

WORKSHOPS DE IDENTIFICAÇÃO DE MODOS DE FALHA:
DOCUMENTOS DE APOIO À APLICAÇÃO DO GUIA

Catálogo para barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas



Expressamos nossa gratidão ao Japan Special Fund (JSF) por viabilizar esta publicação por meio da cooperação técnica RG-T3528: Implementação da metodologia para fortalecer a resiliência ao risco de desastres e à mudança climática nos projetos do BID.

Coautoria: A produção e disseminação deste Guia Metodológico e seus Catálogos foram coordenadas por Raimon Porta e Ginés Suárez, com as valiosas contribuições de Julia Ciancio, María Alejandra Escovar e Adriana Zambrano. O desenvolvimento do conteúdo do Guia e a catalogação dos Modos de Falha foram realizados por Ignacio Escuder, Adrián Morales, Sandra Navarro e Helena Yarritu, equipe técnica da empresa consultora iPresas.

Agradecimentos: O processo de revisão técnica contou com a inestimável colaboração de Melissa Barandiarán, Karen Piñeros e Carolina Rogelis. O desenvolvimento do curso online de capacitação associado a este Guia foi realizado pela empresa TAEC com o apoio da equipe do INDES e o feedback de Álvaro Adam, Leandro Kazimierski e Luis Mora. A produção de conteúdo, sua publicação e difusão foram possíveis graças a Edoardo Brovero, Lara Chinarro, Wilhelm Dalaison, Maricarmen Esquivel, Patricia Henríquez, Sergio Lacambra, Roberto Leal, Katherine López, David Maier, Lidia Marcelino, Pamela Ogando, Harold Rodríguez e Serge Troch.

Design e diagramação: Alejandro Scaff.

Citação sugerida: Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Workshops de Identificação de Modos de Falha. Documentos de apoio à aplicação do Guia. Catálogo para barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas. 2025.

Palavras-chave: modo de falha, infraestrutura, risco, desastre, resiliência, barragens.

Copyright©2025 Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Esta obra está sujeita a uma licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0 CÓDIGO LEGAL) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.pt>). Devem ser cumpridos os termos e condições indicados no link e deve ser feito o devido reconhecimento ao BID.

Qualquer controvérsia que surgir sob esta licença e que não puder ser resolvida amigavelmente será submetida à mediação não vinculante conforme as Regras de Mediação da OMPI, mediante notificação adequada. Caso não haja acordo, a controvérsia será submetida à arbitragem conforme as regras da Comissão das Nações Unidas para o Direito Comercial Internacional (CNUDCI). O uso do nome do BID para fins distintos do reconhecimento ou o uso do logotipo do BID não está autorizado por esta licença e requer um acordo adicional.

Observe que o link inclui termos e condições que fazem parte integrante desta licença.

As opiniões expressas nesta obra são exclusivamente dos autores e não refletem necessariamente os pontos de vista do Banco Interamericano de Desenvolvimento, de seu Diretório Executivo ou dos países que representa.



Documentos de apoio à aplicação do guia: Catálogo para barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas

Siglas e abreviações	4
1. Introdução	5
2. Características específicas para barragens	6
2.1. Participantes	7
2.2. Revisão de informações	8
2.3. Visita técnica	8
2.4. Classificação dos Modos de Falha	9
3. Modos de Falha	12
3.1. Modos de Falha hidrológicos	15
3.2. Modos de Falha geotécnicos – Barragens de concreto	22
3.3. Modos de Falha geotécnicos – Barragens de aterro	29
3.4. Modos de Falha do reservatório	40
3.5. Outros Modos de Falha	43
4. Relação de estudos científico-técnicos	51
5. Recomendações e boas práticas	52
Referências	57

Siglas e abreviações

ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i> (Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens)
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Civis)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CDA	<i>Canadian Dam Association</i> (Associação Canadense de Barragens)
CCS	Divisão de Soluções para a Mudança Climática do BID
CPR	Comunidade de Prática de Resiliência do BID
CWC	<i>Central Water Commission</i> (Comissão Central de Água)
DRM	Unidade de Gestão de Risco de Desastres do BID
ESG	Divisão de Soluções Ambientais e Sociais do BID
ESR	Unidade de Gestão de Riscos Ambientais e Sociais do BID
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (Comissão Federal de Regulação de Energia)
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos)
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i> (Comissão Internacional de Grandes Barragens)
INE	Setor de Infraestrutura e Energia do BID
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
MARDMC	Metodologia de Avaliação de Riscos de Desastres e Mudança Climática do BID (em inglês, DCCRAM)
MF	Modo de Falha
MPAS	Marco de Política Ambiental e Social do BID
OP-704	Política de Gestão de Risco de Desastres do BID
PAE	Plano de Ação de Emergência
PGRD	Plano de Gerenciamento de Riscos de Desastres
SPANCOLD	Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens
WIMF	Workshop de Identificação de Modos de Falha
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i> (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i> (Departamento de Recuperação de Recursos Hídricos dos Estados Unidos)

1. Introdução

O objetivo deste documento, juntamente com o “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, é desenvolver a metodologia dos Workshops de Identificação de Modos de Falha (WIMF) e sua aplicação específica a determinados tipos de infraestrutura.

Os Workshops constituem a principal etapa da análise qualitativa de riscos de desastres e mudanças climáticas em infraestruturas. Por isso, e com o intuito de garantir a correta aplicação do guia, foram desenvolvidos diversos documentos de referência que fornecem, de forma clara e abrangente para cada tipo de infraestrutura, as técnicas, os processos e as ferramentas necessárias para o adequado desenvolvimento dos Workshops de Identificação de Modos de Falha e a consequente tomada de decisões. Cabe destacar que a falha não significa necessariamente a ruptura da barragem, mas também pode representar a perda do serviço prestado por ela.

Especificamente, este Catálogo busca apoiar e complementar a aplicação do “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha” em barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas.

O documento está organizado em quatro seções. A primeira detalha as características específicas das barragens a serem consideradas ao realizar as sessões de identificação de Modos de Falha, desde os participantes que devem estar presentes, passando pelos elementos-chave da revisão de informações e da visita técnica, até a classificação dos riscos.

A segunda seção apresenta exemplos dos Modos de Falha mais representativos, classificados segundo a tipologia da barragem e o evento desencadeador. Para cada Modo de Falha foi elaborada uma ficha que inclui sua descrição, um esquema e os fatores que influenciam o risco. Esses fatores podem aumentar ou diminuir o risco dependendo da situação ou das informações disponíveis para cada infraestrutura que será analisada. Como será comentado mais adiante, esses exemplos servem como referência para o leitor, que deverá definir os Modos de Falha e os fatores associados à sua barragem ao longo dos Workshops, com a participação de todos os membros do grupo de trabalho.

Por fim, a terceira e a quarta seção incluem uma relação de estudos técnico-científicos, bem como recomendações e boas práticas, agrupadas segundo a tipologia dos Modos de Falha utilizada na segunda seção. Essas duas últimas partes permitem enriquecer as práticas de intervenção nos Workshops de Identificação de Modos de Falha, enfatizando os aspectos que podem apresentar menor definição nos projetos ou que são particularmente relevantes no projeto e operação da infraestrutura.

2. Características específicas para barragens

Ao longo desta seção são apresentadas as características particulares associadas ao Workshop de Identificação de Modos de Falha para barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas. Em especial, detalham-se os aspectos que diferem da metodologia geral apresentada no guia, os quais estão relacionados ao número mínimo de participantes que devem estar presentes, à viabilidade (ou não) de realizar a visita técnica de forma online e à classificação dos Modos de Falha.

A metodologia descrita no “Guia Metodológica para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha” tem sido amplamente utilizada e desenvolvida em nível mundial.

Algumas entidades internacionais que promovem a gestão da segurança de barragens baseada em risco incluem: o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), o Bureau of Reclamation (USBR) e a Comissão Federal Reguladora de Energia (FERC), nos Estados Unidos; a Associação Canadense de Barragens (CDA); o Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens (ANCOLD); a Agência de Meio Ambiente do Reino Unido; o Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens (SPANCOLD), na Espanha; a Comissão Central de Água (CWC), na Índia; bem como a legislação vigente sobre segurança de barragens na França

Além disso, os principais regulamentos, guias e manuais de boas práticas em nível mundial, que estabelecem as bases dos padrões internacionais para análise de risco, incluem os princípios gerais dos boletins da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), os Guias Técnicos do Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens (SPANCOLD), as Normas Técnicas de Segurança de Barragens da Espanha (abril de 2021), assim como os manuais de projeto das grandes agências federais norte-americanas (USBR e USACE).

As seções a seguir apresentam as variáveis que devem ser consideradas em um Workshop de Identificação de Modos de Falha para barragens, em relação aos guias gerais apresentados no guia metodológico.

2.1. Participantes

As sessões de identificação de Modos de Falha são constituídas por um facilitador e uma série de participantes. No caso das barragens de contenção, irrigação e hidrelétricas, recomenda-se que o Workshop conte, no mínimo, com um técnico especialista nos seguintes campos:

- **Projeto da barragem:** É recomendável a presença de técnicos responsáveis pelo projeto e pela construção, quando for o caso, para que compartilhem sua experiência, as problemáticas ocorridas e possíveis modificações no projeto original, bem como o processo construtivo adotado. Esses participantes enriquecem os Workshops de Modos de Falha, embora não sejam críticos para o seu desenvolvimento, exceto em projetos em fase de concepção, nos quais sua presença é essencial.
- **Hidrologia e hidráulica:** Recomenda-se convidar o(s) especialista(s) que tenha(m) participado do estudo hidrológico e hidráulico durante o projeto da barragem, ou, na ausência deles, um especialista no tema que possa contribuir com sua opinião. Esses dados são fundamentais para compreender e avaliar o dimensionamento dos órgãos de descarga, bem como conhecer a cheia de projeto utilizada no cálculo da barragem. O especialista em hidrologia e

hidráulica é relevante independentemente da fase em que a barragem se encontra (projeto, construção ou operação) no momento de realização do Workshop.

- **Medidas de adaptação às mudanças climáticas:** Os projetos de barragens geralmente incluem um estudo hidrológico e/ou hidráulico, sendo relevante considerar a influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para determinados períodos de retorno. Por isso, recomenda-se convidar um especialista em riscos climáticos para contribuir com sua visão. Independentemente da fase do projeto em que se realize o Workshop, é recomendável a participação desse especialista na sessão.
- **Geologia, geotecnia e sismicidade da região:** É aconselhável convidar o geólogo que participou do estudo geológico-geotécnico da barragem ou, na ausência dele, um especialista no tema que possa oferecer sua visão sobre os materiais e o projeto da fundação da barragem, os potenciais deslizamentos no reservatório e os materiais empregados na construção da estrutura. Além disso, caso a barragem esteja localizada em uma zona sísmica, esse especialista deve ter conhecimentos suficientes para verificar se os riscos sísmicos foram devidamente analisados e se a barragem foi projetada considerando essas solicitações. A participação deste profissional é recomendada em qualquer fase do projeto.
- **Elementos hidromecânicos da barragem:** Caso a barragem disponha de elementos hidromecânicos (comportas, tomadas, descargas de fundo etc.), é recomendável que pelo menos uma pessoa especialista no funcionamento desses dispositivos participe dos Workshops, especialmente se esses elementos forem críticos para a segurança da infraestrutura.
- **Manutenção e operação da barragem:** Para barragens em operação, é recomendada a presença de técnicos responsáveis por inspeções, manutenção e operação da barragem, bem como de profissionais familiarizados com as regras operacionais. A experiência desses técnicos é muito valiosa para identificar potenciais Modos de Falha decorrentes de mau funcionamento e/ou operação. No caso de novas barragens, devem ser envolvidas as entidades que futuramente assumirão essas funções.
- **Gestão de emergências:** Para barragens em operação, é recomendável convidar para os Workshops o pessoal responsável pela gestão de emergências. Esses participantes contribuem para compreender as consequências de falhas ou mau funcionamento da infraestrutura e como está estruturado o sistema de resposta a emergências.
- **Pessoas locais e representantes de comunidades minoritárias:** Esses participantes podem fornecer conhecimentos importantes sobre a região que contribuam para o desenvolvimento do Workshop, como informações sobre as áreas afetadas por vertimentos prolongados da barragem, a eficácia dos sistemas de alerta à população em caso de emergência, ou os impactos específicos das ameaças naturais locais.
- **Governança do risco na área de influência do projeto:** É recomendável que participem pessoas envolvidas em comitês de Gestão de Riscos ou representantes institucionais responsáveis pela execução de planos de gestão de riscos.
- **Proprietário da barragem,** independentemente da fase em que se encontre, e o responsável pela operação, no caso de barragens em funcionamento.
- **Especialistas externos ao projeto:** Esses especialistas não apenas contribuem com seu vasto conhecimento técnico sobre barragens, como também oferecem uma visão externa ao projeto, destacando aspectos que podem passar despercebidos pelos técnicos diretamente envolvidos devido à sua imersão no desenvolvimento do projeto.

Embora esses atores sejam os recomendados para a realização dos Workshops de Identificação de Modos de Falha em barragens, é necessário analisar cada obra e avaliar quais dos participantes mencionados na lista são realmente essenciais para cada caso específico, assim como a eventual necessidade de incluir outros.

2.2. Revisão de informações

Conforme descrito no “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, a revisão e análise das informações existentes constituem a primeira etapa para a identificação dos Modos de Falha e devem abranger todos os aspectos-chave da gestão da segurança, começando pelos relacionados às fases de projeto e construção da infraestrutura, passando pela avaliação do sistema, seu funcionamento e o estado atual da estrutura.

A revisão de informações deve incluir os pontos essenciais dos documentos disponíveis. Por isso, do ponto de vista conceitual, os elementos fundamentais que devem ser considerados na análise de barragens durante a revisão de informações são apresentados na Figura 1.

Figura 1. Elementos-chave da revisão de informações



Alguns pontos-chave mencionados nesse esquema podem não ser necessários, dependendo da fase em que o projeto da infraestrutura se encontra. Por exemplo, como é previsível, o estado atual não será considerado em uma infraestrutura que ainda esteja em fase de projeto.

2.3. Visita técnica

A visita técnica é uma das principais etapas dos Workshops, pois permite obter uma visão integral do estado atual da infraestrutura e identificar possíveis danos que possam levar à falha da estrutura.

Essa atividade é recomendável de forma presencial, pois permite uma inspeção mais detalhada por parte dos especialistas. No entanto, em algumas infraestruturas, pode-se considerar sua realização online caso a opção presencial não seja viável logisticamente.

No caso de barragens, a viabilidade de realizar a visita técnica online varia conforme estejam em fase de operação ou em fase de projeto.

