

# ANÁLISE DOS PROCESSOS DE EROÇÃO INTERNA NAS BARRAGENS DE TERRA

## ANALYSIS OF INTERNAL EROSION PROCESSES IN EARTH DAM

<sup>1</sup>CAMPOS, Adryan Francisco de

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-  
Unifio/FEMM

### RESUMO

Destaca-se a importância crítica das barragens, particularmente as de terra por sua versatilidade e capacidade de adaptação a diferentes condições geológicas e de fundação, tornando-as uma escolha frequente em projetos de engenharia, frisando a importância da segurança e monitoramento dessas estruturas dada a significativa presença delas em todo o mundo e os potenciais riscos associados à contínua passagem de água pelos seus corpos, sendo a erosão interna o foco desse estudo pelo fato de ser um dos riscos mais críticos como também gerador das maiores quantidade de acidentes em barragens de aterro, discorrendo sobre as 4 principais etapas do desenvolvimento da erosão interna: iniciação, continuação, progressão e formação de brecha.

**Palavras-chave:** Barragens; Condições Geológicas; Fundação; Segurança; Monitoramento.

### ABSTRACT

Emphasizes the critical importance of dams, particularly earth dams, is highlighted due to their versatility and ability to adapt to different geological and foundation conditions, making them a frequent choice in engineering projects, stressing the importance of safety and monitoring of these structures given their significant presence around the world and the potential risks associated with the continuous passage of water through their bodies, with internal erosion being the focus of this study due to the fact that it is one of the most critical risks as well as generating the highest number of accidents in embankment dams, discussing the 4 main stages in the development of internal erosion: initiation, continuation, progression and breach formation.

**Keywords:** Dams; Geological Conditions; Foundation; Security; Monitoring.

### INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas historicamente pelo homem para armazenar e controlar a água, sendo a base do desenvolvimento e da gestão dos recursos hídricos de bacias fluviais. Atualmente, elas são concebidas para as mais diversas finalidades (irrigação, hidreletricidade, abastecimento de água, retenção de resíduos minerais e industriais, controle de enchentes e recreação), desempenhando um papel importante na infraestrutura e desenvolvimento de um país, principalmente por meio da contínua disponibilidade de água e energia. (MELO, 2014)

Cruz (1996) apontou que a diversidade de tipos de barragens permite sua classificação com base nos materiais empregados em sua construção. A seleção adequada do tipo e seção transversal da barragem é influenciada por fatores como disponibilidade de materiais, características do vale, condições da fundação e

sequência construtiva. Portanto, a decisão sobre o tipo e seção transversal de uma barragem deve ser tomada considerando-se cuidadosamente esses elementos para garantir a segurança e eficiência da estrutura.

Quando esse tipo de construção é executado utilizando como materiais construtivos solos e/ou rochas, ficam conhecidas como barragens de terra ou de terra e enrocamento (MARIANO; SILVA, 2022). As barragens de terra são uma das principais formas de represa construídas em todo o mundo. Dentre os tipos existentes, a barragem de aterro (terra e enrocamento) constitui-se em um dos principais, representando aproximadamente 75% do total mundial (ICOLD, 2008).

De acordo com Persechini, et al (2015), a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) possui um registro de mais de 58 mil barragens no mundo, sendo que mais da metade está localizada em países em desenvolvimento. O cadastro brasileiro de barragens registra um número significativo de cerca de 15 mil estruturas distribuídas no país, existindo um registro histórico de ocorrências de acidentes e incidentes, com perdas de vidas humanas, impactos econômicos, sociais e ambientais no Brasil desde os anos 1950. A partir da década de 1970, a sociedade civil passou a perceber a importância das barragens e de mantê-las seguras.

Para mitigar esses impactos negativos, a construção e operação de barragens requerem um procedimento técnico detalhado, garantindo a identificação das características locais que podem influenciar no funcionamento da estrutura, visto que as barragens devem ser projetadas e construídas para garantir a estabilidade a longo prazo, pois como atribuído por Menescal (2005) barragens mal cuidadas elevam o risco de prejuízos sociais, econômicos, ambientais e ao patrimônio nacional.

Desta forma vê-se a necessidade de estudar os impactos específicos da água sobre o barramento, para que seja possível monitorar as diversas ocorrências e perceber quando se acontece uma anomalia.

## **METODOLOGIA**

Esta dissertação tem como objetivo gerar conhecimento (segurança de barragens) relacionado à análise dos efeitos da água através de seus percursos nas estruturas das barragens de terra através da formação e progresso das erosões internas.

O trabalho se caracteriza como uma pesquisa descritiva, com foco no estudo descritivo visto que as informações discutidas são primordialmente uma compilação de

trabalhos e teses referentes às estruturas de barragens de terra e a erosão interna, de modo a condicionar um melhor entendimento sobre o assunto assim como descrever os processos inerentes ao tema.

Objetivo da escolha desse tema de estudo se dá pelo fato de as barragens de terra serem maioria global nos tipos de barragens tornando o estudo mais abrangente, além do estudo da erosão interna que se apresenta como uma das patologias de maior risco para uma barragem de terra, evidenciado por Mineiro em 1991, onde apresenta uma aplicação prática que envolve uma análise abrangente de riscos associados a uma barragem de aterro localizada em Marrocos. Esta análise revelou que o cenário mais crítico identificado estava relacionado à erosão interna.

