de fundação e do maciço compactado, para a condição de carregamento observada durante o incidente de 2019, ou seja, referente ao cenário da máxima carga na barragem antes do galgamento, de modo que a condição de contorno aplicada seja livre até o talude e terreno a jusante.

A figura 4.5 corresponde a representação gráfica obtida da rede de fluxo no maciço do aterro e da fundação na seção 2, correspondente à estaca 14+12,75.



**Figura 4.5** – Representação gráfica da Rede de Fluxo correspondente a seção 2, para uma condição de carregamento antes do galgamento (N.A.= 822,00 m), gerada no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

Observa-se uma linha freática sub-vertical em razão da ação gravitacional e da condição isotrópica considerada para o maciço.

O quadro 4.4, a seguir, relaciona os resultados de vazão unitária de percolação obtidos com o projeto da rede de fluxo para o filtro horizontal e dreno de pé.

**Quadro 4.4** - Resultados de vazões unitárias incidentes no sistema de drenagem interna

SEÇÃO	LOCAL	VAZÃO (m³/s/m)	
		Incidente	Considerado
Est. 10 +7,75	Filtro horizontal	1,01E-06	1,01E-05
	Dreno de pé	2,77E-09	1,01E-05
Est. 14+12,75	Filtro horizontal	2,30E-06	2,30E-05
	Dreno de pé	2,25E-07	2,53E-05

A vazão considerada no dreno de pé refere-se ao somatório das vazões incidentes no filtro horizontal e no dreno de pé e os valores obtidos através do modelo de cálculo foram majorados em dez vezes.

Em se tratando do dreno horizontal o gradiente é naturalmente baixo conforme se verifica a seguir.

$$q = k.i.A$$

$$A = 0,5 \text{ m}^2/\text{m} \text{ para dreno horizontal de } 0,5 \text{ m de espessura.}$$

$$k \text{ da areia} = 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$q = 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot i \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \tag{4.1}$$

Vazão obtida a partir da rede de fluxo no dreno horizontal na Seção 2 (Est. 14+12,75):

$$q = 2,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \tag{4.2}$$

Igualando (4.1) com (4.2), tem-se um gradiente resultante de 4,6% no dreno horizontal:

$$i \text{ (dreno horizontal)} = \frac{4,6 \cdot 10^{-6}}{10^{-4}} = 0,046$$

Para uma vazão de percolação afetada por F.S.=10, ou seja, majorada 10 vezes, o gradiente no dreno passaria a ser de 0,46 o que seria elevado e a estabilidade do talude de jusante cairia para 1,39 abaixo do critério de projeto (FS>1,5).

O resultado obtido na análise de projeto poderia indicar insuficiência do dreno horizontal na seção 2, que poderia provocar uma saturação progressiva do maciço compactado de jusante e perda de estabilidade do talude de jusante, contudo não há histórico de ocorrências de planos de instabilidade de taludes na barragem Granjeiro e é improvável que a saturação da base do espaldar de jusante resulte em processos erosivos no maciço do aterro, pois mesmo que resulte em gradientes hidráulicos acima do admissível para o dreno horizontal a velocidade de fluxo continuaria sendo muito baixa, devido à baixa permeabilidade do aterro.

Em se tratando do dreno de pé, considerando suas dimensões (2,0 x 2,0 m) e as vazões de percolação obtidas os mesmos se apresentam adequados com resultado de gradiente hidráulico da ordem de  $6,3 \times 10^{-4}$ .

Conclui dos resultados das análises numéricas de percolação e estabilidade, realizadas no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA, que o projeto convencional não traz informações, que indiquem fluxos de percolação importantes para a compreensão dos processos de formação de erosões internas no aterro da barragem e, em não se conhecendo o histórico e comportamento da barragem Granjeiro, a questão passaria despercebida na fase de projeto, como aparentemente passou despercebido no projeto original, aplicado na construção.

Ressalto que a modelagem clássica de fluxo, realizada na fase de projeto, é técnica consagrada na determinação de vazões de percolação em projetos de barragens e, são adequadas na grande maioria das feições geológico-geotécnicas analisadas.

## **5 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA BARRAGEM GRANJEIRO À EROSÕES INTERNAS – DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES RELACIONADAS AS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS EM 2012 E 2019.**

É notório ao se avaliar os resultados dos ensaios de permeabilidade que a fundação tem um papel dominante no fluxo de percolação, pelo menos mil vezes superior à

permeabilidade do maciço do aterro, contudo o que se observou em vistorias na barragem Granjeiro é que o fluxo de percolação pela fundação aparenta ser bem superior aos resultados teóricos obtidos, ainda assim, não estão identificadas as razões para formação de erosões internas no aterro da barragem Granjeiro.