Para barragens em fase de projeto, a visita pode ser realizada de forma online e, de fato, não se recomenda realizá-la presencialmente, pois visitar o eixo da barragem não agrega grande valor ao Workshop. Isso se deve ao fato de que as únicas informações que podem ser obtidas no local são observações do terreno que poderiam complementar os dados disponíveis sobre a fundação, no caso de não haver um estudo geológico-geotécnico detalhado. Além disso, essas observações seriam superficiais e também poderiam ser obtidas por meio de fotografias ou sobrevoos com drones.

Realizar a visita ao eixo da barragem de forma online agiliza o Workshop de Modos de Falha e permite, caso o Workshop esteja sendo realizado presencialmente, que se escolha a localização mais conveniente para todos os participantes.

Por outro lado, para barragens em operação ou em construção, é muito enriquecedor e necessário realizar uma visita técnica presencial, já que os técnicos podem observar com maior detalhe o estado atual da barragem ou detectar aspectos que não são visíveis em vídeos gravados por drones.

De fato, para barragens em construção ou em operação, a modalidade online não é recomendada, pois a verificação dos instrumentos de auscultação ou a inspeção de galerias, entre outros aspectos relevantes, não são viáveis por meio de fotografias ou drones.

2.4. Classificação dos Modos de Falha

No caso de barragens, existem dois tipos de classificação. A primeira é uma classificação qualitativa, enquanto a segunda é uma classificação semiquantitativa. A escolha entre uma ou outra dependerá da complexidade da estrutura e de como os resultados serão utilizados na tomada de decisões. Em geral, a semiquantitativa é mais empregada por ser mais completa, pois considera as consequências associadas. Ambas as classificações são detalhadas a seguir.

CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA

Os Modos de Falha identificados pelo grupo durante as sessões são classificados em quatro categorias com base na possibilidade de ocorrência e nas consequências potenciais, seguindo as recomendações da FERC (2005)¹, realizando assim uma análise qualitativa de riscos desses Modos de Falha.

A metodologia de classificação é a apresentada no guia, com uma fase individual, realizada por meio de formulários, e uma fase grupal, em que os resultados são discutidos e é definida a categoria de cada Modo de Falha. A seguir, são apresentados os quatro graus da classificação qualitativa:

- Grau I: Modos de Falha plausíveis, com possibilidade de ocorrência, não sendo descartada a hipótese de que já estejam em desenvolvimento. Além disso, implicam consequências potenciais muito significativas. Recomenda-se a implementação de ações em curtíssimo prazo para evitá-los.
- Grau II: Modos de Falha também considerados plausíveis, embora com menor probabilidade de ocorrência e com consequências potenciais importantes. Recomenda-se analisá-los por meio de um modelo de risco quantitativo para avaliar a necessidade de implementar ações de mitigação no curto ou médio prazo.

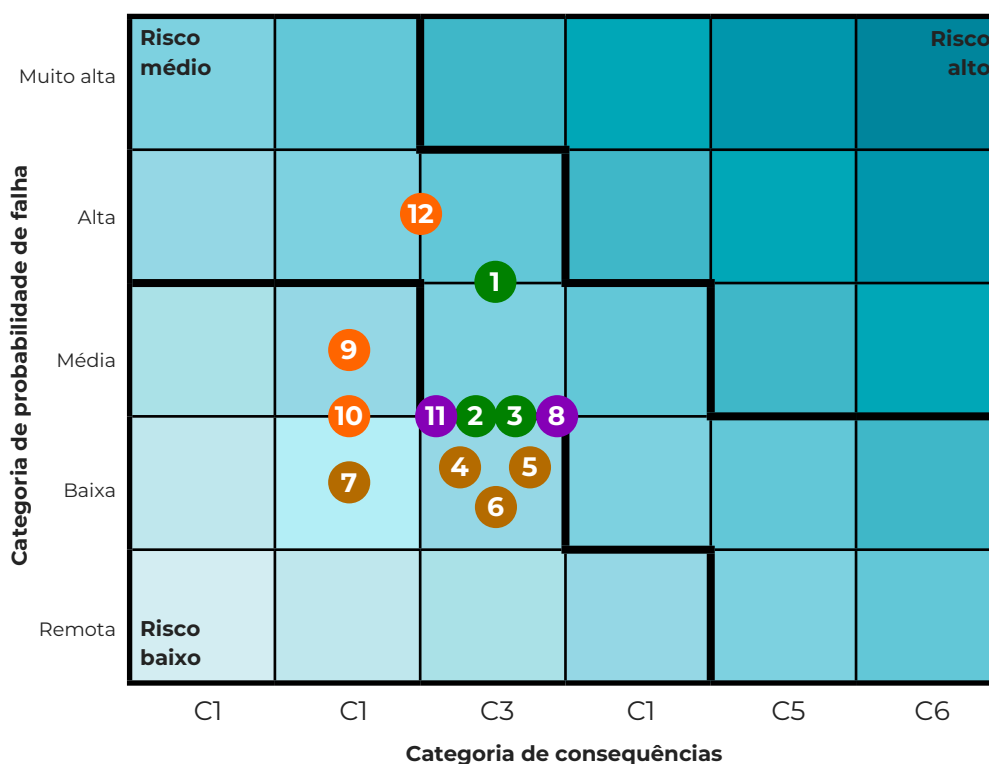
¹ FERC. 2005. "Dam Safety Performance Monitoring Program" in *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects*. Federal Energy Regulatory Commission.

- Grau III: Modos de Falha para os quais as informações disponíveis são insuficientes para determinar sua probabilidade, embora sejam considerados plausíveis e com consequências potencialmente relevantes. Recomenda-se a adoção de ações para reduzir a incerteza, como a instalação de nova instrumentação ou a realização de novos estudos.
- Grau IV: Modos de Falha descartados por não serem considerados plausíveis ou por apresentarem probabilidade muito baixa e/ou consequências muito reduzidas. Em todo caso, recomenda-se sua documentação e que sejam considerados no monitoramento da barragem, assim como em futuras atualizações da identificação de Modos de Falha.

CLASSIFICAÇÃO SEMI-QUANTITATIVA

A análise semi-quantitativa vai um passo além da qualitativa, classificando os diferentes Modos de Falha identificados com base na sua probabilidade de falha (associada a um valor de probabilidade de falha) e nas consequências da falha (associadas a um valor de consequências da falha da barragem). Os resultados da classificação — ou seja, o risco — são representados em uma matriz de risco que combina probabilidade de falha e consequência, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2. Classificação semi-quantitativa de Modos de Falha



Para categorizar a probabilidade de falha, utilizam-se as seguintes cinco categorias, cada uma associada a um intervalo de probabilidade anual de falha de referência.

- **Remota:** Diversos eventos precisam ocorrer simultaneamente ou em sequência para causar a falha, e a maioria — senão todos — tem uma probabilidade insignificante. A probabilidade anual de falha de referência é inferior a 10^{-6} .
- **Baixa:** A possibilidade não pode ser descartada, mas não há evidências convincentes que indiquem que já tenha ocorrido ou que exista uma condição ou falha que possa iniciar o processo. A probabilidade anual de falha de referência está entre 10^{-6} e 10^{-5} .
- **Média:** Existe uma condição ou defeito fundamental. Os dados disponíveis sugerem que é plausível, embora as evidências principais indiquem que é “menos provável” do que “mais provável”. A probabilidade anual de falha de referência está entre 10^{-4} e 10^{-5} .

- **Alta:** Existe uma condição ou defeito fundamental. Os dados disponíveis sugerem que é plausível, com evidências principais apontando mais para “mais provável” do que para “menos provável”. A probabilidade anual de falha de referência está entre 10^{-3} e 10^{-4} .
- **Muito alta:** Existe evidência direta ou indireta substancial de que a falha já foi iniciada ou é provável que ocorra em breve. A probabilidade anual de falha de referência é superior a 10^{-3} .

O outro componente do risco é a magnitude das consequências que cada Modo de Falha pode provocar. Para sua definição, utilizam-se seis categorias:

- **Categoria 1:** Consequências econômicas limitadas para a operação e/ou necessidade de reparos pequenos ou médios na barragem. Pequenas consequências ambientais. Sem liberação de vazões a jusante.
- **Categoria 2:** Consequências econômicas muito significativas para a operação e/ou necessidade de grande reparo na barragem (milhões de dólares). Consequências ambientais graves. Sem liberação de vazões a jusante.
- **Categoria 3:** Liberação descontrolada de vazões com danos a algumas residências isoladas. Não se pode descartar a perda direta de vidas humanas, como de um pedestre ou ocupantes de algum veículo.
- **Categoria 4:** É provável a ocorrência de perdas de vidas devido a dificuldades em alertar pequenas populações próximas (<1000 habitantes) ou evacuar grandes populações com tempo de aviso suficiente (> 2 horas). Estima-se uma perda de vidas entre 10 e 100. As descargas a jusante também causam danos muito significativos à propriedade e/ou ao meio ambiente.
- **Categoria 5:** Espera-se grande perda de vidas devido a dificuldades para avisar e evacuar grandes centros populacionais situados a uma distância média (tempo de chegada da onda entre 1 e 2 horas). Estima-se uma perda de vidas entre 100 e 1000. As descargas a jusante também resultam em danos muito significativos à propriedade e/ou ao meio ambiente.
- **Categoria 6:** Espera-se uma perda direta de vidas muito elevada devido à presença de grandes populações muito próximas ao pé da barragem (>10.000 habitantes e <30–45 minutos de tempo de chegada). Estima-se uma perda de vidas superior a 1000. As descargas a jusante também causam danos muito significativos à propriedade e/ou ao meio ambiente.

Nesta etapa, uma estimativa preliminar da possível perda de vidas pode ser suficiente para atribuir a categoria de consequências com base nos mapas de risco de inundação existentes. Em alguns casos, a falha de uma barragem pode não ter um alto impacto em termos de perda de vidas humanas, mas pode causar um impacto econômico elevado, em função da importância da barragem para a economia regional.

Para ambas as classificações — tanto a probabilidade de falha quanto a categoria de consequências — deve-se realizar uma atribuição individual por cada participante. Essa atribuição individual pode apresentar uma grande dispersão nas classificações devido à incerteza; por isso, é necessário repetir o processo de forma grupal a fim de alcançar uma classificação por consenso. Além disso, as categorias de probabilidade de falha e de consequências não são absolutas, sendo possível atribuir valores intermediários entre duas categorias.

3. Modos de Falha

A seguir, são apresentados os Modos de Falha mais característicos para barragens, estruturados conforme a tipologia dos Modos de Falha, que compreende: Modos de Falha hidrológicos, geotécnicos e/ou estruturais, do reservatório e outros. Os Modos de Falha foram agrupados de forma comum para barragens de concreto e barragens de aterro, exceto para a tipologia de Modos de Falha geotécnicos, na qual se distinguem, por um lado, os Modos de Falha característicos de barragens de concreto e, por outro, aqueles próprios de barragens de aterro.

3.1 Modos de Falha hidrológicos:	15
• Galgamento por falha na operação das comportas	16
• Cheia durante a construção da obra	17
• Galgamento por ruptura de barragem a montante	18
• Cheia e mau funcionamento hidráulico	19
• Erosão no pé do vertedouro e socavamento da barragem	20
3.2 Modos de Falha geotécnicos – Barragens de concreto:	21
• Deslizamento da barragem por sismo	21
• Deslizamento da fundação por sismo	22
• Deslizamento do corpo da barragem	23
• Deslizamento entre barragem e fundação	24
• Ruptura do arco superior ou fissuração por sismo em barragens em arco	25
• Ruptura por trinca de tração na base em barragens em arco	26
• Instabilidade no maciço de apoio e ruptura da barragem em arco	27
3.3 Modos de Falha geotécnicos – Barragens de aterro:	28
• Instabilidade por sismo	28
• Liquefação por sismo	29
• Erosão interna através de conduto	30
• Erosão interna por infiltração na tomada d'água/descarregador de fundo	31
• Erosão interna no corpo da barragem de aterro	32
• Erosão interna da barragem em direção à fundação	33
• Erosão interna na fundação da barragem	34
• Ruptura por erosão interna a partir dos estribos após sismo	35
• Instabilidade a jusante por saturação	36
• Instabilidade por esvaziamento rápido	37

3.4 Modos de Falha do reservatório: 38

- Esvaziamento do reservatório por estribos/encostas do reservatório 38
- Assoreamento do reservatório por sedimentos 39
- Instabilidade de encostas no reservatório e ruptura da barragem 40

3.5 Outros Modos de Falha: 41

- Ruptura do descarregador de fundo e esvaziamento 41
- Falha da cortina de impermeabilização e esvaziamento 42
- Danos no descarregador de fundo por sedimentos 43
- Resposta inadequada a emergências em caso de ruptura da barragem 44
- Conflitos sociais devido à falta de socialização de novos projetos 45
- Desenvolvimento de ocupação urbana no reservatório 46
- Retenção da vazão ecológica 47
- Fissuração da cortina de concreto 48

A seguir, são desenvolvidos os Modos de Falha mais representativos para barragens, detalhando-se os fatores que influenciam o risco de cada Modo de Falha. Tanto os Modos de Falha quanto os fatores estão definidos de forma geral, ou seja, o leitor pode utilizá-los como referência, mas deverá desenvolver seus próprios Modos de Falha ao longo do Workshop, com a participação de todos os integrantes do grupo de trabalho.

Além disso, os fatores estão redigidos de maneira neutra para cada Modo de Falha, de modo que o leitor possa decidir, para seu caso específico, se os fatores aumentam ou reduzem o risco do respectivo Modo de Falha.

Há uma série de fatores que, de alguma forma, influenciam o risco de todos os Modos de Falha. Por esse motivo, e para evitar repetições em cada uma das descrições dos Modos de Falha característicos, esses fatores são apresentados na lista a seguir e não serão repetidos nas tabelas posteriores.

Fatores a considerar em todos os Modos de Falha das barragens:

- Disponibilidade de recursos para realizar os estudos prévios ou de pré-investimento dos projetos de barragens.
- Gestão e preservação das informações dos projetos ao longo dos anos.
- Prazos para a realização dos estudos prévios e elaboração dos projetos de barragens.
- Controle de qualidade e supervisão no projeto e na construção das barragens.
- Experiência da empresa construtora e/ou supervisora na construção de barragens.
- Existência e implementação de Planos de Ação de Emergência.
- Presença de instrumentação e monitoramento das barragens para detecção de problemas.

- Definição de titularidade oficial e responsável legal pelas barragens.
- Existência de planejamento territorial ou fiscalização do uso do solo que regule novos assentamentos que possam surgir a jusante da barragem, de modo a manter controlada a exposição a jusante.