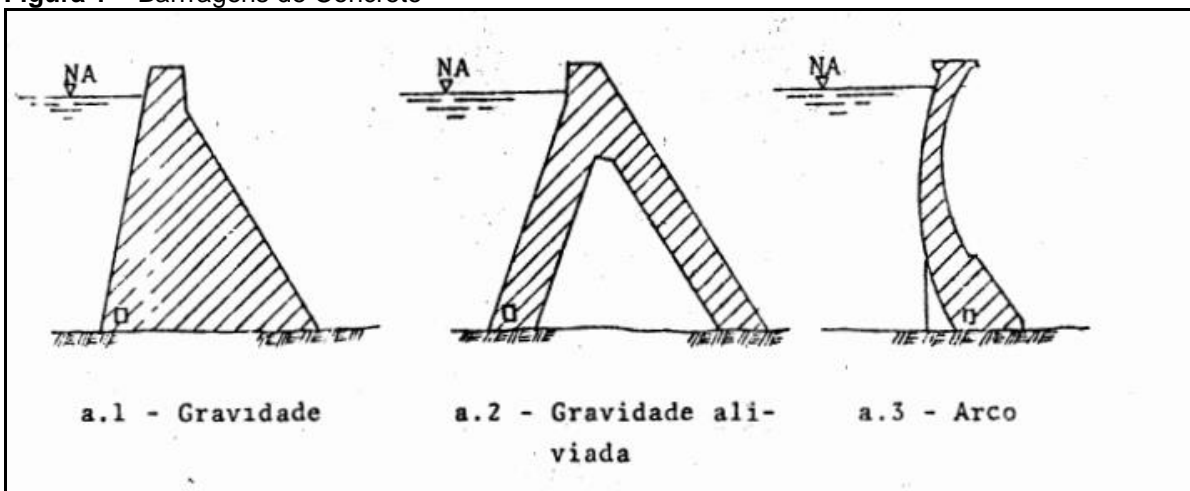
## **DESENVOLVIMENTO**

O projeto de uma barragem geralmente está associado ao de um grande empreendimento, que poderá apresentar diferentes graus de complexidade em função da finalidade para a qual será construída. Barragens podem ser classificadas em diferentes categorias, dependendo do propósito da classificação. Um dos tipos mais comum de classificação é aquela baseada nos materiais utilizados para sua construção (MELO, 2014).

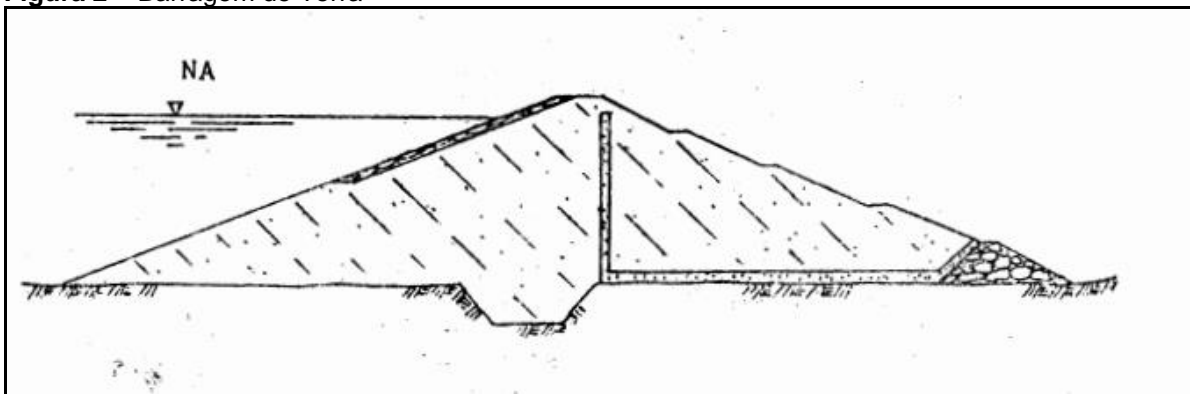
Segundo Gaioto (1982), os diferentes tipos de barragens que se mostram particularmente relevantes quando consideramos tanto os materiais de construção empregados quanto a configuração geométrica adotada para sua implementação englobam as seguintes:

- Barragem de Gravidade (concreto)
- Barragem de Gravidade aliviada (concreto)
- Barragem em Arco (concreto armado)
- Barragem de Terra
- Barragem de enrocamento

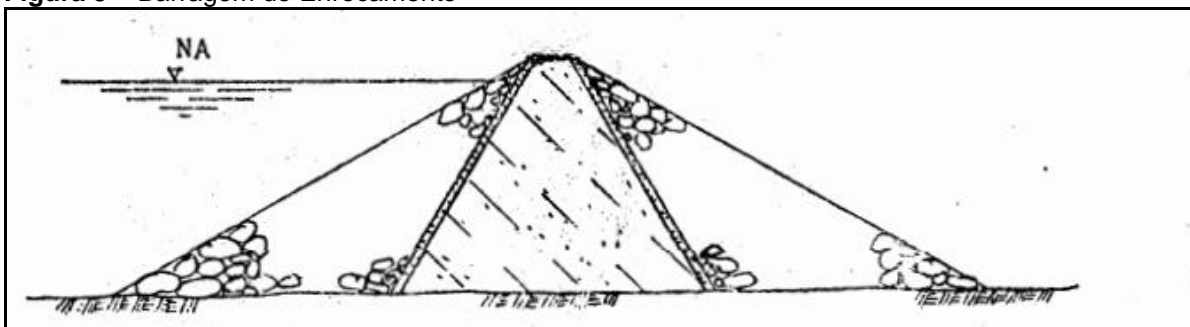
Conforme ilustrados nas figuras 1, figura 2 e figura 3