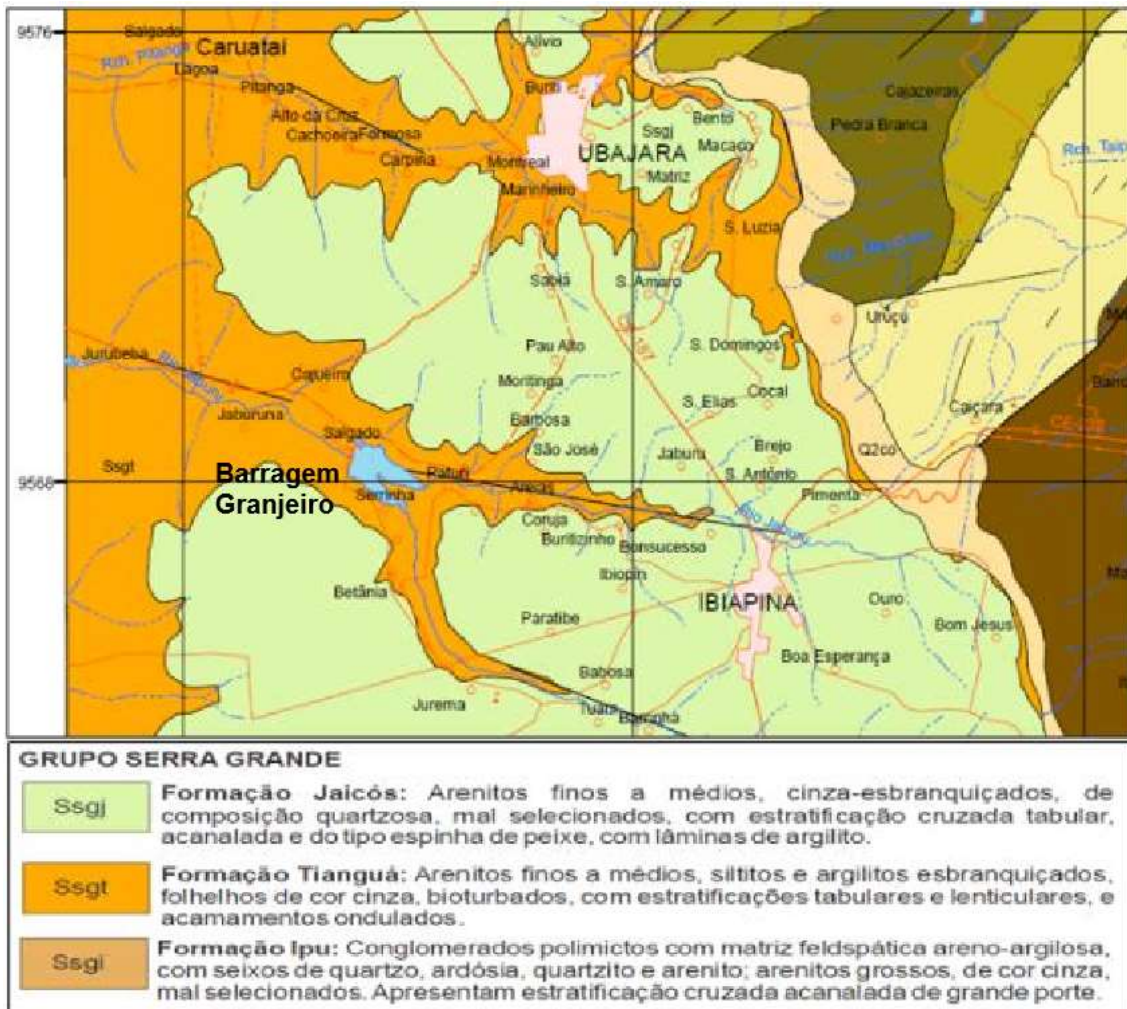
Os ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento realizados no maciço e amostras do aterro indicam um maciço com permeabilidade muito baixa, da ordem de  $10^{-8}$  cm/s e, parâmetro de coesão bastante elevado, indicando se tratar de um solo argiloso, que se encontra bem compactado, que permitiriam a princípio com muita segurança resistirem às forças de percolação para as variações previstas de gradiente hidráulico em barragens e suas fundações, a não ser que ocorressem circunstâncias específicas de gradientes hidráulicos muito altos, incomuns de ocorrerem em barragens ou suas fundações, ainda mais se tratando de barragem com 13,5 metros de altura, conforme já evidenciado no item 2.4.2 deste trabalho.

É partindo do princípio de que ocorrem na fundação da barragem Granjeiro gradientes hidráulicos muito altos, não identificados nos ensaios convencionais de permeabilidade, os quais são realizados na fase de projeto, que serão apresentadas as hipóteses a fim de convergir para aquela que seria a mais factível quanto a formação, continuidade e progressão das erosões internas no aterro da barragem.

Para tanto, para subsidiar essa avaliação voltemos a nossa atenção a fundação da barragem Granjeiro a fim de observar em detalhes as características do maciço da fundação, que poderiam indicar, com certo grau de certeza, como se desenvolve as erosões internas no maciço do aterro da barragem.

## 5.1 GEOLOGIA REGIONAL E GEOLOGIA LOCAL

A barragem Granjeiro se encontra nos domínios geológicos da Bacia Sedimentar do Parnaíba, no denominado Grupo Serra Grande, caracterizado por uma sequência de arenitos e conglomerados existentes na margem oriental da Bacia do Parnaíba, conforme mapa geológico apresentado na figura 5.1, obtido no Mapa Geológico, Folha Frecheirinha (SA.24-Y-C-VI) na escala 1:100.000 da CPRM – Serviço Geológico do Brasil.



**Figura 5.1** – Mapa Geológico da região da barragem Granjeiro

Segundo o mapa geológico regional a barragem Granjeiro se encontra em área de afloramento da Formação Tianguá.

Nas sondagens realizadas e vistorias de campo foi possível avaliar a estruturação do arenito no local da barragem Granjeiro, que é bem marcada pela estratificação cruzada acanalada e planos sub-horizontais com presença de uma camada de material mais fino de siltito e argilito, provavelmente marcando episódios deposicionais mais e menos intensos, refletindo os eventos de cheia e estiagem durante a deposição desses sedimentos.

A figura 5.2 retrata a porção final do canal de restituição do vertedouro onde se observam nos degraus formados com face para jusante a estruturação do arenito que se aflora na base do canal, formada pela estratificação cruzada acanalada e planos sub-horizontais, delimitando pacotes de arenito com presença de siltito ou argilito mais suscetível ao intemperismo e erosão.





**Figura 5.2** – Detalhe da estruturação do arenito na base do canal de restituição do vertedouro, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo.

No âmbito da geologia local, conforme observado nos afloramentos expostos, leva a crer que estas rochas pertençam a Formação Jaicós, apesar do mapa geológico da CPRM na escala 1:100.000 indicar a ocorrência de rochas da formação Tianguá no local da barragem.

As informações da Geologia regional e local foram obtidas a partir de consulta ao relatório de vistoria elaborado no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

## 5.2 OLHANDO PARA A FUNDAÇÃO DA BARRAGEM GRANJEIRO

A formação da brecha realizada propositalmente pelo empreendedor no maciço do aterro da barragem Granjeiro para injeções de calda de cimento após o incidente ocorrido em março de 2019 permitiu avaliar no detalhe da escala 1:1 as características locais da fundação sob o aterro, que foram associadas às sondagens realizadas permitindo apresentar as conclusões a seguir.

Nota-se nas paredes da região da “brecha”, aberta para a realização dos serviços de injeções na fundação a presença de remanescente de solos transportados de coloração variegada a escura de baixa consistência e/ou compacidade, os quais não foram removidos na oportunidade da construção da barragem, ver figuras 5.3 e 5.4.





**Figura 5.3** – Vista da brecha aberta para a realização dos serviços de injeções na fundação com presença de remanescente de solos transportados de coloração variegada a escura, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo.



**Figura 5.4** – Detalhe de remanescente de solos transportados de coloração variegada a escura no talude da brecha, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo.