3.1. Modos de Falha hidrológicos

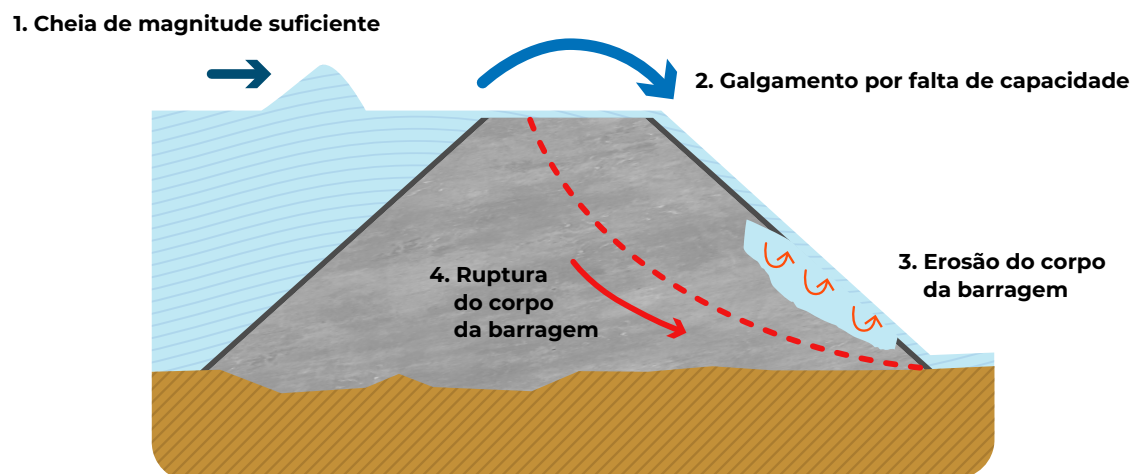
RUPTURA POR GALGAMENTO

Barragem de aterro

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente para ultrapassar a capacidade do vertedouro, resultando no vertimento de água sobre o coroamento da barragem. Esse vertimento provoca erosão no talude a jusante, que evolui para uma escavação e, por fim, para a ruptura da barragem por instabilidade.

Barragem de concreto

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente para ultrapassar a capacidade do vertedouro, elevando o nível do reservatório até alcançar a cota de coroamento, o que dá origem a um evento de galgamento. Esse vertimento causa danos ao pé da barragem, erodindo a área a jusante. A erosão se propaga, escavando o pé da barragem e provocando sua ruptura por tombamento ou deslizamento.



Fatores que influenciam o risco

- Existência de proteção no pé da barragem (no caso de barragens de concreto).
- Qualidade da modelagem hidrológica realizada no projeto.
- Experiência dos projetistas no uso e na calibração dos modelos hidrológicos empregados.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para a verificação do vertedouro.
- Variabilidade climática entre diferentes anos.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas que podem aumentar as vazões previstas.
- Volume de reserva (resguardo) disponível.

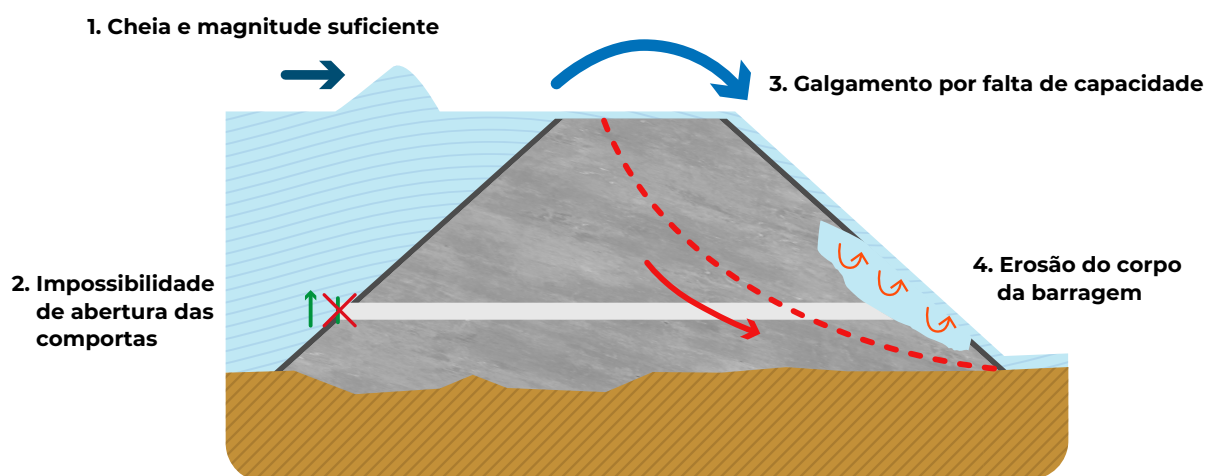
GALGAMENTO POR FALHA NA OPERAÇÃO DAS COMPORTAS

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente que provoca o aumento dos níveis do reservatório. Nessa situação, uma ou várias comportas do vertedouro e/ou da descarga de fundo não podem ser abertas devido a:

- Impacto de troncos ou objetos flutuantes na bandeja de alimentação, causando danos ao sistema de cabos.
- Subida do nível do reservatório acima das comportas, impedindo sua abertura.
- Rompimento da mangueira de óleo em alguma das comportas.
- Acidente viário que danifica o sistema de acionamento de uma ou mais comportas.
- Incêndio na casa de comando.
- Falha na alimentação elétrica das comportas.
- Dificuldade de acesso à área de controle das comportas devido a alagamentos na zona.

Barragem de aterro

Devido à incapacidade hidráulica do vertedouro causada pela impossibilidade de operar as comportas, ocorre vertimento sobre o coroamento de diferentes seções da barragem. Esse vertimento provoca erosão superficial no talude a jusante, na parte construída com aterro, que se intensifica até evoluir para uma erosão generalizada no corpo da barragem e, por fim, em ruptura por instabilidade.



Barragem de concreto

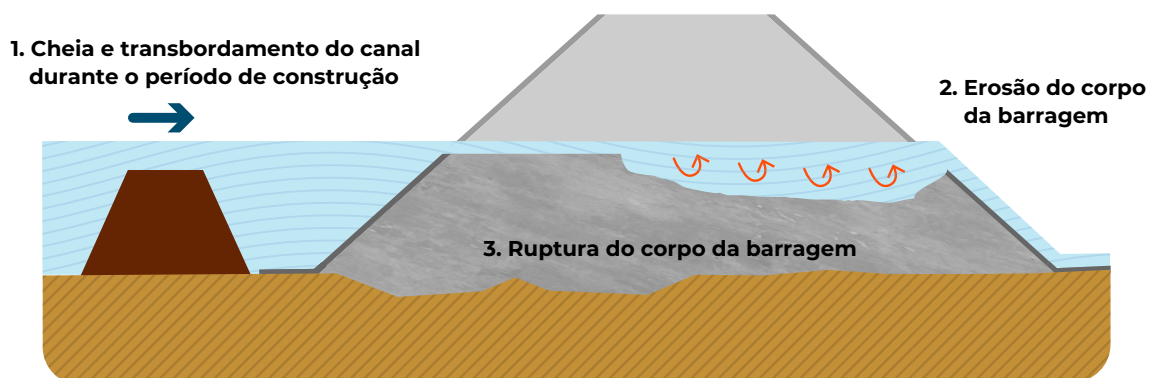
Devido à insuficiência da capacidade hidráulica do vertedouro, causada pela impossibilidade de operar as comportas, ocorre vertimento sobre o coroamento de diferentes partes da barragem. Esse vertimento provoca danos ao pé da barragem, erodindo a zona a jusante. A erosão se intensifica, socavando o pé da estrutura e levando à ruptura final por tombamento ou deslizamento.

Fatores que influenciam o risco

- Existência de assoreamento ou detritos que possam bloquear a comporta.
- Localização da área de controle das comportas.
- Qualidade da modelagem hidrológica realizada no projeto.
- Experiência dos projetistas na utilização e calibração dos modelos hidrológicos empregado.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para verificação do vertedouro.
- Variabilidade climática entre os diferentes anos.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas que podem aumentar as vazões previstas.
- Volume de reserva (resguardo) disponível.

CHEIA DURANTE A CONSTRUÇÃO DA OBRA

Durante a construção de uma barragem de aterro, num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente para que, devido à insuficiência da capacidade hidráulica do canal de desvio das águas, ocorra vertimento sobre o coroamento da barragem em construção. Esse vertimento provoca erosão no corpo da barragem, resultando na falha da estrutura por ruptura do corpo da barragem.



Fatores que influenciam o risco

- Qualidade da modelagem hidrológica realizada no projeto.
- Período de retorno da cheia de projeto para o canal de desvio da barragem.
- Experiência dos projetistas na utilização e calibração dos modelos hidrológicos empregados.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para verificação do vertedouro.
- Variabilidade climática entre os diferentes anos.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas que podem aumentar as vazões previstas.

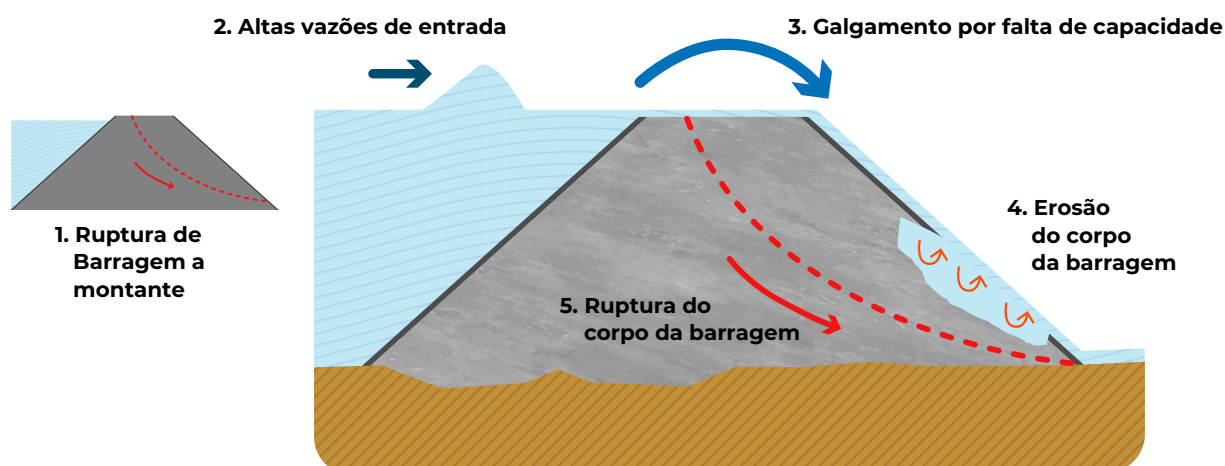
GALGAMENTO POR RUPTURA DE BARRAGEM A MONTANTE

Barragem de aterro

Num cenário hidrológico ou de operação normal, ocorre a ruptura de uma ou mais barragens localizadas na bacia a montante, o que provoca a entrada de um grande volume de água no reservatório. Devido à insuficiência da capacidade hidráulica do vertedouro, ocorre vertimento sobre o coroamento de diferentes seções da barragem. Esse vertimento provoca erosão superficial no talude a jusante, na parte construída com aterro, que se intensifica até evoluir para uma erosão generalizada no corpo da barragem e, por fim, para a ruptura por instabilidade.

Barragem de concreto

Num cenário hidrológico ou de operação normal, ocorre a ruptura de uma ou mais barragens localizadas na bacia a montante, o que provoca a entrada de um grande volume de água no reservatório. Devido à insuficiência da capacidade hidráulica do vertedouro, ocorre vertimento sobre o coroamento de diferentes seções da barragem. Esse vertimento causa danos ao pé da barragem, erodindo a zona a jusante. A erosão se intensifica, socavando o pé da barragem e provocando sua ruptura por tombamento ou deslizamento.



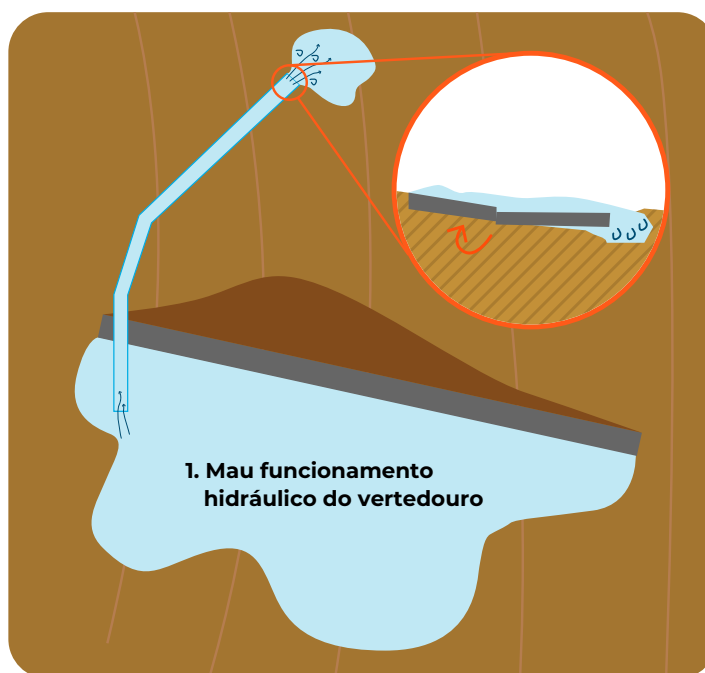
Fatores que influenciam o risco

- Existência de proteção no pé da barragem (no caso de barragens de concreto).
- Qualidade da modelagem hidrológica realizada no projeto.
- Qualidade da fundação (no caso de barragens de concreto).
- Experiência dos projetistas na utilização e calibração dos modelos hidrológicos empregados.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para a verificação do vertedouro.
- Variabilidade climática entre os diferentes anos.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas que podem aumentar as vazões previstas.

CHEIA E MAU FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

Num cenário hidrológico com vertimento prolongado pelo vertedouro, devido à deterioração do concreto e das juntas do vertedouro, bem como ao comportamento hidráulico inadequado, ocorrem processos de cavitação e infiltrações por baixo do vertedouro. Com vazões elevadas, esses processos acabam provocando o levantamento das placas de concreto. A deterioração do vertedouro causa a formação de grandes turbulências e erosão do terreno ao redor da estrutura, tornando necessária uma grande intervenção de reparo.