**Figura 1 – Barragens de Concreto**

Fonte: Barragens de Terra e Enrocamento, 1982

**Figura 2 – Barragem de Terra**

Fonte: Barragens de Terra e Enrocamento, 1982

**Figura 3 – Barragem de Enrocamento**

Fonte: Barragens de Terra e Enrocamento, 1982

Diversos estudos e levantamentos acerca da localização do empreendimento são necessários para a escolha do tipo de barragens, sendo essas análises resumidamente divididas conforme Gaioto (1982) em:

- Topografia
- Condições Geológicas-Geotécnicas das Fundações

- Materiais de Construção
- Dimensões e Localização do vertedouro
- Condições do Meio ambiente
- Condições Climáticas

Silva Filho (2001), define que as barragens de terra e/ou enrocamento são estruturas construídas utilizando materiais naturais, como argilas, siltes e areias, bem como materiais produzidos artificialmente, como britas, enrocamentos ou rejeitos de mineração. Elas são tipicamente formadas a partir de materiais obtidos em áreas de empréstimos ou escavações obrigatórias e são submetidas a um rigoroso processo de controle durante sua construção.

Neste trabalho de pesquisa, merecem destaque as barragens de terra, uma área de especial interesse, dadas as suas implicações significativas em 2 aspectos principais que se interligam.

Primeiramente a sua flexibilidade em relação a sua capacidade de implantação, conforme Sherard et al. (1966) (Apud. MELO, 2014), uma das principais vantagens inerentes às barragens de terra reside no fato de que os materiais de construção são fornecidos pela própria natureza. Além disso, a versatilidade dessas estruturas se reflete na capacidade de serem erigidas em praticamente qualquer tipo de fundação. Tais fatores conferem às barragens de terra uma posição destacada como soluções de projeto extremamente versáteis. Dessemelhante por exemplo das barragens de concreto, como cita Gaioto (1982), as fundações ideais para esse tipo de barramento são as fundações em rocha, visto que em fundações de cascalho, areia fina, silte ou argila barragens de concreto não são adequadas ou possuem limitações relacionadas à sua altura e tamanho.

Outro elemento de importância crucial sobre as barragens de terra, sendo esta uma consequência da sua capacidade de implementação, é a sua quantidade no espectro mundial, no ano de 1995, a “International Commission on Large Dams” (ICOLD 1985 Apud. SANTOS; CALDEIRA, 2008) realizou uma abrangente coleta de dados abordando grandes barragens em todo o mundo. A partir desta extensa base de dados, foram derivadas estatísticas fundamentais que abarcam incidentes em barragens, levando em consideração uma série de fatores, incluindo a tipologia das barragens, sua altura e o ano de sua construção.

Os resultados dessa análise revelaram informações cruciais sobre a distribuição das barragens em todo o mundo. Os dados mostram que as barragens de aterro, um tipo que engloba barragens de terra e barragens de enrocamento, representavam aproximadamente três quartos do total de barragens existentes. Dentro desse grupo, cerca de 90% correspondiam a barragens de terra, enquanto as barragens de enrocamento constituíam os restantes 10%. Essas estatísticas fornecem uma visão significativa da predominância das barragens de aterro, com destaque para as barragens de terra, no panorama global das estruturas de retenção de água.

De acordo com as conclusões do ICOOLD (2008), que demonstra a predominância quantitativa das barragens de terra, a barragem de aterro, composta de terra e enrocamento, é identificada como uma das principais estruturas, representando aproximadamente 75% do total de barragens em todo o mundo.

Em relação às outras barragens, uma barragem de aterro implica, desde logo, uma preocupação acrescida com os estudos de percolação, uma vez que a passagem de água através do corpo da barragem é uma realidade. Estes estudos, bem como os de estabilidade, deverão ser acompanhados por um eficaz sistema de monitoramento em fase de construção e em serviço, para averiguar a funcionalidade e segurança de todo o sistema (SOUZA, 2013).

Conforme interpretado por SOUZA (2013), a ocorrência de acidentes em barragens de aterro é frequentemente associada à erosão interna, sendo este fenômeno responsável por cerca de 48% dos incidentes registrados. A erosão interna nesse contexto é consequência da passagem da água pelo corpo da barragem, destacando sua relevância no que diz respeito à segurança e estabilidade dessas estruturas.

Atualmente, tem-se empregado o termo Erosão Interna como aquele que inclui todos os mecanismos que envolvem a remoção de partículas de solo de dentro de estruturas e suas fundações (FUSARO et. al, 2017 apud. SILVA, D; et al., 2020).