Esses materiais, via de regra, e conforme observado, encontram-se sob o espaldar de jusante e são interceptados à montante pela trincheira impermeável, essas observações são confirmadas pelas análises realizadas a partir das sondagens, onde se identificam passagens de baixa resistência e trincheira impermeável (cut off) à montante.

Sobre o topo rochoso nota-se a presença de lente de solo aluvionar (cascalho de granulometria graúda) na porção do eixo para jusante da barragem, em que a vedação é garantida pela trincheira impermeável situada na porção a montante do eixo da barragem.



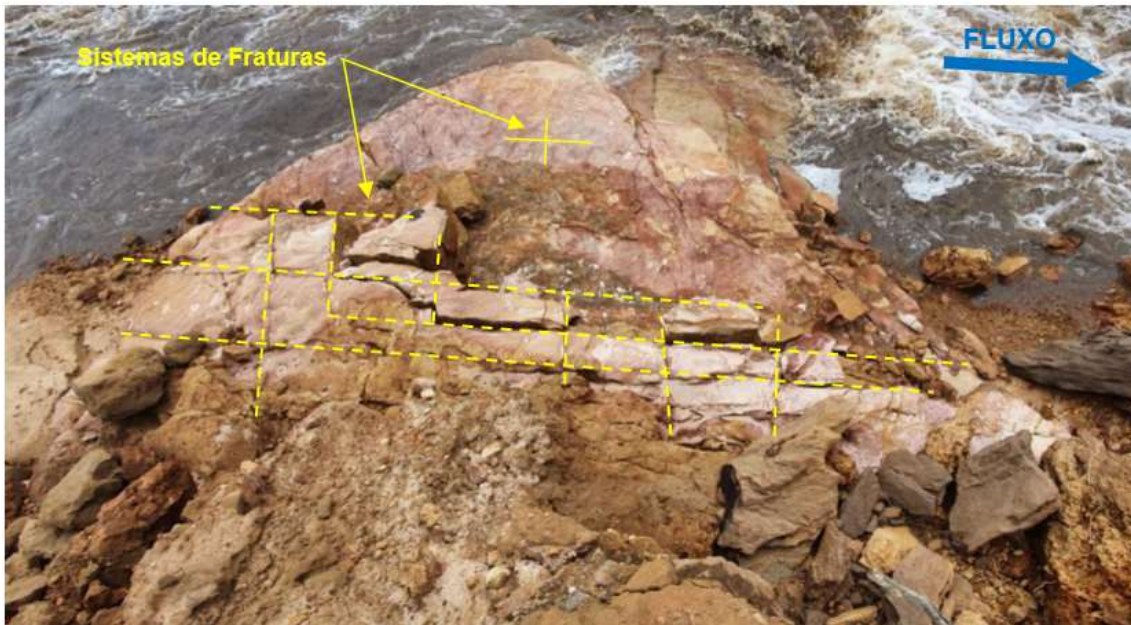
**Figura 5.5** – Detalhe da estruturação do arenito na base do canal de restituição do rio Jaburu onde se realizavam os serviços de injeção na fundação sob o maciço da barragem, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.

Ressalta-se que os serviços de injeção de calda de cimento eram garantidos por ensecadeira construída à montante e o rompimento desta permitiu o fluxo do rio Jaburu através da brecha, deixando à vista detalhes da fundação rochosa.

A porção superficial constituída por rocha medianamente alterada com espessura em torno de três metros se apresenta medianamente coerente e fraturada, com sinais de alívio superficial (fraturas abertas e oxidação), tratando-se de uma zona de baixa qualidade geomecânica e possivelmente francamente permeável.

As figuras 5.6 e 5.7 retratam afloramento exposto da rocha de fundação da barragem junto ao pé do talude direito da brecha escavada, nas quais se observam a ocorrência de fraturas sub-horizontais, marcando o acamamento do arenito associado ao reticulado de fraturas sub-verticais, com direções no sentido montante/jusante e longitudinal ao longo do eixo da barragem.





**Figura 5.6** – Vista superior do sistema de fratura da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.



**Figura 5.7** – Vista frontal do sistema de fraturas da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.

A persistência ou não das interligações das descontinuidades observadas nestes afloramentos, com presença de lentes de siltito e argilito ao longo dos planos de acamamento, estes mais suscetíveis ao intemperismo e erosão, associado ao reticulado de fraturas subverticais, que quando preenchidos contém areia e siltes facilmente erodíveis, deve ser considerado para o entendimento do comportamento hidrogeológico deste maciço.

Nota-se nas figuras 5.9 e 5.10 a existência de uma série de cavidades à montante da barragem, indicando o carreamento do solo proveniente do tapete impermeável ao longo do tempo.

O transporte de solo de montante proveniente do tapete impermeável provavelmente se iniciou com a formação de trincas de ressecamento na superfície do tapete impermeável, não tratadas antes do primeiro enchimento ou ocasionadas pela variação sazonal do reservatório com a exposição do tapete impermeável ao clima, conforme exemplo da figura 5.8.

Ao longo de anos de operação da barragem a percolação pelas trincas do tapete impermeável veio acompanhada do carreamento de finos em grande quantidade pela fundação, confirmando a tese da existência de caminhos de percolação preferenciais pela fundação no sentido montante/jusante.

A figura 5.8 retrata o solo compactado proveniente da área de vedação da barragem, observados próximo a brecha, que devido a exposição ao clima se apresenta fissurado e que pode ser associado ao que ocorreu na camada do tapete impermeável.



**Figura 5.8** – Detalhe da superfície do solo compactado trincado proveniente da área de vedação à montante, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.





**Figura 5.9** – Vista para montante com detalhe das cavidades formadas no tapete impermeável localizado à jusante da enseadeira.



**Figura 5.10** – Detalhe das cavidades observadas no tapete impermeável de montante.

Assim, as observações e constatações detalhadas neste item são fatos importantes que subsidiam o levantamento das hipóteses e corroboram para confirmação mais segura do que provavelmente ocasionou fluxos de percolação não controlados, que viriam resultar em gradientes hidráulicos muito altos e que não foram considerados nas avaliações de fluxo, quando da análise de percolação.

### 5.3 LEVANTAMENTO DAS HIPÓTESES

Conhecendo as feições intervenientes da fundação da barragem Granjeiro e o sistema de controle de fluxo existente lista-se a seguir as hipóteses mais prováveis, que poderiam ter conduzido à formação das erosões internas no aterro, que levaram aos incidentes observados em 2012 e 2019.