2. Erosão do pé do vertedouro



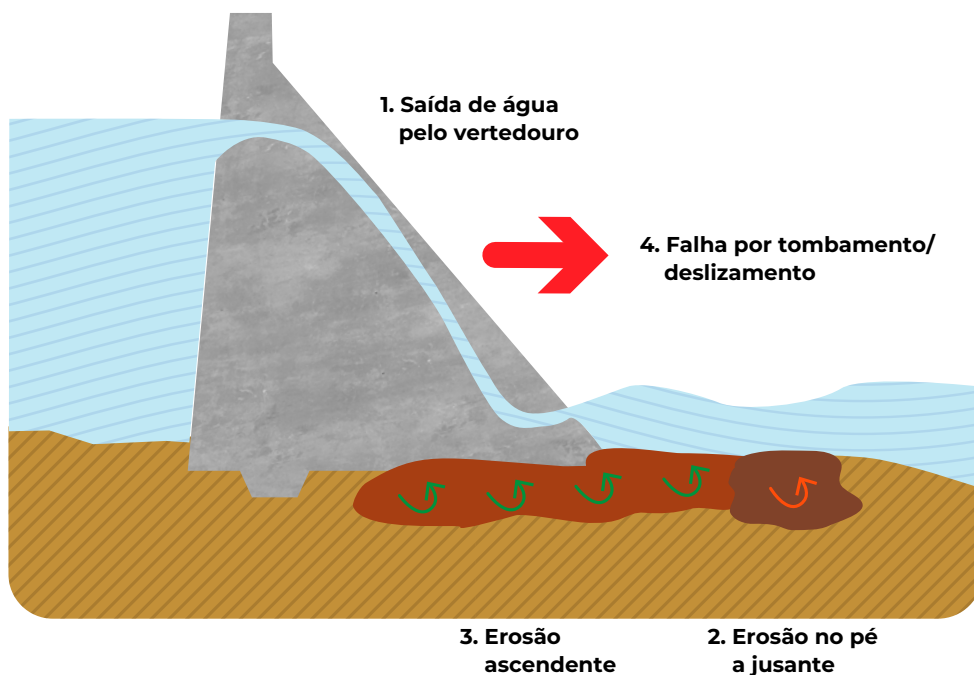
3. Falha ou mau funcionamento do vertedouro

Fatores que influenciam o risco

- Qualidade dos estudos hidráulicos que permitem avaliar o comportamento dos vertedouros e a atenuação das vazões no leito.
- Localização do vertedouro.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para a verificação do vertedouro.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas que podem aumentar as vazões previstas.
- Existência de zonas potencialmente erodíveis ou com funcionamento hidráulico inadequado na saída do vertedouro das barragens.

EROSÃO DO PÉ DO VERTEDOURO E RECALQUE DA BARRAGEM

Num cenário normal, com o vertedouro em operação, o ressalto hidráulico ultrapassa o canal de dissipação por ser demasiado curto. Com o passar do tempo, esse ressalto hidráulico provoca erosão no pé da barragem, causando seu recalque e, por fim, a ruptura da estrutura por tombamento ou deslizamento.



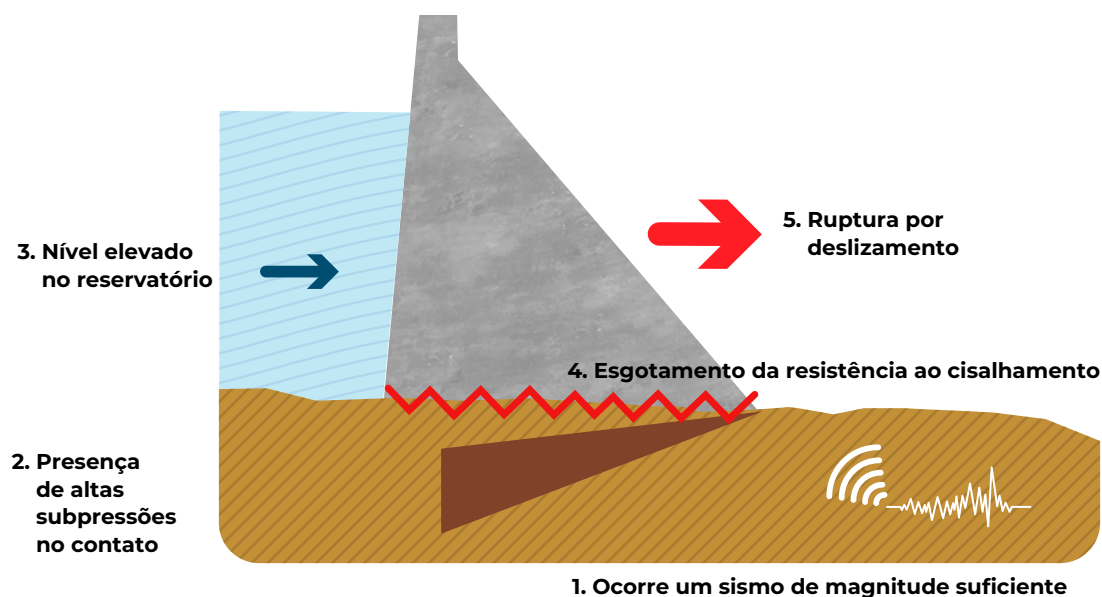
Fatores que influenciam o risco

- Qualidade dos estudos hidráulicos que permitem avaliar o comportamento dos vertedouros e a dissipação das vazões no leito.
- Experiência dos projetistas na utilização e calibração dos modelos hidrológicos empregados.
- Localização do vertedouro.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Período de retorno da cheia de projeto utilizado para a verificação do vertedouro.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Modificações nos órgãos de descarga da barragem durante sua construção.
- Existência de processos de degradação da vegetação nas bacias hidrográficas e/ou mudança no uso do solo que possam aumentar as vazões previstas.

3.2. Modos de Falha geotécnicos – Barragens de concreto

DESLIZAMENTO DA BARRAGEM POR SISMO

Num cenário sísmico, com nível elevado no reservatório, ocorre um sismo de magnitude suficiente que provoca o esgotamento da resistência ao cisalhamento no contato entre a barragem e sua fundação, o que leva à falha da estrutura por deslizamento de alguns de seus blocos.

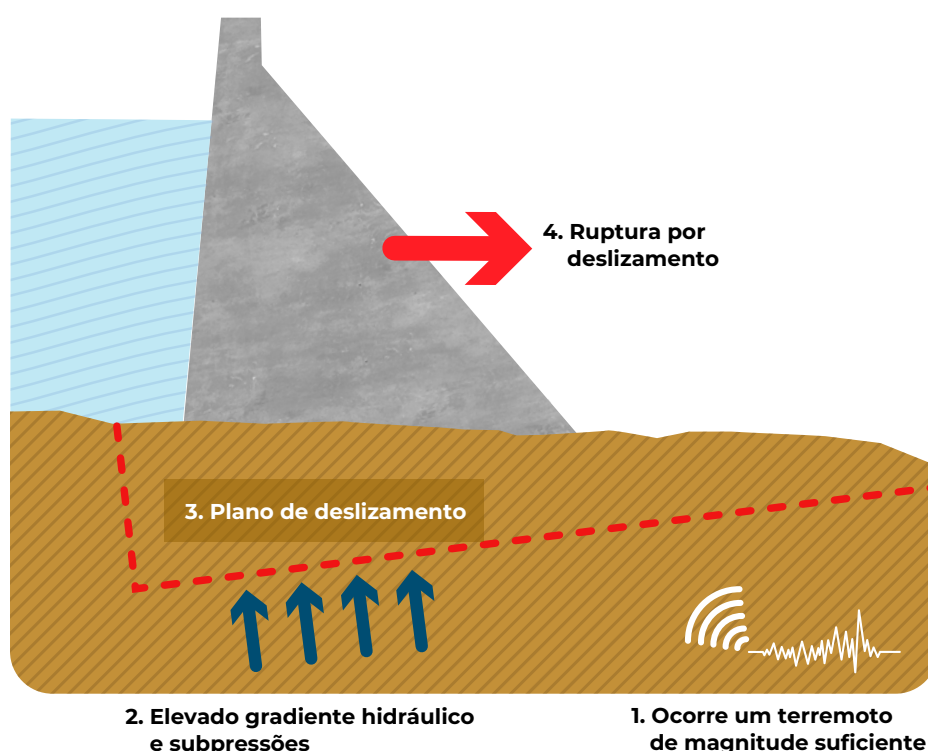


Fatores que influenciam o risco

- Atividade sísmica na região de implantação da barragem.
- Existência de manutenção das barragens.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem, garantindo o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório em caso de detecção de problema na barragem.
- Fatores de segurança calculados contra deslizamentos.
- Disponibilidade de galeria de inspeção.
- Estado do sistema de drenagem.
- Existência de instrumentos de instrumentação e monitoramento que permitam o controle das subpressões.

DESLIZAMENTO DA FUNDAÇÃO POR SISMO

Num cenário sísmico, ocorre um estado de altas subpressões e um gradiente hidráulico elevado na fundação da barragem, causado pela permeabilidade da fundação, pela inexistência ou ineficiência do sistema de drenagem e pelo deterioro da manta impermeável. Esse gradiente provoca a migração de finos da fundação em direção à jusante, comprometendo sua capacidade resistente, o que leva à formação de um plano de deslizamento. A combinação do empuxo da água e das subpressões resulta na falha da barragem por deslizamento ao longo desse plano de instabilidade.

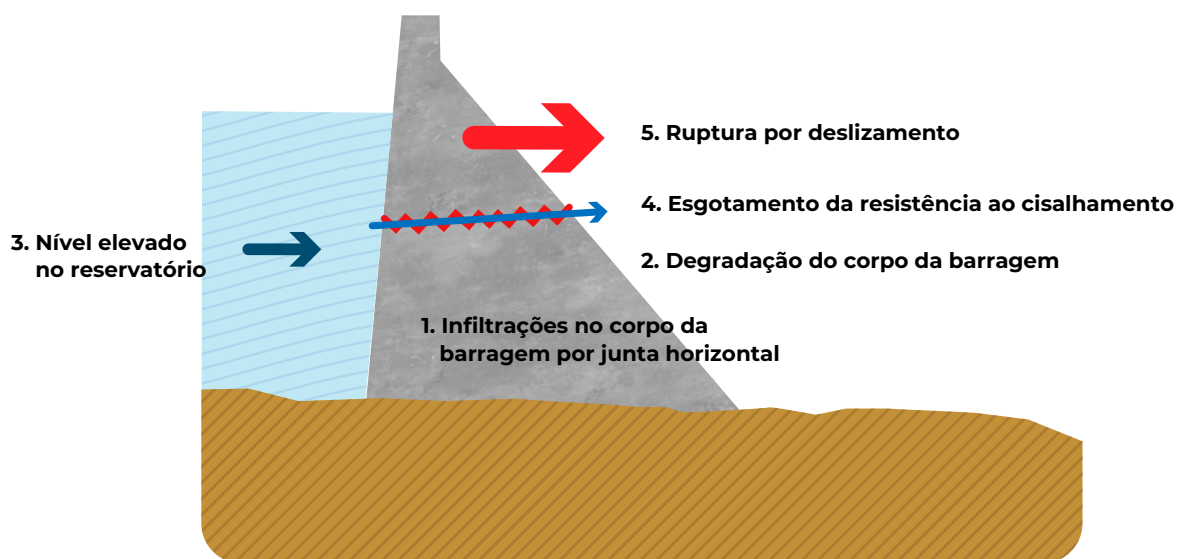


Fatores que influenciam o risco

- Atividade sísmica na região de implantação da barragem.
- Existência de manutenção das barragens e presença de vegetação que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem, garantindo o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório em caso de detecção de problema na barragem.
- Fatores de segurança calculados contra deslizamentos.
- Disponibilidade de galeria de inspeção.
- Estado do sistema de drenagem.
- Existência de sistemas que permitam o controle das subpressões.

DESLIZAMENTO DO CORPO DA BARRAGEM

Num cenário hidrológico ou de operação normal, com nível elevado no reservatório, ocorre uma degradação do corpo da barragem de concreto devido a infiltrações através de alguma junta horizontal ou fissura no concreto. A combinação do empuxo da água com as pressões na fissura leva ao esgotamento da resistência ao cisalhamento no corpo da barragem, o que resulta na falha da estrutura por deslizamento de sua parte superior.

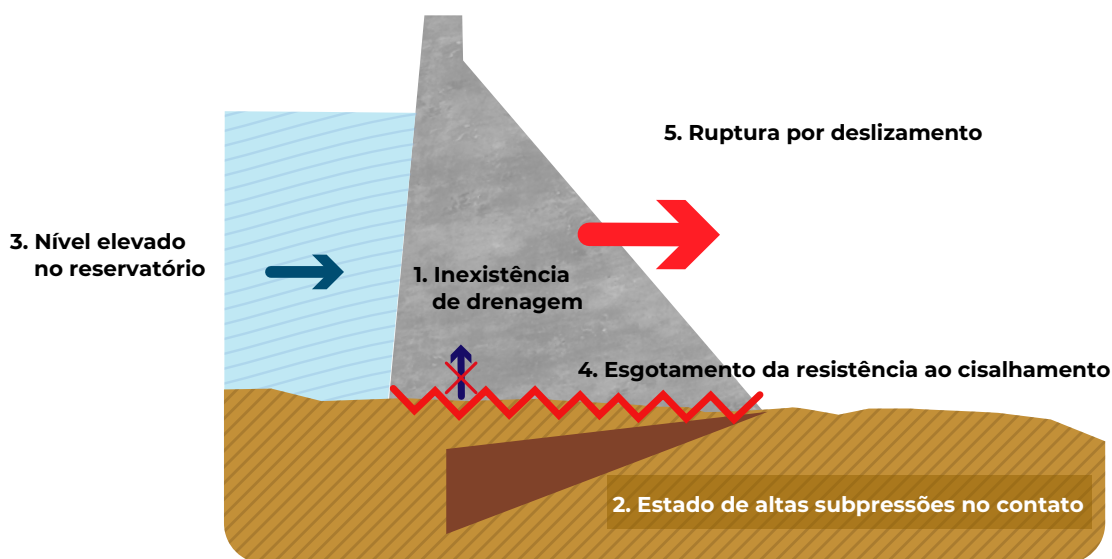


Fatores que influenciam o risco

- Qualidade da concretagem, incluindo a possível segregação dos agregados.
- Existência de juntas horizontais e dissipação do calor durante a cura do concreto.
- Presença de fissuras no concreto.
- Existência de galerias que facilitem o monitoramento da barragem e a drenagem
- Fatores de segurança contra deslizamento.
- Resistência do concreto.

DESLIZAMENTO PRESA-FUNDAÇÃO

Num cenário hidrológico ou de operação normal, com nível elevado no reservatório, ocorre um estado de altas subpressões na fundação da barragem devido à inexistência ou funcionamento inadequado do sistema de drenagem. A combinação do empuxo da água com as subpressões leva ao esgotamento da resistência ao cisalhamento no contato entre a barragem e a fundação, resultando na falha da estrutura por deslizamento de alguns de seus blocos.