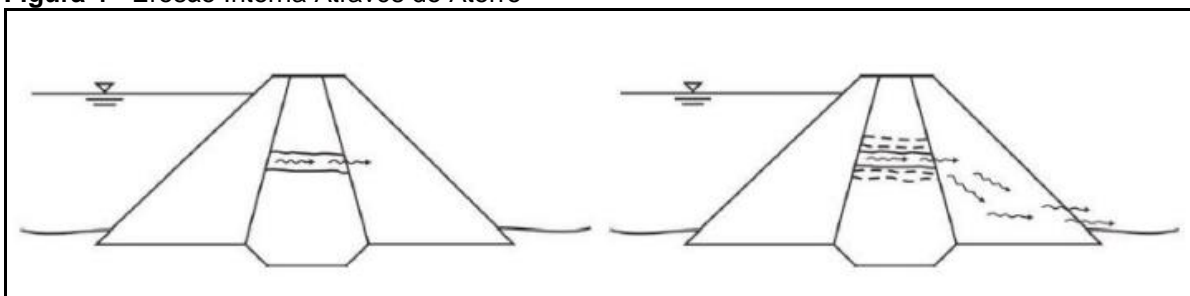
Entretanto, como explica Souza (2013), apesar de várias terminologias se empregadas para descrever o fenômeno da erosão interna em barragens, é importante salientar que, embora alguns autores usem as expressões 'erosão interna' e 'erosão tubular' (piping) de forma intercambiável, essa prática não é rigorosamente precisa, uma vez que o piping é uma manifestação específica da erosão interna, que pode ocorrer de diversas maneiras distintas.

A erosão interna é um processo que ocorre quando as partículas do solo presentes dentro de uma barragem de aterro ou em sua fundação são transportadas a jusante devido ao fluxo de infiltração. Este fenômeno pode ser desencadeado por diversas causas, incluindo o arrastamento concentrado de partículas finas, erosão do solo em contato com a água, piping ou suffusion (processo de erosão interna em que partículas finas são erodidas da matriz de partículas maiores de solo devido ao fluxo de água, abandonando um esqueleto de solo composto pelas partículas maiores).

O arrastamento concentrado de partículas pode ocorrer em fendas, tanto no corpo da barragem quanto em sua fundação, geralmente em áreas permeáveis que contêm materiais grosseiros mal compactados, resultando em uma alta porosidade. Esse processo muitas vezes é catalisado por diferenças no assentamento do solo e por fraturas induzidas por condições meteorológicas adversas. À medida que o fluxo se concentra em determinadas áreas, a erosão das paredes da fenda é provocada, contribuindo para o fenômeno global da erosão interna.

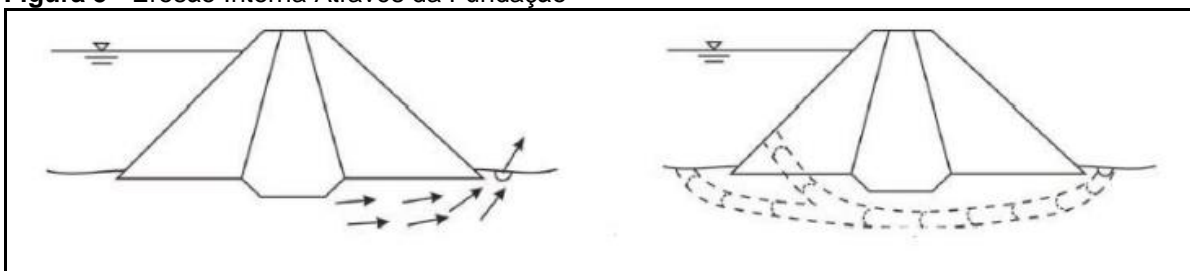
O processo de erosão interna, em barragens de aterro e suas fundações, pode ser classificado em três modos gerais de ocorrência: erosão interna através do aterro, erosão interna através da fundação e erosão interna através do aterro para a fundação. (SILVA, D; et al., 2020). Segundo mostra Souza (2013), nas figuras seguintes.

**Figura 4 - Erosão Interna Através do Aterro**



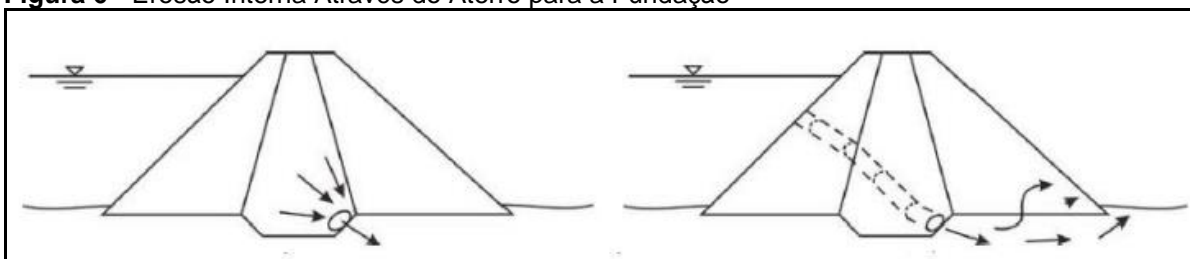
Fonte: Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico, 2013

**Figura 5 - Erosão Interna Através da Fundação**



Fonte: Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico, 2013

**Figura 6 - Erosão Interna Através do Aterro para a Fundação**



Fonte: Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico, 2013

Em relação ao processo de erosão interna, o fenômeno pode ser dividido em quatro fases de desenvolvimento: iniciação, continuação/filtragem, progressão e formação de brecha (FOSTER et al., 1998 apud PIMENTA FILHO, 2013).