- Trincheira impermeável de montante não interceptou totalmente a camada de solo colúvio/aluvionar em toda a extensão da barragem;
- Persistência das discontinuidades do topo rochoso, constituída por reticulado de fraturas sub-horizontais e sub-verticais, pelas quais se formam os caminhos preferenciais do fluxo pela fundação;
- Ineficiência do sistema de drenagem interna da barragem devido a possibilidade de contaminação durante a construção e operação ou excesso de finos;
- Camadas do aterro com falha de compactação, com ocorrência de fraturamento hidráulico, associadas a ausência de filtro vertical;

A primeira hipótese deve ser considerada uma vez que o aterro da barragem está apoiado diretamente sobre solos de fundação remanescentes, de origem aluvionar ou coluvionar mais permeáveis que o aterro e, podem ter ocorrido durante a construção da trincheira impermeável (cut off), locais em que a cota de fundo não alcançou o topo rochoso, interceptando parcialmente a feição de solo da fundação.

De fato, no item 4.2 é observado que o sistema de controle de fluxo pela fundação através da trincheira impermeável de montante não intercepta camada de solo coluvionar ou aluvionar remanescente fofo, entre 15,50 e 17,55 metros de profundidade na sondagem SP-103, localizada na porção central, próxima a calha original do rio, onde a barragem apresenta maior altura e próxima ao local do incidente de 2019, ver figura 4.1.

Nesse caso o fluxo de percolação pela camada de solo aluvionar ao alcançar o cut-off, que não se aprofundou até o contato com a rocha de fundação, provocou, nessa região

de área reduzida sob a trincheira, o aumento de subpressões e velocidades do fluxo, uma vez que para passagem da mesma vazão de percolação em uma seção menor tem-se o aumento da velocidade, que foi suficiente para superar a resistência do solo da trincheira impermeável, iniciando o processo de erosão interna a partir do contato trincheira/solo aluvionar da fundação.

O início desse processo erosivo se dá pela erosão interna de contato entre camadas, sendo mais provável de ocorrer onde não há nenhum efeito de filtro em que a condição hidráulica controla o processo, assim é mais provável que ocorra em locais onde há presença de camada de cascalho, conforme observada à jusante do eixo na parede do talude da brecha e também na sondagem SM-102, que esteja em contato direto com a base da trincheira impermeável constituída de solo fino.

O princípio de formação de erosões internas de contato está descrito no item 2.4.3 do qual se destaca que é mais provável que erosões de contato iniciem em locais onde ocorrem altas velocidades de fluxo de percolação nas camadas de solos constituídos por agregados graúdos e em que haja uma grande amplitude granulométrica entre os solos adjacentes para que o solo fino possa ser carregado sem que haja o efeito de filtro. Condição muito similar à descrita na barragem Granjeiro, no cenário em que não se tem a interceptação completa de toda a espessura de solo aluvionar, formada por camada de cascalho, pela trincheira de vedação, resultando em acréscimo de velocidade do fluxo na área de seção reduzida.

Nesse caso o fluxo paralelo aos planos das camadas de solo ocorre pela camada de cascalho e a erosão se inicia no solo da trincheira impermeável em contato com a camada de cascalho, onde provavelmente há ocorrências de altas velocidades de fluxo de percolação, resultando na desagregação dos grãos do solo fino proveniente da trincheira impermeável e o carregamento desses grãos pelos vazios do solo de granulometria grossa.

Nota-se que o ambiente descrito e conforme mencionado no item 2.4.3, se não interrompido pode progredir para o processo de formação de subsidência, ver figura 2.9 a) ou piping, ver figura 2.9 b).

Ao avaliarmos a segunda hipótese considera-se que os caminhos de percolação preferenciais pela fundação ocorrem nas discontinuidades da rocha medianamente alterada, partindo do princípio de que há persistência e interligação das fraturas sub-horizontais e sub-verticais na zona do topo rochoso, conforme retratadas nas figuras 5.6 e 5.7.



Nesta hipótese é provável que o carreamento da grande quantidade de material do tapete impermeável, observada nas figuras 5.9 e 5.10, se deu pelas descontinuidades do topo rochoso da fundação, onde a velocidade do fluxo, as aberturas e as vazões de percolação são superiores aos da camada aluvionar da fundação e a partir das quais tem-se uma condição favorável de aumento da capacidade erosiva da água, principalmente se tratando da camada superficial de rocha medianamente coerente (C3), que conforme observado nas sondagens, trata-se de um arenito que apresenta RQD péssima (R5) nos primeiros metros de profundidade.

Cruz (1996) destaca que descontinuidades na rocha de fundação imprimem quase nenhuma resistência ao fluxo e a água pode fluir com pequena perda de carga por longos trechos da feição descontínua e transmitir a pontos localizados da fundação quase a carga integral do reservatório.

Ou seja, a afirmação de Cruz (1996) ressalta as variações que podem ocorrer de subpressões em uma barragem, onde, no caso de fluxo de percolação por descontinuidades na fundação, em que o mesmo flui sem resistência do meio, há a ocorrência de velocidades elevadas, que estão associadas a baixas subpressões e na ocorrência de pontos localizados, que impedem o fluxo livre, atuando como uma barreira ao fluxo, há ocorrência de baixas velocidades associadas a pressões elevadas, próxima a carga hidráulica do reservatório, devido à reduzida perda de carga ao longo do trajeto.

Assim, considera-se que o fluxo excessivo pelas descontinuidades do arenito possam ter provocados pontos localizados de subpressões excessivas por interrompimento parcial do fluxo no sentido horizontal ou, tenham provocado ao longo dos anos, através de um processo contínuo de erosão por fuga concentrada nas paredes das trincas da rocha de arenito, importantes vazios sob as camadas de solo da fundação, ocasionando mudanças nos estados de tensões destas camadas e, pelo fato de se encontrarem saturadas ou em razão da presença de fluxo de percolação tenham se tornado suscetíveis ao colapso com o carreamento de partículas ao longo dos anos ocasionando importantes vazios sob o aterro da barragem.

A mudança do estado de tensões na base do aterro da barragem, devido a descompressão em razão da formação de cavidade logo abaixo criaria um ambiente favorável para o início da erosão interna no aterro da barragem, que poderia, sob a influência do fluxo descendente pelo maciço do aterro da barragem ou ocasionalmente associado a um fluxo ascendente proveniente da fundação, conduzir a formação do processo erosivo na base do aterro da barragem de solo homogêneo.