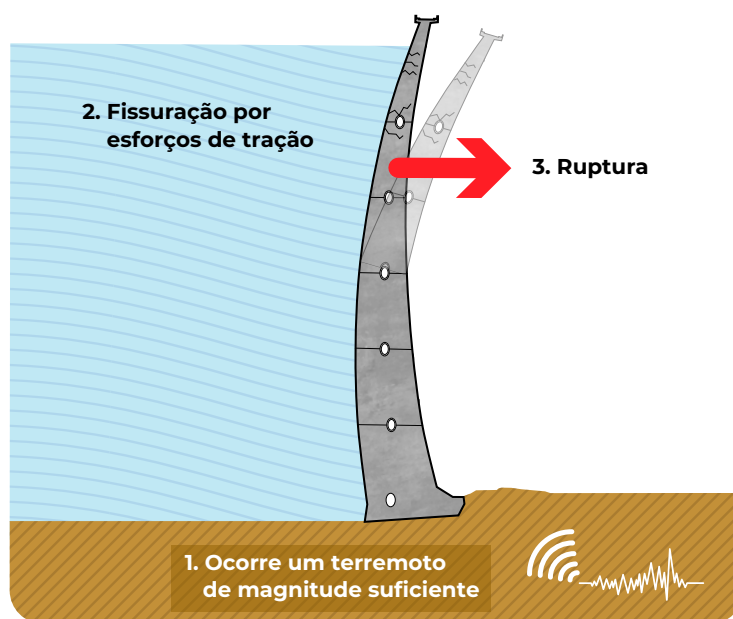


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Qualidade da concretagem, incluindo a possível segregação dos agregados.
- Existência de juntas e dissipação do calor durante a cura do concreto.
- Presença de fissuração no concreto.
- Existência de juntas transversais de contração e separação.
- Existência de galerias que facilitem o monitoramento da barragem e a drenagem da fundação.
- Fatores de segurança previstos no projeto contra deslizamentos e presença de incertezas.
- Existência de sistemas que permitam o controle das subpressões.

RUPTURA DO ARCO SUPERIOR OU FISSURAÇÃO POR SISMO EM BARRAGENS EM ARCO

Num cenário sísmico, ocorre um terremoto de magnitude suficiente que gera esforços de tração excessivos, causando danos no arco superior da barragem. Isso provoca fissuração significativa na estrutura, levando à ruptura do corpo da barragem.

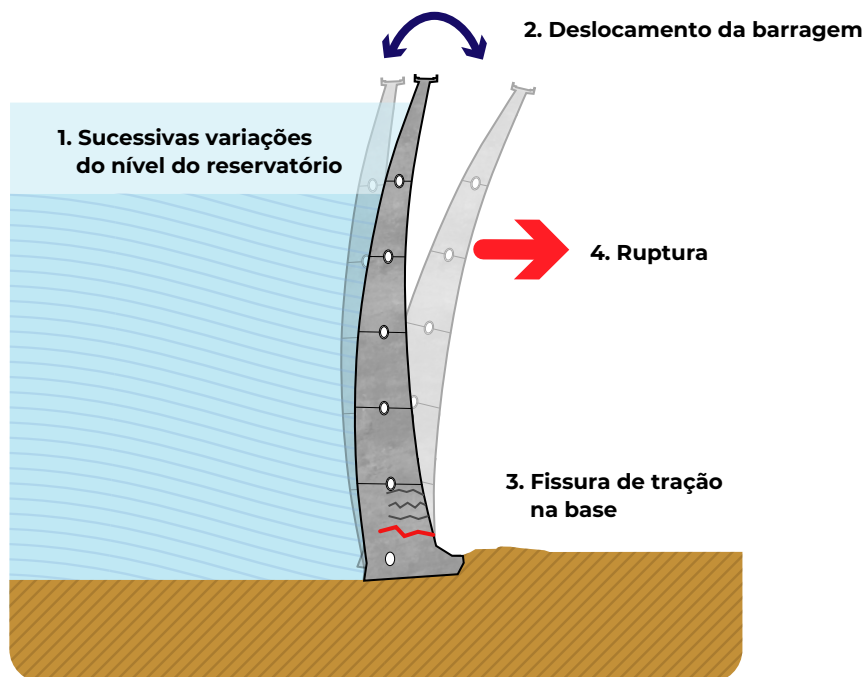


Fatores que influenciam o risco

- Atividade sísmica na região de implantação da barragem.
- Existência de manutenção das barragens e presença de vegetação que possa dificultar a inspeção.
- Frequência das inspeções e monitoramento.
- Conhecimento do comportamento da barragem por meio da medição e controle dos deslocamentos.
- Disponibilidade de galeria de inspeção.
- Fatores de segurança calculados frente a ações sísmicas, considerando o efeito de múltiplos sismos sucessivos sobre a barragem.

RUPTURA POR FISSURA DE TRAÇÃO NA BASE EM BARRAGENS DE ARCO

Num cenário de operação normal, sucessivas variações no nível do reservatório provocam um deslocamento da barragem, que gera uma fissura por tração na base da estrutura. Essa fissura compromete a estabilidade da barragem e conduz à ruptura do corpo da estrutura.

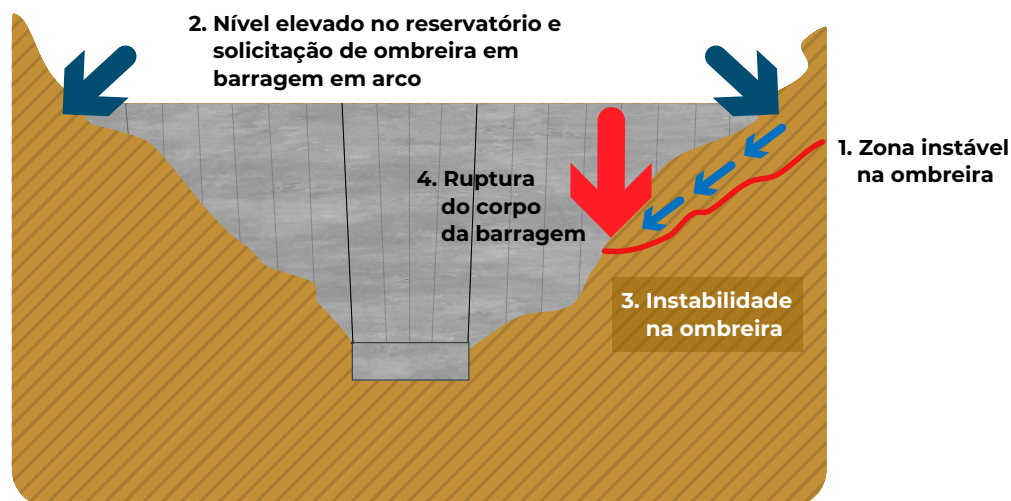


Fatores que influenciam o risco

- Conhecimento do comportamento da barragem por meio da medição e controle dos deslocamentos.
- Existência de muleta a montante que evite o deslocamento da barragem.
- Existência de manutenção das barragens e presença de vegetação que possa dificultar a inspeção.
- Variabilidade do nível do reservatório.
- Existência de barragens a montante que regulem o nível do reservatório.

INESTABILIDADE NA OMBREIRA E RUPTURA DE BARRAGEM EM ARCO

Num cenário hidrológico ou de operação normal, o empuxo exercido pela barragem em arco sobre os estribos, combinado com a presença de um substrato rochoso mais fraco nas ombreiras, provoca o deslizamento de material dessa ombreira em direção ao leito do rio. Esse processo leva à erosão da barragem, comprometendo sua resistência estrutural e resultando na ruptura do corpo da barragem.



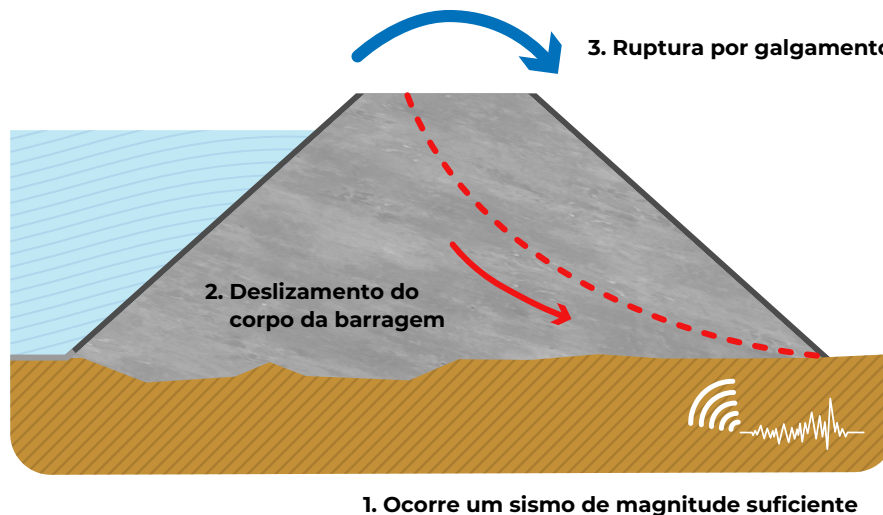
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de ensaios geotécnicos que confirmem que a localização da barragem e a escolha da tipologia em arco são adequadas.
- Existência de infiltrações nas ombreiras.
- Sismicidade da região.

3.3 Modos de Falha geotécnicos – Barragens de terra

INESTABILIDADE POR SISMO

Num cenário sísmico, um terremoto de magnitude suficiente provoca acelerações no terreno e movimentos significativos no corpo da barragem. Esses movimentos causam o esgotamento da resistência ao cisalhamento no corpo da barragem, levando a um deslizamento global e à ruptura por galgamento após o deslizamento.

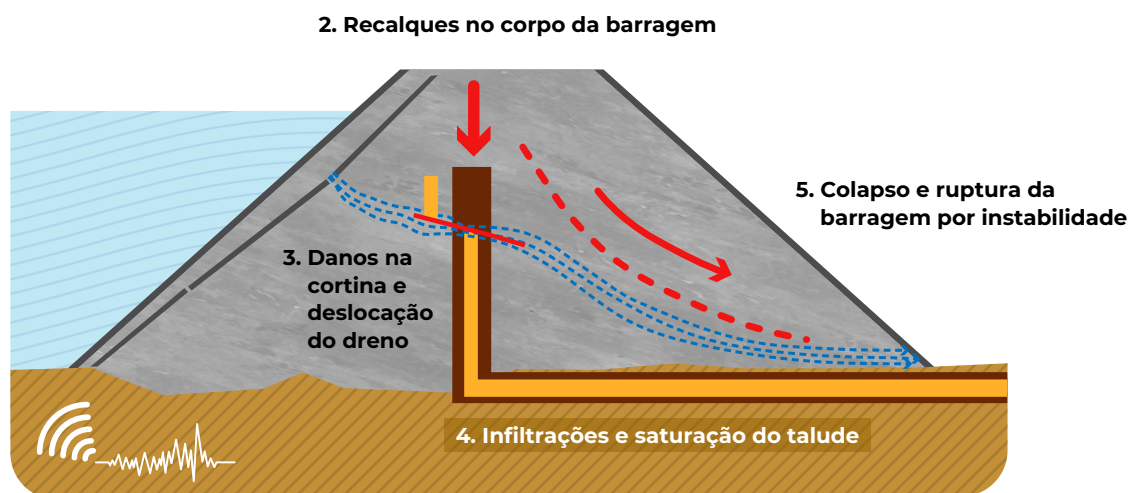


Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas particularmente críticas são os contatos com elementos rígidos (tubulações, túneis, muros etc.) e o contato com a fundação e os estribos.
- Atividade sísmica na região de implantação da barragem.
- Existência de manutenção das barragens e desenvolvimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem, garantindo o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados em filtros e drenos.
- Prazos de construção das barragens, que influenciam a qualidade da compactação dos materiais.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório em caso de detecção de problema na barragem.

INESTABILIDADE POR FALHA DO DRENO APÓS SISMO

Em cenário sísmico, um sismo de magnitude suficiente provoca o recalque do corpo da barragem, danificando a cortina de impermeabilização e suas juntas, e comprometendo a capacidade do dreno devido à sua deslocação. Esses danos na cortina resultam em aumento das infiltrações no corpo da barragem, saturando o talude (devido à ineficiência do dreno) e gerando grande instabilidade do corpo da barragem e sua ruptura



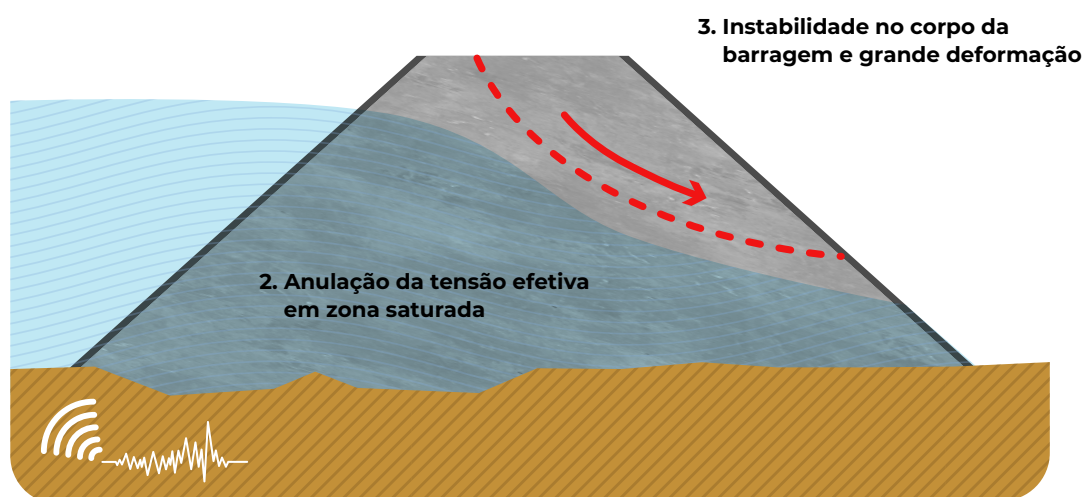
1. Ocorre um sismo de magnitude suficiente

Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas particularmente críticas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e as ombreiras.
- Atividade sísmica da zona de implantação da barragem.
- Existência de manutenção nas barragens e desenvolvimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem, que assegurem o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção das barragens que influenciem a compactação dos materiais.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.

LIQUEFAÇÃO POR SISMO

Em cenário sísmico, um sismo de magnitude suficiente provoca acelerações no terreno e movimentos significativos no corpo da barragem. Esses movimentos anulam a tensão efetiva dos materiais não coesivos da fundação no pé do corpo da barragem, devido à sobrepressão dinâmica gerada nas pressões intersticiais. Isso resulta na liquefação desses materiais não coesivos no pé da barragem e em uma instabilidade significativa nessa zona, levando à ruptura por sobrecarga após a instabilidade.