A fase de iniciação de erosão interna corresponde à primeira fase do processo de erosão interna, em que ocorre um fenômeno de separação das partículas. São definidos quatro fenômenos de iniciação: erosão em fugas concentradas, erosão regressiva, sufusão e erosão de contacto entre solos. Na sequência apresentam-se os principais fatores que influenciam a susceptibilidade de ocorrência de cada um desses fenômenos de iniciação (SANTOS; CALDEIRA, 2008).

- **Erosão por Fugas Concentradas**

Ocorre quando há uma abertura através da qual ocorre um vazamento concentrado e as paredes da abertura podem ser erodidas pelo fluxo de água. Tais vazamentos concentrados podem ocorrer em juntas de construção no maciço, zonas contínuas contendo materiais grosseiros e/ou mal compactados ou em fissuras internas causadas pelo estado de tensões, recalques, ressecamento ou fratura hidráulica. Em algumas circunstâncias, estas aberturas podem ser sustentadas pela presença de elementos estruturais, tais como vertedouros e condutos, ou pela presença de



materiais coesivos capazes de “suportar o teto” da cavidade tubular do piping. (SILVA, D; 2016).

- **Erosão Regressiva**

Inicia-se numa zona de escoamento livre e sem filtros à saída do escoamento, no aterro ou na fundação, envolve a separação e o arrastamento para jusante de partículas de solo, de modo progressivo e regressivo (no sentido de jusante para montante).

Os gradientes hidráulicos, assim como as velocidades de percolação, devem ser suficientemente elevados para separar as partículas na fronteira de saída do escoamento. Se o aterro for homogéneo, o processo evolutivo continua até se formar um tubo que atinge a albufera, ocorrendo o fenómeno de erosão tubular (“piping”). Se o aterro for heterogéneo, a erosão regressiva pode cessar numa zona de gradientes hidráulicos menores. A erosão tubular por erosão regressiva pode desenvolver-se após o início de sufusão. (PINHO, 2016).

- **Sufusão**

A sufusão consiste numa erosão seletiva de partículas finas, contidas no interior de uma matriz de partículas mais grosseiras (partículas estruturais). As partículas mais finas atravessam os vazios existentes entre as partículas maiores, deixando intacto um esqueleto de solo formado pelas partículas mais grosseiras. Os solos suscetíveis a sufusão são usualmente referidos como solos internamente instáveis.

É de referir, ainda, que os solos mais suscetíveis de sofrerem sufusão apresentam granulometria extensa, grosseira, com cauda relativa aos materiais finos praticamente horizontal e granulometria descontínua (por exemplo: com ausência da fração granulométrica com dimensões de areia). O resultado de um processo prolongado de sufusão traduz-se num abatimento, também designado por depressão, observável à superfície (“sinkhole”). (PINHO, 2016).

Segundo ICOLD (2015) (apud SILVA, 2016) para a sufusão ocorrer os seguintes critérios devem ser satisfeitos, sendo:

- ❖ **Critério 1:** O tamanho das partículas finas do solo deve ser menor do que o tamanho dos espaços formados pelas partículas grossas, que constituem o esqueleto básico do solo;
- ❖ **Critério 2:** A quantidade de partículas finas do solo deve ser apenas suficiente para preencher os vazios do esqueleto do solo base, formado pelas partículas grossas. Se existir mais partículas finas do que o necessário para preencher os

vazios, as partículas grossas irão "flutuar" na matriz de finos, em vez de formar o esqueleto do solo;

- ❖ **Critério 3:** A velocidade de fluxo, através da matriz do solo, deve impor uma tensão suficientemente elevada para superar as tensões efetivas do solo e mover as partículas finas através dos vazios.