Em havendo a presença de fluxo ascendente proveniente da fundação, não controlados pelo dreno horizontal em razão de possíveis vazões excessivas de percolação, que resultem em elevadas sub-pressões no maciço do aterro, se teria um ambiente favorável para ocorrência de fraturas hidráulicas na base do aterro, que associadas a ocorrência de fluxo descendente proveniente do aterro para fundação completaria o processo para iniciar o processo de erosão interna a partir da base do aterro da barragem.

A terceira hipótese levanta a possibilidade do dreno horizontal de jusante ser pouco eficiente como elemento drenante e/ou filtrante em razão da possibilidade da presença de solo contaminante e/ou excesso de finos na areia.

Nesse caso, poderia a princípio provocar uma saturação progressiva do maciço compactado de jusante e perda de estabilidade do talude de jusante, contudo não há ocorrência de instabilidade de taludes na barragem Granjeiro ao longo de sua operação.

A hipótese da ineficiência do dreno como elemento filtrante do solo base em razão da ocorrência de trincas devido à presença de material contaminante e/ou excesso de finos é pouco provável pois nesse caso o fluxo pelo maciço do aterro teria um papel inicial dominante no início do processo erosivo, além de que na condição saturada as trincas no dreno horizontal tendem a se desfazer.

Ainda que em razão da presença de material coesivo contaminante permitisse que trincas do dreno horizontal se mantivessem abertas, o fato das velocidades de percolação pelo maciço do aterro serem muito baixas e dada a capacidade do maciço em resistir a forças elevadas de percolação, conforme ficou demonstrado nos incidentes de 2012 e 2019, nos quais se formou fluxo de fuga concentrada pelo maciço do aterro quando a erosão interna alcançou o reservatório, sem que ocasionasse o colapso do aterro da barragem, não é factível que o fluxo de percolação pelo maciço do aterro, por si só, consiga iniciar o processo de erosão interna no aterro da barragem.

A última hipótese trata da condição da presença de camadas de aterro mal compactadas como a observada a 4 metros de profundidade nas sondagens SP-104 e SM-104, com conseqüente aumento de permeabilidade dessas camadas do maciço, que a princípio poderiam ocasionar percolações excessivas localizadas no maciço do aterro, se interligadas até o reservatório a montante e desse modo poderiam resultar em poropressões excessivas localizadas, com eventual ocorrência de fraturamento hidráulico no maciço da barragem, que associado a ausência de filtro vertical e a uma condição de fluxo de percolação localizada indesejável, poderiam ocasionar em arraste de finos.

Para essa hipótese se deve considerar os resultados de ensaios à percussão realizadas no maciço do aterro, onde nota-se que o maciço do aterro da barragem Granjeiro se apresenta bem compactado e a ocorrência de camadas mal compactadas seriam casos isolados, que no caso foi verificado em profundidade intermediária.

Mesmo considerando a hipótese de haver camadas mal compactadas interligando toda a seção da barragem, de montante à jusante, não se tem notícia durante a operação da barragem Granjeiro de ocorrências de surgências na superfície do talude de jusante da barragem e portanto se conclui tratar de caso isolado em profundidade intermediária, que não traz maiores consequências para a segurança da barragem do ponto de vista de formação de erosão interna e desse modo essa hipótese foi descartada.

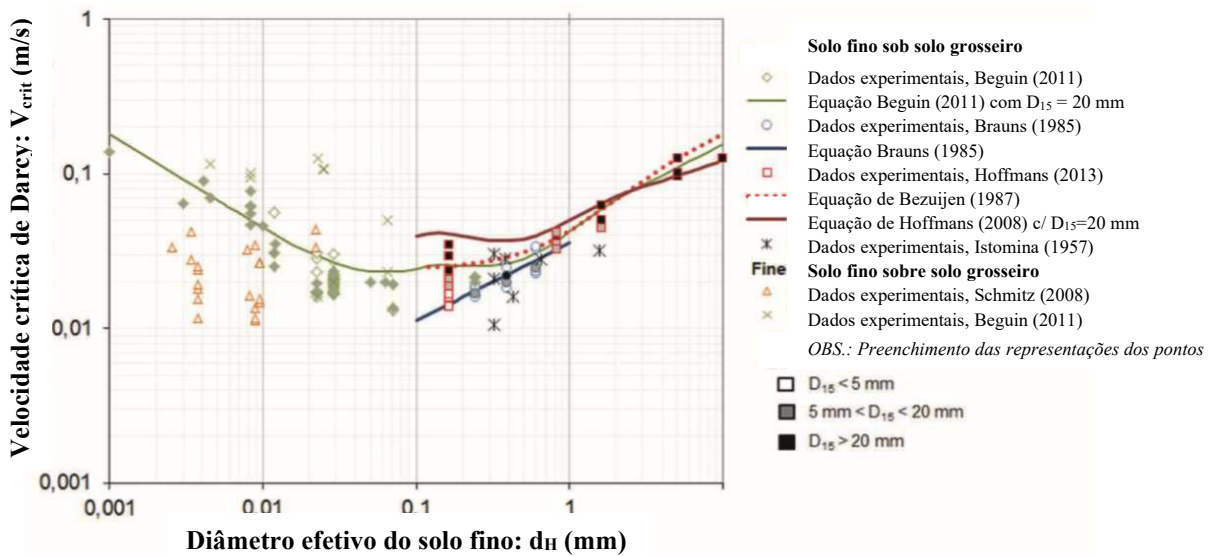
Apresentadas e discutidas as possibilidades tem-se então duas hipóteses factíveis para o início da formação de erosão interna no aterro da barragem, cuja origem é o fluxo de percolação pela fundação. Desse modo, faremos a seguir um exame mais detalhado das condições necessárias que precisariam ser impostas pelo fluxo de percolação pela fundação para que se desse início à erosão interna no aterro e assim concluir pela hipótese mais provável, que originou a formação de erosão interna no aterro.