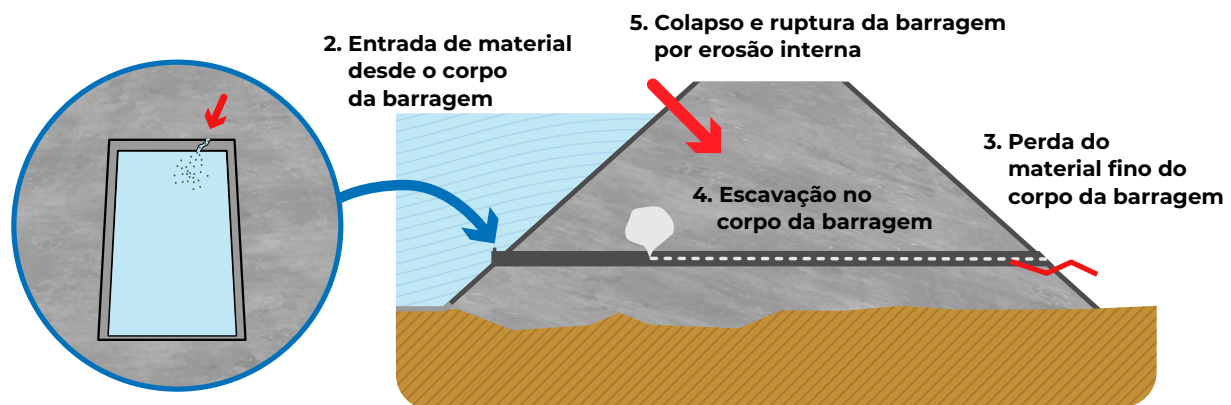
1. Ocorre um sismo de magnitude suficiente

Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os encontros.
- Atividade sísmica da zona de implantação da barragem.
- Existência de manutenção das barragens e desenvolvimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informação de base sobre os materiais utilizados na barragem, que assegure o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Prazos para a construção de barragens que influenciam a compactação dos materiais.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso se detecte um problema na barragem.

EROSÃO INTERNA ATRAVÉS DE CONDUTO

Em cenário de operação normal, ocorre uma fissura no descarregador de fundo pela qual penetra material do corpo da barragem. Essa entrada de material provoca o arraste de material para jusante. Esse arraste progride, formando uma cavidade no corpo da barragem, resultando em instabilidades no talude em forma de abatimentos que, por fim, levam à ruptura por erosão interna da barragem.



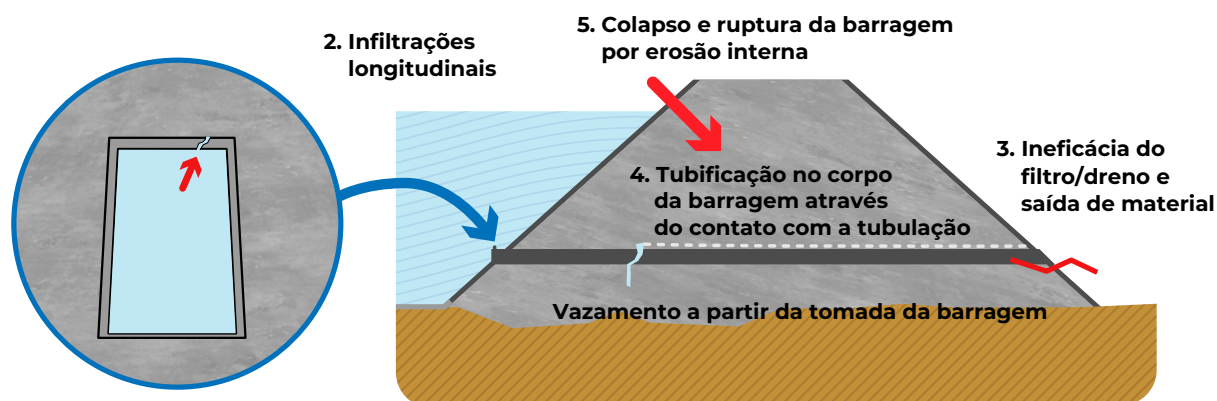
1. Fissura no descarregador de fundo

Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem e, especialmente, dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas particularmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os estribos.
- Substituição de materiais pétreos para os filtros das barragens por geotêxteis, com menor durabilidade e eficiência menos comprovada.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem, que assegurem o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção das barragens que influenciem na compactação dos materiais.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.

EROSÃO INTERNA POR VAZAMENTO NA OBRA DE TOMADA/DESCARGA DE FUNDO

Em cenário de operação normal, ocorre um vazamento na tubulação de tomada ou infiltrações no descarregador de fundo que conseguem alcançar o corpo da barragem. Essas infiltrações, juntamente com o funcionamento inadequado do filtro, provocam o arraste de material para jusante. Esse arraste progride formando tubificações, que resultam em instabilidades no talude em forma de subsidências que, por fim, levam à ruptura da barragem.



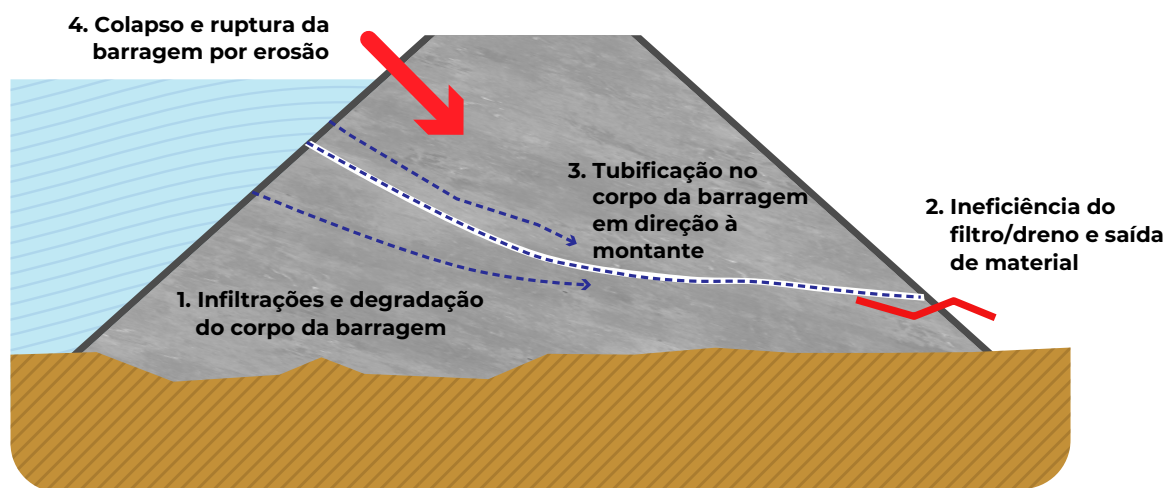
1. Vazamento a partir da tomada da barragem

Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas particularmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os contrafortes.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem que garantam o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção das barragens que influenciam a compactação dos materiais.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.
- Frequência das inspeções dos condutos.

EROSÃO INTERNA NO CORPO DA BARRAGEM DE TERRA

Num cenário de operação normal, existe uma rede de infiltrações com um gradiente hidráulico suficiente para originar uma filtragem com arraste de material, sem que um filtro impeça esse arraste. O fenómeno progride e se origina uma erosão regressiva em direção ao talude a montante por um processo de tubificação, provocando a lavagem do material mais fino, o que resulta em instabilidades do talude na forma de rebaixamentos que, por fim, levam à ruptura da barragem.

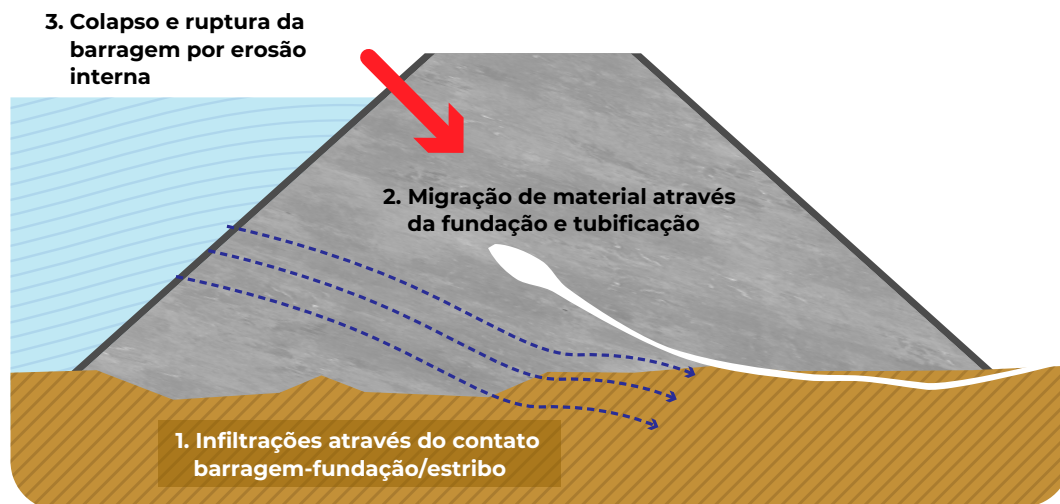


Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os estribos.
- Existência de manutenção das barragens e crescimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem que assegurem o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção de barragens que influenciem a compactação dos materiais.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.

EROSÃO INTERNA DA BARRAGEM PARA A FUNDAÇÃO

Em cenário de operação normal, ocorrem infiltrações do corpo da barragem para a fundação/estribos devido à presença de zonas com maior permeabilidade. Devido ao funcionamento inadequado do filtro, ocorre o arraste de material, formando tubificações que acabam levando à ruptura da barragem por uma combinação de mecanismos de instabilidade do talude jusante e erosão interna.



Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem e especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os estribos.
- Existência de manutenção das barragens e desenvolvimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais utilizados na barragem que assegurem o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção de barragens que influenciem na compactação dos materiais.
- Existência de descarga de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.

EROSÃO INTERNA NA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

Em cenário de operação normal, ao longo do tempo ocorre uma degradação da fundação devido à passagem do fluxo de água. Com um nível elevado do reservatório, aumentam as infiltrações e o arraste de material através da fundação, com saída para jusante. Esse arraste progride formando tubificações que acabam levando à formação de uma grande cavidade na fundação que, ao colapsar, provoca um grande recalque no corpo da barragem e sua ruptura por sobrecarga.

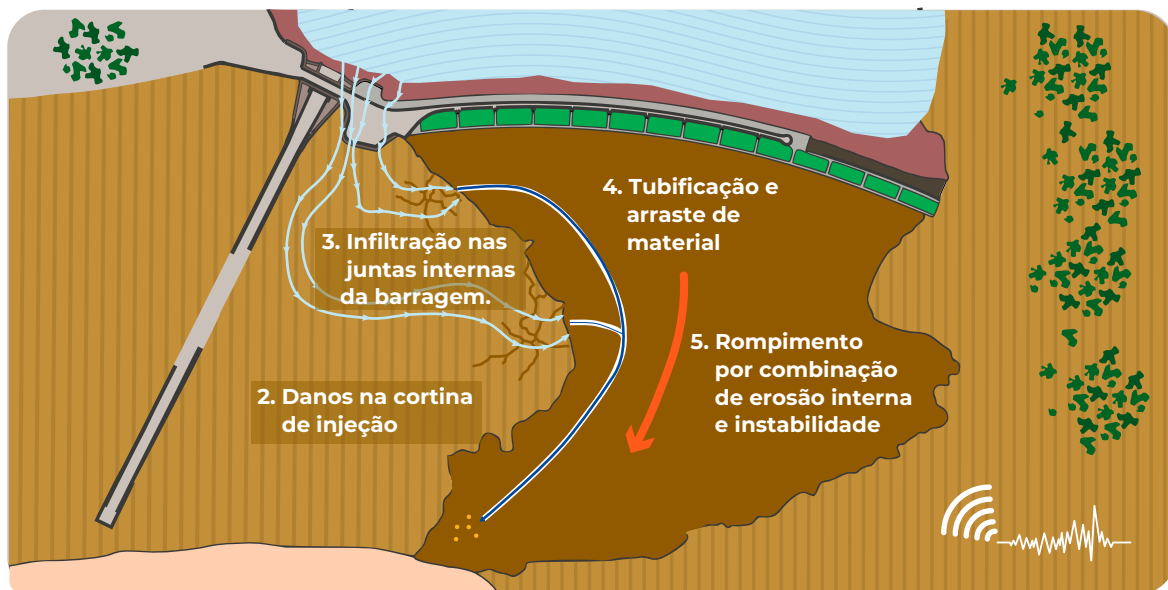


Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem e, especialmente, dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os encontros.
- Existência de manutenção das barragens e desenvolvimento de vegetação que possa dificultar a inspeção.
- Informações básicas sobre os materiais empregados na barragem, que assegurem o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção de barragens que influenciem a compactação dos materiais.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso se detecte um problema na barragem.
- Impermeabilização da fundação.

ROMPIMENTO POR EROSÃO INTERNA A PARTIR DOS ENCONTROS APÓS SISMO

Em cenário sísmico, ocorre um sismo de magnitude suficiente que gera danos na cortina de injeção dos encontros. Esses danos reduzem a capacidade da cortina de vedar as possíveis vias de infiltração nos encontros, permitindo que a água se infiltre através do corpo da barragem e provoque erosão interna. Essa erosão interna progride, comprometendo a estabilidade estrutural da barragem, que finalmente falha por uma combinação de mecanismos de instabilidade do talude a jusante e erosão interna.



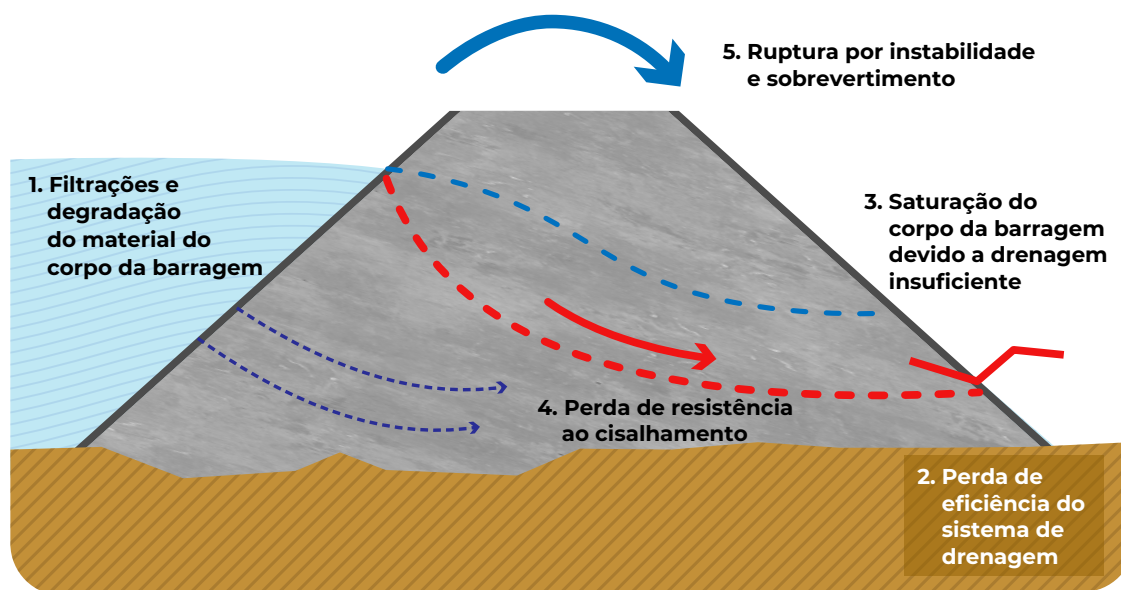
1. Ocorre um sismo de magnitude suficiente

Fatores que influenciam o risco

- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os encontros.
- Existência de manutenção das barragens e desenvolvimento vegetativo que possa dificultar a inspeção.
- Informação de base sobre os materiais empregados na barragem, que assegure o uso de materiais adequados.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Prazos para a construção de barragens que influenciem na compactação dos materiais.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso se detecte um problema na barragem.
- Impermeabilização da fundação.