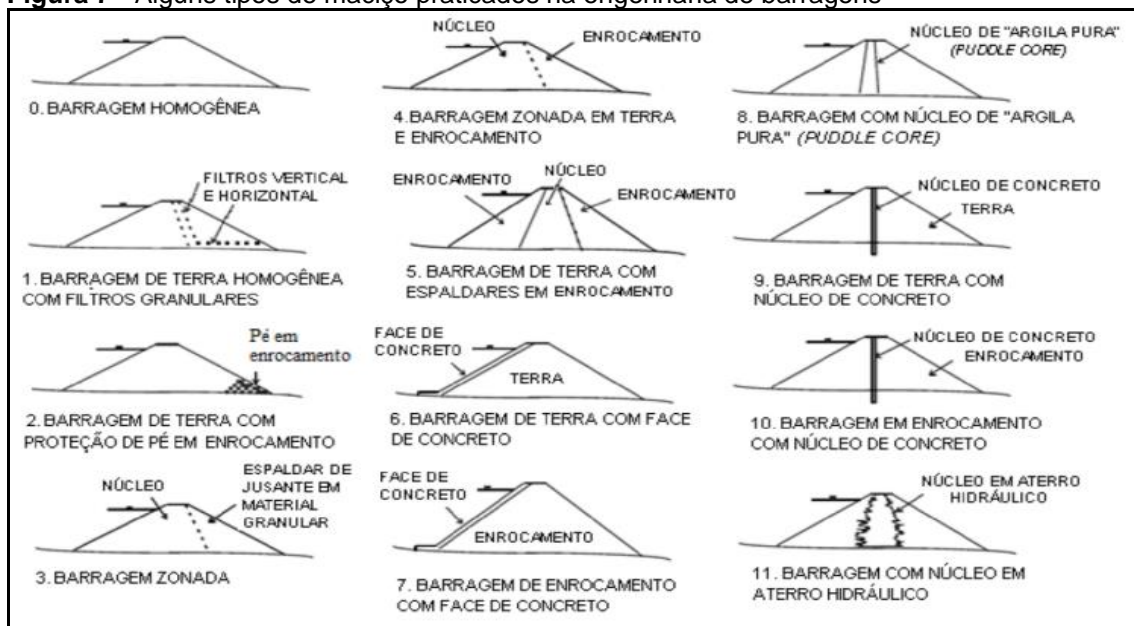
- **Erosão no Contacto Entre Solos**

É uma forma de erosão interna que envolve a erosão seletiva das partículas finas no contato com uma camada mais grossa, causada por um fluxo que passa pela camada mais grossa. Refere-se apenas a condições em que o fluxo na camada mais grosseira é paralelo à interface entre a camada grossa e a fina. A erosão seletiva de partículas finas, a partir do contato com uma camada mais grossa, causada pelo escoamento através da camada fina com fluxo normal à superfície de contato é considerada em outra fase do processo de erosão: continuação (SILVA, 2016).

A fase de continuação da erosão está atrelada ao fato de a barragem contar ou não com um sistema de drenagem interna. No caso de contar com um sistema de drenagem interna, outro ponto importante a avaliar é se este sistema é eficiente, ao passo de interromper o processo de erosão (SILVA, 2016).

Apresentado por Silva (2016), a figura 8 apresenta algumas configurações de seções típicas, praticadas na engenharia, e a Tabela 1 mostra uma análise qualitativa das probabilidades de ocorrência de erosão interna, segundo essas configurações.

**Figura 7 - Alguns tipos de maciço praticados na engenharia de barragens**



Fonte: Estudo De Filtro Aplicado Ao Controle De Erosão Interna Em Barragens, 2016

**Tabela 1** - Classificação de probabilidade de ocorrência de erosão interna em barragens de acordo com o tipo de maciço

Tipo / Categoria de maciço (ver Figura 3.3)	Probabilidade de ocorrência de erosão interna	Controle de erosão interna
Barragem homogênea (0) Barragem de terra com proteção de pé em enrocamento (2)	A. Alta	Pouco ou nenhum controle
Barragem zoneada (3) 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)	B. Moderada	Algum controle, a depender dos materiais do maciço e da eficiência do filtro
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)	C. Baixa	Controle moderado, a depender da eficiência do filtro e dos dispositivos em concreto
Barragem de terra homogênea com filtros granulares (1) Barragem de terra com espaldares em enrocamento (5)	D. Muito baixa	Bom controle, a depender de boa qualidade de projeto e construção do maciço e filtros

Fonte: Estudo De Filtro Aplicado Ao Controle De Erosão Interna Em Barragens, 2016

O desenvolvimento de processos de erosão interna, que culminam na rotura da barragem e sua fundação, é muitas vezes associado à ausência de qualquer tipo de filtros. Aos solos suscetíveis de padecer de qualquer fenómeno de iniciação de erosão interna, devem ser adotadas medidas como seja a consideração de filtros granulares adequados em zonas de transição, onde se podem desenvolver gradientes hidráulicos importantes, para deste modo evitar a continuação da erosão interna.

A presença de filtros pode, assim, parar eficazmente o processo de erosão através da retenção das partículas finas arrastadas e da cicatrização de fugas concentradas de água. Porém, os filtros terão de satisfazer os critérios adequados de dimensionamento e não devem apresentar segregações resultantes de deficiente construção.

Os filtros granulares para a retenção de materiais finos são dimensionados, principalmente, através da aplicação de critérios empíricos (PINHO, 2016).

Os filtros granulares para retenção de materiais finos são dimensionados, principalmente, através da aplicação de critérios empíricos que têm sido propostos por diferentes investigadores. Estes critérios foram obtidos através da correlação entre parâmetros de diferentes materiais de filtro e materiais de base (solos que se pretendem proteger), que produzam comportamentos satisfatórios quando ensaiados, em laboratório, sob condições extremas. Na sequência apresentam-se os cinco

critérios básicos de dimensionamento de filtros em barragens de aterro (Mínguez et al. 2006 Apud. SANTOS; CALDEIRA, 2008)

- **Critério de Retenção**

Os filtros devem ser suficientemente finos para que os interstícios entre as partículas do filtro possam reter parte das partículas de maior dimensão do solo de base.

- **Critério de permeabilidade**

Os filtros devem ser suficientemente grosseiros para permitir a água de percolação passe através do filtro, evitando a instalação de elevadas pressões intersticiais e de elevados gradientes hidráulicos.

- **Critério de uniformidade**

A granulometria dos filtros deverá ser suficientemente uniforme para assegurar que, com uma qualidade de construção apropriada, o material in situ não sofra segregação durante o manuseamento, a colocação, o espalhamento e a compactação.

- **Critério de auto estabilidade**

A fracção mais grosseira dos filtros deve respeitar o critério de retenção relativamente à sua fracção mais fina. O filtro não deve ser susceptível a sufusão.

- **Critério de material granular**

Os filtros devem ser materiais granulares para não se formarem fissuras, mesmo em zonas adjacentes ao núcleo onde este possa ter sofrido fissuração.