#### 5.4 CONVERGINDO PARA HIPÓTESE MAIS PROVÁVEL

Resultados experimentais de Beguin (2011), que conduziu ensaios de erosão de contato de camadas de solos siltosos sobre camada de cascalho e de outros pesquisadores, como Braun's (1985) e Guidoux et al (2010), que conduziram pesquisas com a disposição inversa dos solos (camada de solo gráudo permeável sobre camada de solo fino), sendo que Braun's (1985) considerou em suas pesquisas como solo fino areias e Guidoux et al (2010) utilizaram argilas e siltes, todas realizadas no domínio da condição hidráulica, ou seja sem efeito de filtro entre as camadas, mostram que a velocidade crítica de transporte das partículas do solo fino submetidas a uma condição de erosão de contato por algumas horas se situam entre 0,01 m/s e 0,1 m/s, sendo que no caso dos ensaios com solos finos não coesivos, para o limite inferior da velocidade crítica foram verificados que se estabelecem o carreamento das menores partículas de areia.

Os resultados dos ensaios realizados por esses autores estão representados no gráfico da figura 5.11 e aparentam, pela similaridade entre os valores, que a iniciação da erosão de contato não depende da disposição e tipo de solo, mas sim da capacidade do

fluxo de percolação pelo solo graúdo mais permeável em transportar as partículas do solo fino.



**Figura 5.11** – Velocidade crítica para erosão de contato nas configurações de solo fino sobre e abaixo solos de granulometria grosseira, adaptado do ICOLD (2017).

Neste caso, uma condição hidráulica segura para que não haja erosão de contato deve estar fundamentada na velocidade crítica de transporte das partículas de solo, considerando que a desagregação de grãos ocorrerá ao longo do tempo independente da velocidade do fluxo, ou seja, considera-se que o início da erosão interna de contato depende prioritariamente da capacidade do fluxo tangencial transportar os grãos do solo base pelo solo granular graúdo e não de da desagregação do solo base.

Desse modo a velocidade crítica, na condição hidráulica (sem efeito de filtro), para o transporte dos grãos do solo fino do aterro da barragem pelo solo granular graúdo através de um fluxo tangencial, pode ser estimada utilizando a equação 2.8 estabelecida por Braun's (1985) ou a equação 2.9 estabelecida por Guidoux et al (2010) esta, adaptada da primeira para solos coesivos.

Considerando o caso de Granjeiro, uma vez constatada que há fluxo pela fundação no sentido montante/jusante com importante vazão de percolação e, dada a condição da hipótese 1: presença de camada horizontal de solo aluvionar (cascalho) remanescente na fundação, que não foi totalmente interceptada pela trincheira de vedação de montante em algum local da barragem e, que se encontra em contato direto com a base da trincheira de vedação, considera-se a possibilidade que o fluxo de água pela camada de cascalho, em constante contato com a base da trincheira impermeável, numa condição de domínio hidráulico, inicie o processo de erosão interna com a desagregação e o arraste contínuo

das partículas do solo base, que se inicia pelos grãos mais finos e menos coesos (silte) e à medida que os vazios entre as partículas do solo base aumentam, passa a carrear também partículas maiores de areia, aumentando progressivamente os vazios e reduzindo o contato e as forças de atração entre partículas, que passam a se desprender facilmente e ficam sujeitas a serem transportadas pelo fluxo de percolação através dos vazios do cascalho aluvionar.

Ao considerarmos que não há influência do efeito de filtro entre os solos adjacentes, tem-se a influência exclusiva da condição hidráulica no processo erosivo por erosão de contato e, o início do processo erosivo do solo fino por erosão de contato no domínio hidráulico pode ser verificado conhecendo a velocidade crítica de transporte dos grãos do solo fino pelo solo graúdo, sem levar em conta a graduação granulométrica do cascalho aluvionar.

A ordem de magnitude da velocidade crítica para o solo base da trincheira de vedação, considerado ser o mesmo solo do espaldar de montante da barragem Granjeiro, pode ser obtida pelas equações 2.8 e 2.9, que estão diretamente relacionadas ao diâmetro médio das partículas e a densidade real desse solo fino.

Desse modo a velocidade crítica para o transporte dos grãos do solo da trincheira impermeável da barragem foi estimada utilizando a equação 2.8 estabelecida por Braun's (1985).

Considerando a porosidade da camada de cascalho aluvionar da ordem de 50% e aplicando os valores de densidade real dos grãos e o diâmetro médio ( $d_{50}$ ) do solo do espaldar de montante da barragem Granjeiro (0,15 mm), extraído da curva granulométrica do solo, tem-se a velocidade crítica de referência conforme a seguir.

$$V_{crit} = 0,65 \times 50 \sqrt{\frac{2165 - 998}{998}} \times 9,8 \times 0,00015$$

$$V_{crit} = 0,052 \text{ m/s}$$

O fator de coesão da parcela da equação de Guidoux et al (2010) traz um acréscimo de 0,012 m/s na velocidade crítica contudo não foi considerada para a verificação a seguir, uma vez que o fator determinante da erosão interna estaria no transporte dos grãos e não na desagregação dos mesmos.

Ao aplicarmos a Lei de Darcy relativa à velocidade média de fluxo laminar em meios porosos, definida por  $V = k.i$  e considerando o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) da camada aluvionar de cascalho igual a  $10^{-2}$  m/s, quadro 4.3, tem-se o gradiente

hidráulico crítico para o contato cascalho aluvionar solo da trincheira de vedação necessário para iniciar a erosão interna do solo fino da trincheira.

$$i_{crit} = \frac{V_{crit}}{k} = \frac{5,2 \times 10^{-2}}{10^{-2}} \cong 5$$

Assim, para que o transporte dos grãos do solo da trincheira de vedação se dê através da camada de cascalho aluvionar, considerando a hipótese 1, seria necessário um gradiente hidráulico crítico de magnitude igual a 5 no contato base da trincheira de vedação/solo aluvionar remanescente.

Se considerarmos a barragem na condição de carregamento mais crítico, com carga hidráulica de aproximadamente 10 metros de altura na seção onde ocorreu o incidente em 2019, ver figura 4.1 e, sabendo que o caminho de percolação da água do reservatório pelo solo de fundação a partir da superfície de fundo do reservatório até a base da trincheira é de no mínimo 3,5 metros de extensão, tem-se um gradiente hidráulico estimado máximo na camada de solo aluvionar no contato base da trincheira de vedação/solo aluvionar ( $i = \frac{\Delta h}{L}$ ) da ordem de 3.