INSTABILIDADE À JUSANTE POR SATURAÇÃO

Em cenário de operação normal, devido ao mau funcionamento dos filtros/drenos, ocorre uma saturação do corpo da barragem. Essa saturação leva à diminuição dos parâmetros resistentes do corpo, provocando a formação de uma superfície instável e o deslizamento global do talude a jusante, o que resulta na ruptura da barragem.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas particularmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os maciços laterais.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem.

INESTABILIDADE POR ESGOTAMENTO RÁPIDO DO RESERVATÓRIO

Em cenário de operação normal, ocorre uma descida rápida do nível do reservatório, o que impede a dissipação das pressões intersticiais no corpo da barragem de aterro. Isso gera a formação de uma superfície instável no corpo da barragem e um deslizamento global do talude a montante, levando à ruptura da barragem.



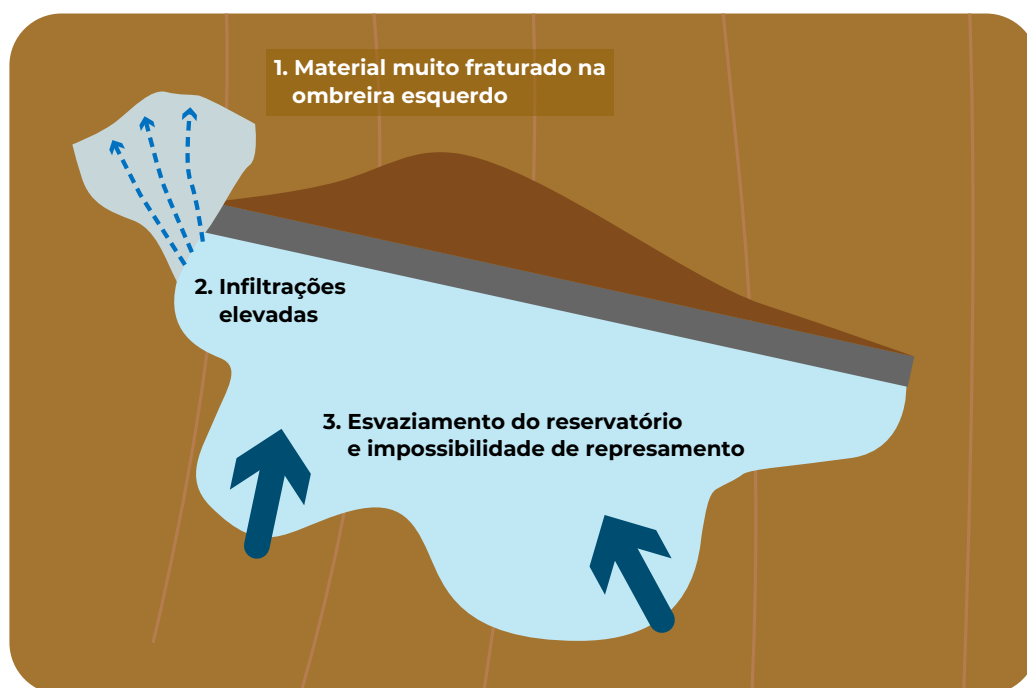
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Processo de compactação dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os estribos.
- Materiais utilizados para filtros e drenos.
- Existência de descarregador de fundo que permita o esvaziamento do reservatório caso seja detectado um problema na barragem

3.4. Modos de Falha do Reservatório

ESVAZIAMENTO DO RESERVATÓRIO POR OMBREIRAS/ENCOSTAS DO RESERVATÓRIO

Após a construção da barragem e o início do enchimento do reservatório, detecta-se um estrato especialmente permeável nas encostas do reservatório que provoca infiltrações, ou estas infiltrações são geradas devido à elevada meteorização dos estribos. Essas infiltrações são de magnitude suficiente para inviabilizar o enchimento do reservatório, provocando seu esvaziamento.

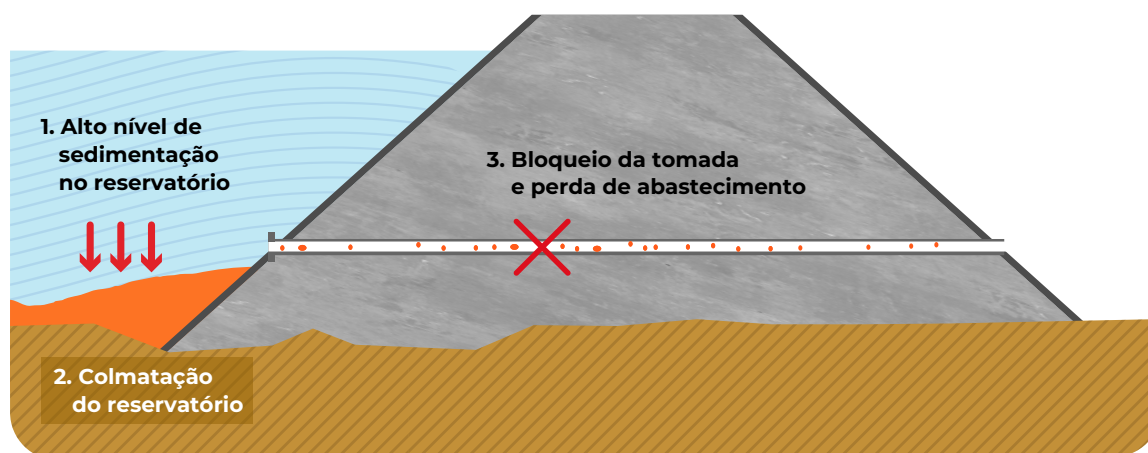


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de estudos sobre caracterização granulométrica dos solos no reservatório e sobre os potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Disponibilidade de estudos geológicos (presença de falhas).

ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO POR SEDIMENTOS

Em cenário de operação normal, ocorre um aumento da erosão de material na bacia a montante e dos processos de sedimentação no reservatório, reduzindo seu volume. Com o tempo, o nível de sedimentos no reservatório é suficiente para alcançar a tubulação de tomada, provocando a entrada de sedimentos nas tubulações, bloqueando-as e impedindo, por fim, o abastecimento de água a partir do reservatório.

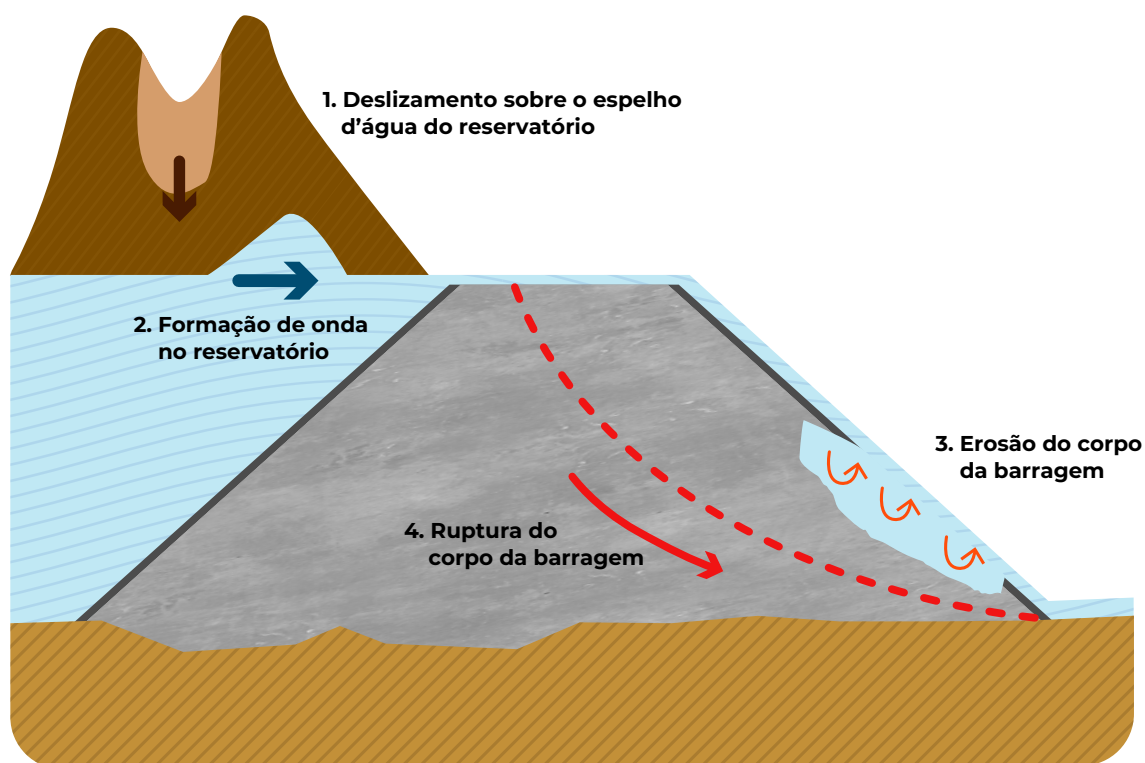


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de estudos sobre caracterização granulométrica dos solos no reservatório e dos potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Prazos suficientes para a realização dos estudos de sedimentação.
- Experiência no dimensionamento e utilização dos descarregadores de fundo para a limpeza de sedimentos.
- Gestão e reflorestamento da bacia a montante durante o projeto, a construção e a operação da barragem.
- Presença de especialistas em processos de sedimentação de reservatórios.
- Previsão do volume morto do reservatório e da sua vida útil.
- Reflorestamento da bacia a montante com espécies autóctones ou exóticas, o que pode acarretar impactos ambientais significativos.
- Influência das alterações climáticas e da desertificação nos processos de erosão nas bacias.
- Inclusão de planos de contingência ambiental no projeto.

INSTABILIDADE DE ENCOSTAS NO RESERVATÓRIO E RUPTURA DA BARRAGEM

Em cenário sísmico ou de operação normal, ocorre o deslizamento de um grande volume de terra nas encostas que circundam o reservatório. Esse deslizamento, ao atingir o reservatório, gera uma onda de magnitude suficiente para causar o sobrevertimento da crista da barragem, danificando os taludes da estrutura e até provocando sua ruptura, com consequências significativas nas áreas urbanas a jusante.



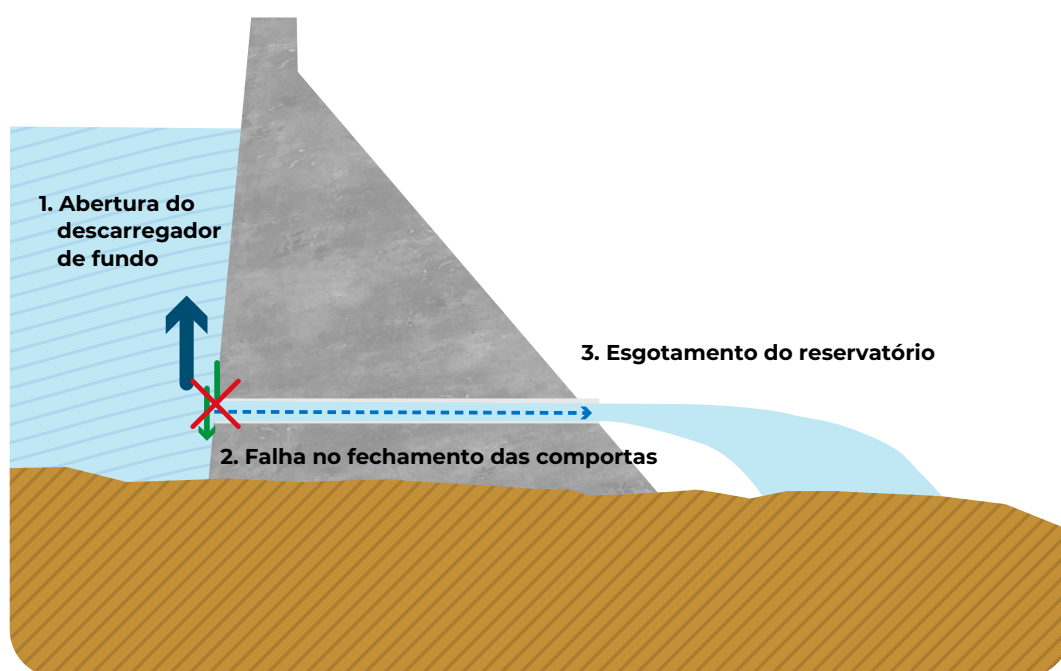
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de estudos sobre a caracterização granulométrica dos solos no reservatório e os potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Resguardo disponível.
- Disponibilidade de estudos geotécnicos da bacia do reservatório (identificação de falhas e/ou possíveis zonas suscetíveis a deslizamentos).
- Capacidade dos órgãos de descarga que permitam o esvaziamento preventivo diante de possíveis movimentos de encostas no reservatório.
- Monitoramento e vigilância de zonas instáveis do reservatório.

3.5. Outros Modos de Falha

RUPTURA DE DESCARREGADOR DE FUNDO E ESGOTAMENTO DO RESERVATÓRIO

Em cenário de operação normal, torna-se necessário abrir o descarregador de fundo para limpar os sedimentos ou garantir as vazões ecológicas a jusante. Ao tentar fechar o descarregador, ocorre uma falha no fechamento da comporta devido à presença de algum material arrastado que o impede ou por um problema mecânico ou elétrico, levando à impossibilidade de fechamento da descarga e ao esvaziamento do reservatório, com consequentes impactos econômicos pela perda dessa água.