A progressão da erosão está associada ao aumento de uma zona afetada por erosão interna e ao aumento das pressões intersticiais e dos caudais percolados. Normalmente esta fase associa-se ao desenvolvimento de uma erosão tubular através do aterro ou da sua fundação.

Uma vez iniciada e não interrompida pela ação do filtro na barragem, a erosão interna vai progredir caso existam condições hidráulica e/ou mecânica adequadas (ICOLD, 2015, apud SILVA, 2016), das quais:

- **Condição hidráulica adequada:**

A água que escoar através da barragem, deve gerar uma velocidade de percolação de modo a fornecer energia, ou força de arraste, suficiente para continuar a transportar as partículas do solo, ao longo de aberturas e superfícies externas da barragem, em um processo contínuo;

- **Condição mecânica adequada**

A água só escoar através de caminhos preferenciais na barragem porque esses caminhos são criados por fratura hidráulica e/ou o “tubo” ou cavidade, através da qual as partículas erodidas estão sendo transportadas, não colapsa.

Segundo o ICOLD (2015), a fase de progressão da erosão pode ser interrompida, considerando as condições hidráulicas, nos casos em que o fluxo através do “tubo” formado pelo fluxo concentrado, erosão de contato ou sufusão, sofre uma perda de potencial devido a dissipação da carga hidráulica nas zonas a montante ou a jusante.

Neste caso, uma condição de equilíbrio pode-se estabelecer e as forças de erosão tornam-se iguais ou menores do que as forças de resistência. No caso da erosão regressiva, a interrupção da progressão do “tubo” acontece se o gradiente hidráulico do processo é menor do que o gradiente crítico.

Considerando as condições mecânicas, tem-se que a progressão pode ser interrompida, se as partículas de uma zona a montante do núcleo da barragem, transportadas através do “tubo” em desenvolvimento, eventualmente criam uma camada que sela o filtro interrompendo a progressão da erosão. Para que isto ocorra, deve existir um filtro de transição a jusante do núcleo para interceptar as partículas erodidas (ICOLD, 2015).

Estágio de formação da brecha, no qual eflui uma vazão descontrolada do reservatório e não se tem mais controle sobre o processo. Até esta etapa do processo, geralmente todas as intervenções possíveis já devem ter sido efetuadas (FOSTER et al., 1998 apud PIMENTA FILHO, 2013).

Segundo Santos e Caldeira (2008), esta constitui a última fase do processo de erosão interna. Em geral, considera-se que pode ocorrer um de quatro mecanismos que conduzem à formação de brecha:

- **O Alargamento Excessivo de um Tubo de Erosão**

É influenciado, principalmente, pelo tipo de zonamento da barragem e pelas características da zona a jusante do núcleo. Em geral, as barragens homogêneas têm maior capacidade de suportar um tubo de grandes dimensões sem colapsar, dada a natureza dos materiais aplicados nesse tipo de barragem. Reciprocamente, as barragens de aterro zonado, em particular com maciços estabilizadores em enrocamento, são menos susceptíveis à formação de brecha devido à incapacidade de o enrocamento sustentar um tubo e à sua elevada capacidade de descarga. O volume armazenado na albufera é um fator igualmente importante. Para valores relativamente

reduzidos, a albufera pode ser esvaziada através do tubo antes da formação da brecha.

- **Instabilidade do Paramento de Jusante**

As barragens mais susceptíveis a apresentam como características principais: um sistema de drenagem interno com uma reduzida capacidade de descarga ou uma zona a jusante muito pouco permeável, e uma segurança marginal ao escorregamento do talude de jusante. As barragens de terra homogêneas são mais susceptíveis a desenvolverem instabilidade do maciço de jusante com formação de brecha.