Com base nessa avaliação quantitativa é pouco provável que ocorram condição de gradiente crítico e/ou velocidade crítica, proveniente de fluxo paralelo pela camada de solo aluvionar no contato base da trincheira de vedação/solo aluvionar, necessário para iniciar a erosão por contato do solo fino oriundo da trincheira de vedação pelo cascalho aluvionar. Desse modo restaria comprovar a hipótese 2.

Hsu (1981) citado por Cruz (1996) apresentou um levantamento de 49 casos conhecidos de erosão interna em barragens construídas entre 1890 e 1978 das quais sobressaem os números de casos em que se tinha a presença de trincas no maciço da barragem ou no filtro do sistema de drenagem interna ou a presença de descontinuidades na fundação.

No caso das descontinuidades em feições rochosas Cruz (1996) afirma que quando estas impõem resistência limitada ao fluxo, a água pode fluir com pequena perda de carga por longos trechos da feição descontínua e transmitir a pontos localizados da fundação da barragem quase a carga integral do reservatório.

Nestes pontos de estrangulamento, ou da interrupção da feição descontínua estabelecem gradientes elevados, que são transmitidos ao solo sobrejacente, sendo este caso como responsável pela erosão interna que ocorreu em várias barragens listadas por Hsu (1981).

Se considerarmos, no caso de Granjeiro, a persistência das descontinuidades sub-horizontais e sub-verticais da camada constituída pelo topo rochoso, esta em contato direto com a base da trincheira de vedação ou com o solo de fundação coluvionar/aluvionar à jusante da trincheira impermeável, por onde o fluxo de percolação (montante/jusante) teria a possibilidade de se desenvolver sem grande dificuldade, teríamos ocorrência de velocidades e gradientes elevados na região de contato, possivelmente acima da crítica.

Se considerarmos que as condutividades hidráulica nas descontinuidades rochosas são bem maiores que a permeabilidade da camada de cascalho aluvionar e se assemelham a um enrocamento limpo, ou seja da ordem de  $10^{-1}$  m/s, podendo ser superior e alcançar valores de até 5 m/s segundo Cruz (1996), o gradiente hidráulico necessário para o transporte de finos pelas descontinuidades do arenito seriam dez vezes menores em relação a primeira hipótese, ou seja da ordem de 0,5, considerando a velocidade crítica de  $5,2 \times 10^{-2}$  m/s e  $k = 10^{-1}$  m/s, perfeitamente possível de ocorrer no caso de Granjeiro.

Outro aspecto importante observado por Cruz (1996) é que quando não há um sistema de drenagem que intercepte as feições mais permeáveis da fundação, à jusante da barragem haverá sempre um fluxo ascendente.

Posto isso, entende-se como mais factível a possibilidade de que estavam ocorrendo elevados gradientes e velocidades de fluxo de percolação pelas trincas da camada formada pelo topo rochoso, que alcançaram a interface topo da rocha /trincheira de vedação com capacidade hidráulica suficiente para iniciar o processo de erosão por contato do solo da trincheira de vedação e, que no caso do incidente de 2019 progrediu para a formação de subsidência, causada pelo colapso progressivo do solo fino do aterro da barragem até a crista da barragem, à medida que o solo logo abaixo era carregado e se formava um vazio alterando o estado de tensões confinantes da camada logo acima e, no caso do incidente de 2012, progrediu para um “piping”, até alcançar o reservatório na face de montante.

O fato de se tratar de uma barragem homogênea não monitorada e sem controle adequado de manutenção, conforme verificado pela fiscalização, possibilitou a continuidade da erosão sem que fosse percebido pelo proprietário.

A progressão da erosão se deu em razão da capacidade do maciço do aterro da barragem Granjeiro em resistir a esforços cisalhantes elevados provenientes das forças de percolação sem colapsar, mesmo após as erosões alcançarem o reservatório, de modo que

se ampliaram ao ponto de não passarem despercebidas por moradores da região ou pelo próprio empreendedor.

Sobre esse aspecto ressalta a qualidade do maciço do aterro da barragem Granjeiro, que se apresenta bem compactado e muito pouco permeável, constituído de material que se mostrou com ótima capacidade mecânica e assim sendo, bastante adequado para aterros de barragens de terra e, se não fossem as qualidades físicas aqui ressaltadas muito provavelmente a barragem Granjeiro teria colapsado em um ou nos dois incidentes retratados, antes de serem identificadas as anomalias e /ou antes que medidas mitigadoras pudessem ser adotadas para contê-las.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A barragem Granjeiro é constituída por um aterro homogêneo de solo areno argiloso, compacto, de resistência adequada e de baixa permeabilidade ( $1E-8$  cm/s), característico de solo argiloso bem compactado, com possível plasticidade, apesar dos resultados dos ensaios dos limites de Atterberg indicarem não plástico, e elevada coesão, que se mostrou tratar de material de ótima qualidade e desempenho para aterros de barragens.

O percentual de finos (siltes e argilas) obtidos nos ensaios granulométricos e o comportamento do maciço durante os eventos de 2012 e 2019, em que o solo sustentou grandes cavidades sob a ação de fluxo de percolação de fuga concentrada, são importantes indicativos das qualidades mecânicas desse solo compactado, que apresentou ótimo desempenho mesmo sob excessivas forças hidráulicas cisalhantes.

A fundação da barragem Granjeiro é constituída por uma camada de solo colúvio/aluvionar de espessura média igual a 3,5 metros, seguida de um topo rochoso de aproximadamente 3 (três) metros de espessura de arenito medianamente alterado, constituído de trincas sub-horizontais e sub-verticais persistentes e interligadas, que se mostraram caminhos preferenciais de percolação, seguido de uma rocha pouco alterada (A2), medianamente fraturada (F2), medianamente coerente (C3) a coerente (C2), de qualidade regular (R3) e com presença de interfaces sub-horizontais entre camadas do pacote rochoso, preenchidos por siltitos, marcando os períodos de formação da rocha.

Os resultados das análises realizadas no presente trabalho apontam para o pacote de rocha referente ao topo rochoso, com presença de descontinuidades persistentes e interligadas, como a provável responsável pelas erosões internas verificadas no maciço do aterro. Esta camada, justamente pela presença de descontinuidades persistentes e



interligadas, é a mais permeável da fundação e, em razão da ausência de um sistema de vedação/drenagem, que intercepte essas feições de elevada permeabilidade, resultou em fluxos excessivos de percolação, com velocidades e gradientes elevados, suficientes para iniciar o processo erosivo na base da trincheira de vedação (cut off) e do solo da fundação à jusante.

A continuidade da erosão se deu devido à ausência de um sistema de filtro na fundação, mas principalmente em razão da ausência de instrumentação e monitoramento da barragem, não sendo possível, desse modo, que fossem percebidos comportamentos anômalos, que poderiam indicar que haviam se formado processos erosivos internos na barragem.

A progressão da erosão no maciço do aterro ocorreu devido ao aumento das forças hidráulicas cisalhantes à medida que a seção da erosão aumentava, haja vista se tratar de barragem homogênea incapaz de reduzir o fluxo de percolação na seção erodida, todavia o principal fator está relacionado à capacidade do solo, constituinte do aterro, em manter a abertura ocasionada pelo processo erosivo na condição saturada, atuando como um teto ou paredes laterais para a cavidade sem colapsar.

O conceito do projeto apoiado em redes de fluxo convencionais, tendo em vista as permeabilidades equivalentes obtidas, para as camadas da fundação, nos ensaios de infiltração realizados nos furos de sondagem, não conferiu ao projeto, para o caso específico da feição geológico-geotécnica da fundação da barragem Granjeiro, a precisão necessária para distinguir que os primeiros 3 (três) metros do maciço rochoso tem o seu fluxo controlado por descontinuidades preferenciais.

Em não se conhecendo o histórico da barragem Granjeiro não restaria claro que as redes de fluxo convencionais obtidas não confeririam a precisão requerida ao projeto no tocante a segurança da barragem. Assim, quando o assunto é o controle de fluxo pela fundação resta evidente a importância da avaliação, na fase de projeto, da presença de descontinuidades persistentes na direção montante jusante, que conduzem a ocorrências de fluxos descontínuos.

Quanto a essa questão ressalto a afirmação de Cruz (1996) de que o conceito de projeto apoiado em redes de fluxo convencionais não confere às mesmas os níveis de segurança requeridos em obras do gênero, no tocante a um controle efetivo do fluxo.

Como medida preventiva ao controle efetivo do fluxo pelas descontinuidades da camada superficial da rocha, considera como solução mais indicada a execução de poços de alívio no pé do talude de jusante, que atravessem a camada do topo rochoso até o topo

da rocha pouco alterada, que devem estar localizados sob o dreno de pé a ser removido e reconstituído.

Sobre essa solução destaco a observação de Cruz (1996) de que uma trincheira drenante, ou dreno de pé associada a poços de alívio, que atinjam as camadas mais permeáveis da fundação, se executada durante a construção, representa a solução mais econômica e segura para controle efetivo do fluxo pelas fundações.

Por fim e não menos importante, é imprescindível que se faça o monitoramento da barragem em tela em caso de reconstituição da mesma e para auxiliar nessa tarefa é necessária a instalação da instrumentação básica, exigível para uma barragem de terra no porte de Granjeiro, constituída por piezômetros, medidores de vazão e medidores de recalques superficiais.

## REFERÊNCIAS

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations**. Bulletin 164. Disponível em < <http://www.ussdams.org/wp-content/uploads/2016/04/B164.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro - Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo Realizada em 17/12/2019**. Documento: 02500.003293/2020. Florianópolis, 2020.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro – Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias – Inspeção de Campo Realizada em 06/02/2020**. Documento: 02500.018771/2020. Florianópolis, 2020.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro – Levantamento Geológico-Geotécnico**. Documento: 02500.021842/2020. Florianópolis, 2020.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro – Levantamento Geológico-Geotécnico**. Documento: 02500.021842/2020. Florianópolis, 2020.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro – Relatório de Ensaio Geotécnicos**. Documento: 02500.027204/2020. Florianópolis, 2020.

NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., ANA - Agência Nacional de Águas. **Barragem Granjeiro – Relatório de Avaliação da Estabilidade e Intervenções Necessárias**. Documento: 02500.034713/2020. Florianópolis, 2020.

DAS, B. M. **Principles of geotechnical engineering**. 4<sup>th</sup> edition. Boston: PWS Publishing Company, 1941. 712p.

MITCHELL, R.J. **Earth structures engineering**. 1<sup>th</sup> edition. Boston: Allen & Unwin Inc, 1983. 265p.

MACHADO, S.L.; MACHADO, M. F. C.. **Mecânica dos Solos II: conceitos introdutórios**. Disponível em < <https://pt.slideshare.net/islenrocha/apostila-de-mec-solos-ba-ii> >. Acesso em: 27 set. 2020.

MARANGON, M. **Mecânica dos Solos II**. Ed. 2018. Disponível em < <https://www.ufjf.br/nugeo/ensino/graduacao/publicacoes-academicas-livre/mecanica-dos-solos-ii/> >. Acesso em: 26 set. 2020.

PIRÁ, Carla M. M.. **Estudo das características de permeabilidade dos maciços aluvionares**. 1990. 243 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientada pelo Prof. Ph. D Sandro Salvador Sandroni.

SILVA, Dayana S.. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. 2016. 161 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientada pelo Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro.

SANTOS, Ricardo C.; CALDEIRA, Laura. **Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações**. In: Congresso Nacional de Geotecnia, XI, 2008. Coimbra. Disponível em < [https://www.researchgate.net/publication/265396257\\_Processos\\_de\\_erosao\\_interna\\_em\\_barragens\\_de\\_aterro\\_e\\_suas\\_fundacoes](https://www.researchgate.net/publication/265396257_Processos_de_erosao_interna_em_barragens_de_aterro_e_suas_fundacoes) >. Acesso em: 17 jul. 2020.

USACE- U. S. Army Corps of Engineers. **Seepage analysis and control for dams**. Washington, 1993. 383p.

OLIVEIRA, A. G. S. de. **Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra**. 2008. 181 p. Dissertação

de Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Orientado pelo Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.

ELETROBRÁS. **Crerios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003. 276 p.

FELL, Robin.; FRY, Jean-Jacques. **The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations**. In: International Workshop on Internal Erosion of Embankment Dams and their Foundations, 2005. Aussois. Disponível em <  
[https://books.google.com.br/books?id=uUJZDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=internal+erosion+of+dams+and+their+foundations&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjE\\_anSuMbsAhX2CrkGHazkAMsQ6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=uUJZDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=internal+erosion+of+dams+and+their+foundations&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjE_anSuMbsAhX2CrkGHazkAMsQ6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 20 out. 2020.