- **Galgamento por Perda de Folga**

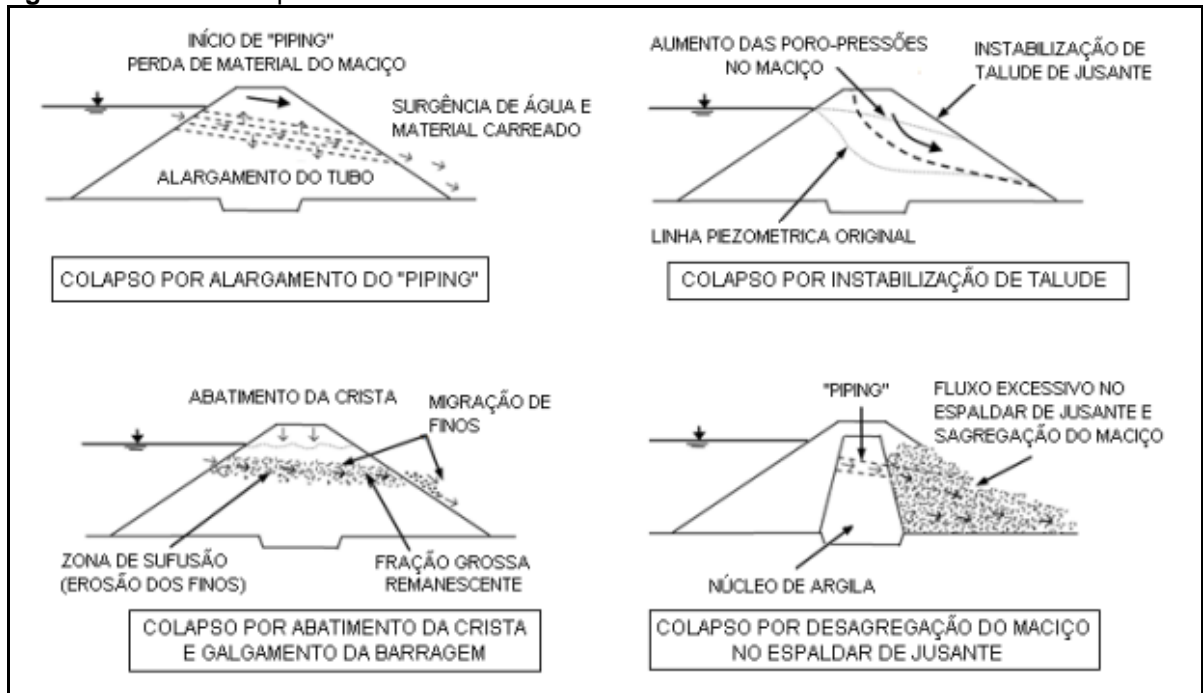
As barragens mais susceptíveis a são aquelas com coroamento relativamente estreito e com reduzidas folgas. Em geral, a formação de abatimentos à superfície, em resultado de fenómenos de sufusão, não resulta em brecha, caso sejam tomadas medidas corretivas adequadas e atempadas. Caso contrário, a ação erosiva da água na base do abatimento pode provocar o progressivo colapso das suas paredes, em direção a jusante, formando uma brecha. As medidas de reabilitação podem passar pela colocação de material no talude de jusante e/ou pelo preenchimento do abatimento com material de aterro adequado.

- **Destacamento de Material do Talude de Jusante**

O mecanismo de formação de brecha por destacamento de material do talude de jusante envolve uma erosão progressiva da superfície do talude de jusante na zona de saída do escoamento. É mais relevante em barragens com zonas permeáveis a jusante do núcleo, incapazes de suportar o tubo de erosão aberto, ou seja, com maciço de jusante em areia, em cascalho ou em enrocamento. A probabilidade de ocorrência deste mecanismo é baixa.

A Figura 8 apresenta esquematicamente os modos de ruptura mais comuns devidos à erosão interna, de acordo com Fell e Fry (2007) (Apud PIMENTA FILHO, 2013).

**Figura 8** - Modos de ruptura devidos a eventos de erosão interna



Fonte: Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios, 2013

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, a análise revela a crítica necessidade de atenção e vigilância nas barragens de terra visto que o processo de erosão interna e sua influência nas estruturas das barragens pode acontecer sem sinais prévios e alcançar a rotura da barragem em breves períodos, evidenciando a urgente demanda da interrupção precoce do processo de erosão e a prevenção da formação de brechas, riscos esses potencializados pela grande quantidade de barragens de terra presente no mundo. Os filtros granulares e a aplicação eficaz de técnicas de mitigação dos riscos de erosão interna devem ser integradas de forma proativa nas estratégias de monitorização e combate efetivo à erosão interna, apontando que a conscientização sobre os processos da erosão interna e a adesão à práticas de segurança robustas são fundamentais para garantir a integridade das barragens e, conseqüentemente, a segurança das comunidades e do meio ambiente circundante, acelerando o avanço contínuo na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias de monitorização e mitigação de erosões.

## REFERÊNCIAS

- CRUZ, Paulo Teixeira. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- GAIOTO, Nélio. **Barragens de Terra e Enrocamento**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1982. 51 p.
- ICOLD. **Internal Erosion Of Existing Dams, Levees And Dikes, And Their Foundations**. Bulletin 164. 2015, 287 p.
- MARIANO, D. C. L; SILVA, J. B. Barragens de terra: características de seus alteamentos. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e277111133469, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33469>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- MELO, Alexandre. **Análises de Risco Aplicadas a Barragens de Terra e Enrocamento**. 2014. 244 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MENESCAL, R. A. (Org.). **A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil**. 2. ed. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. 315 p.
- PERSECHINI, Maria Inês Muanis *et al.* **Segurança de barragens: engenharia a serviço da sociedade**. Grupo Banco Mundial. Brasília, 2015. 104 p. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/688401487787254471/Seguranca-de-barragens-engenharia-a-servico-da-sociedade>. Acesso em: 5 mai. 2023.
- PIMENTA FILHO, M. A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SANTOS, R., e CALDEIRA, L. Processos De Erosão Interna Em Barragens De Aterro E Suas Fundações. In: XI Congresso Nacional de Geotecnia, XI<sup>o</sup>, 2008, Coimbra, Portugal. **Proceedings...** Vol.II, pp. 345-352.
- SILVA, Dayana Santos; et al. Avaliação de probabilidade e mitigação dos riscos do processo de erosão interna em barragens. In: Conferência Sul-Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens, VI<sup>o</sup>, 2020, Campinas. **Proceedings...** p. 8.
- SILVA, Dayana Santos. **Estudo De Filtro Aplicado Ao Controle De Erosão Interna Em Barragens**. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.



**SOUZA, D. J. S. C. Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico.** 2013. 199 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

**PINHO, A. F. S. Estruturas De Retenção De Água Sobre Fundos Móveis. Análises Do Comportamento Hidráulico Da Fundação Com Base Em Modelações 2d E 3d.** 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.