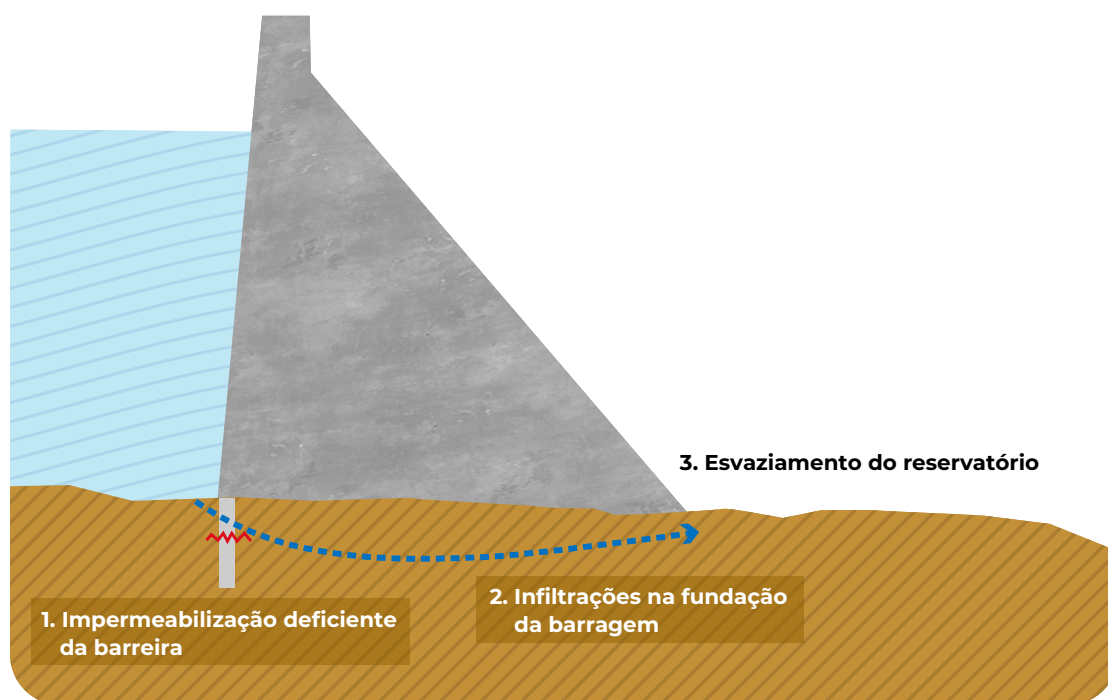


Fatores que influenciam o risco

- Existência de atividades de manutenção das barragens e de suas válvulas.
- Existência de sistemas que evitem a entrada de sólidos grandes no descarregador de fundo.
- Número de comportas do descarregador de fundo e existência de sistema de fechamento de emergência a montante.
- Disponibilidade de memória de cálculo e projeto das comportas, garantindo que resistam às solicitações durante a operação.
- Substituição das comportas previstas no projeto por outras durante a construção.
- Operação periódica do descarregador de fundo para limpeza de sedimentos e garantir seu correto funcionamento.

FALHA DA BARREIRA DE IMPERMEABILIZAÇÃO E Esvaziamento

Em cenário de operação normal do reservatório, devido a uma falha na barreira de impermeabilização, ocorrem infiltrações pela fundação, resultando no esvaziamento do reservatório e nas consequentes perdas econômicas pela perda dessa água.

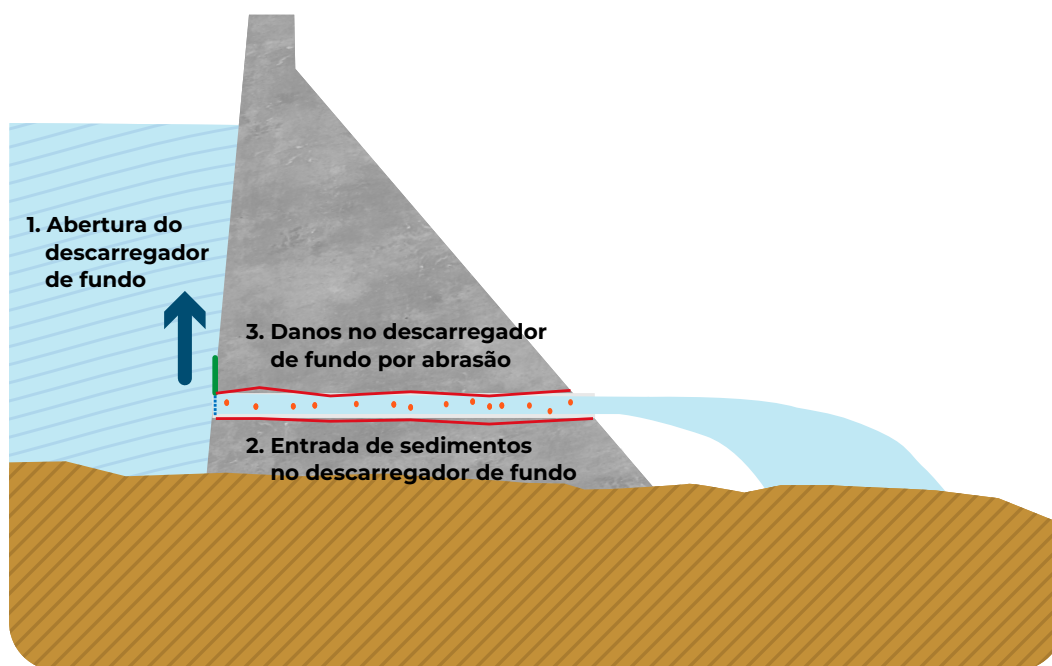


Fatores que influenciam o risco

- Existência de campanhas de injeções para impermeabilização do terreno.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Disponibilidade de piezômetros e galeria de inspeção.
- Frequência do registro de dados (monitoramento).
- Frequência das inspeções visuais.

DANOS NO DESCARREGADOR DE FUNDO POR SEDIMENTOS

Em cenário de operação normal, torna-se necessário abrir o descarregador de fundo para remover os sedimentos ou garantir as vazões ecológicas a jusante. No entanto, esses sedimentos podem danificar o conduto do descarregador de fundo por abrasão, inutilizando seu uso durante o período de reparo ou podendo afetar outros elementos se não for detectado a tempo.

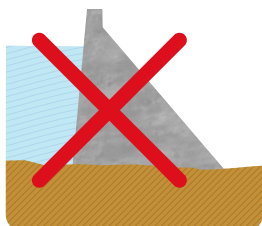


Fatores que influenciam o risco

- Existência de sistemas que evitem a entrada de sólidos de grande porte no descarregador de fundo.
- Frequência de operação do descarregador de fundo.

ROMPIMENTO DE BARRAGEM – RESPOSTA INADEQUADA EM CASOS DE EMERGÊNCIA

Em cenário hidrológico, sísmico ou de operação normal, ocorre o rompimento da barragem causado por um grave problema de segurança. Devido a falhas na comunicação dos alertas e/ou à inexistência de procedimentos eficazes de aviso e evacuação da população, os alertas não são emitidos corretamente e a população não abandona as áreas afetadas antes da inundação, aumentando significativamente as consequências sociais do rompimento da barragem.



1. Rompimento de barragens a montante

2. Falha na emissão dos avisos e/ou mau funcionamento dos procedimentos



3. Falta de evacuação/proteção da população nas zonas de inundação

Fatores que influenciam o risco

- Campanhas de informação e sensibilização da comunidade sobre a importância e os riscos de um projeto de barragem localizado a montante.
- Existência de manutenção e realização de testes dos sistemas de aviso à população.
- Grau de preparação dos organismos responsáveis pela gestão de emergências.
- Comunicação entre os responsáveis pela operação da barragem e os organismos de gestão de emergências.

CONFLITOS SOCIAIS POR FALTA DE SOCIALIZAÇÃO DE NOVOS PROJETOS

Durante a construção das obras e devido à incorreta socialização das mesmas, especialmente junto à população próxima ao reservatório e aos futuros beneficiários, surgem conflitos sociais crescentes. Estes conflitos resultam na rejeição ao projeto da barragem e em bloqueios durante a execução das obras, comprometendo o êxito do projeto desenvolvido.

1. Conflitos sociais devido à má socialização das obras



2. Bloqueios e furtos durante a construção das obras



Fatores que influenciam o risco

- Acompanhamento social nas fases de pré-investimento, de projeto e de construção, de modo que os beneficiários conheçam o projeto.
- Disponibilidade de vigilância durante a construção para evitar furtos.

DESENVOLVIMENTO DE OCUPAÇÕES URBANAS NO RESERVATÓRIO

Após a construção da barragem e o enchimento do reservatório, desenvolvem-se habitações e atividades comerciais e turísticas ao redor do reservatório devido à disponibilidade de água. Esse desenvolvimento provoca a contaminação da água do reservatório e a degradação da bacia a montante, afetando a qualidade da água e seu uso, assim como a resposta hidrológica da bacia.

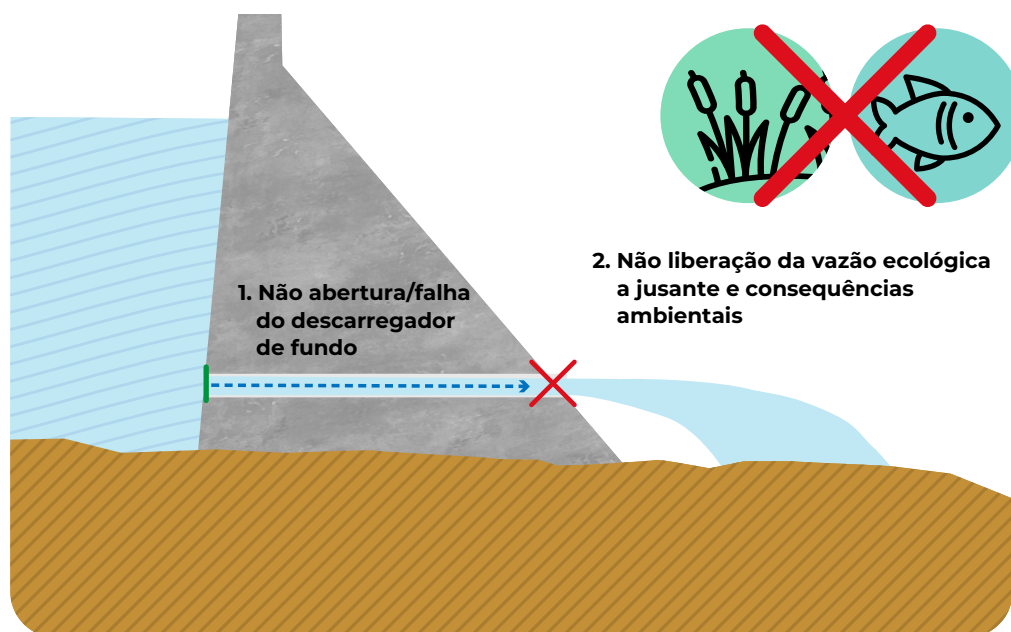


Fatores que influenciam o risco

- Existência de uma faixa de proteção para evitar o desenvolvimento urbano ao redor do reservatório.
- Acompanhamento social nas fases de pré-investimento, projeto e construção, de forma que os beneficiários conheçam o projeto.
- Campanhas de informação e sensibilização da comunidade sobre a importância de manter a bacia a montante em boas condições.
- Capacidades das comunidades que posteriormente serão responsáveis pelo funcionamento do projeto, o que afeta sua sustentabilidade.
- Infraestrutura de saneamento urbano em conjunto com o desenvolvimento de habitações.

RETENÇÃO DA VAZÃO ECOLÓGICA

Em cenário de operação normal, devido a um problema em alguma das válvulas ou comportas das tomadas e descargas, ou devido às reticências da população beneficiária, não se fornece a vazão ecológica ao leito a jusante, o que provoca consequências ambientais significativas sobre a fauna e a flora do rio.

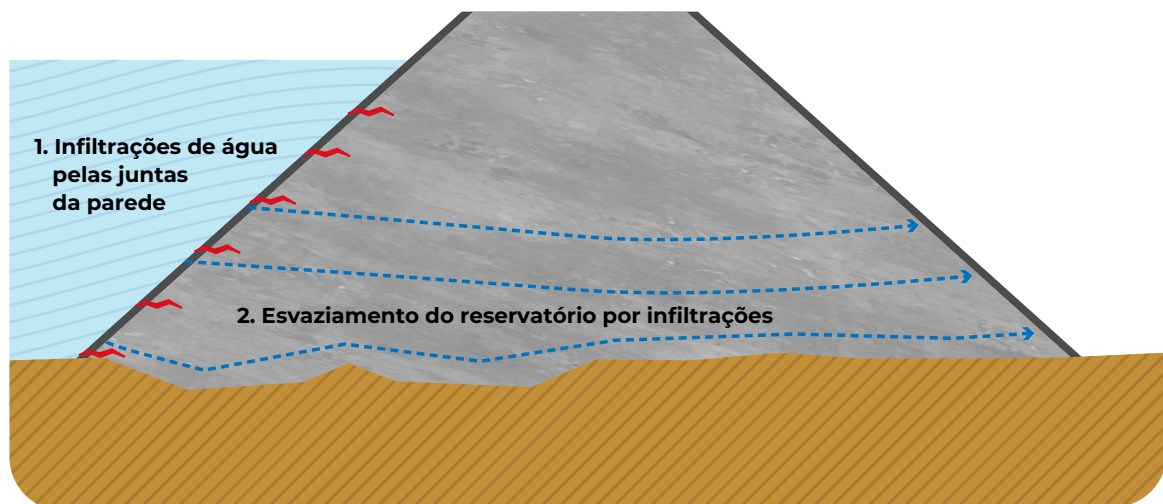


Fatores que influenciam o risco

- Campanhas de informação e sensibilização da comunidade sobre a importância da vazão ecológica.
- Disponibilidade de uma análise da vazão ecológica necessária ao longo do ano, e não apenas de um percentual fixo.
- Existência de planos de contingência ambiental no projeto.
- Existência de manutenção das comportas dos órgãos de descarga.

FISSURAMENTO DA PAREDE DE CONCRETO

Em cenário de operação normal, devido à falha das juntas das paredes ou ao fissuramento da parede, ocorrem infiltrações através do corpo da barragem ou da fundação (dependendo de qual junta falhou). Essas infiltrações são elevadas e acabam provocando o esvaziamento do reservatório.



Fatores que influenciam o risco

- Existência de manutenção da parede de impermeabilização.
- Existência de instrumentação de auscultação.
- Frequência das inspeções visuais.
- Existência de galeria de inspeção para observação de infiltrações.
- Tipologia da barragem de aterro.

4. Relação de estudos técnico-científicos

Neste item, são mencionados diversos estudos técnico-científicos, de acordo com a tipologia dos Modos de Falha, que devem ser considerados para reduzir o risco desses modos e diminuir a incerteza no aprimoramento do projeto das infraestruturas.

MODO DE FALHA HIDROLÓGICO

- Recolher dados meteorológicos.
- Considerar eventos extremos incorporando os efeitos das mudanças climáticas.
- Realizar uma modelação hidrológica de qualidade e calibração do modelo.
- Considerar as atividades da bacia que possam influenciar a barragem.
- Plano de gestão da bacia.
- Plano de Ação de Emergência.

MODO DE FALHA GEOTÉCNICO

- Estudo estrutural da estabilidade da barragem para situações estática e dinâmica.
- Estudo geológico e geotécnico da fundação.
- Estudo geológico e geotécnico do material que compõe a barragem.
- Estudo de ameaça sísmica.

5. Recomendações e boas práticas

A seguir, apresentam-se uma série de recomendações e boas práticas de intervenção, organizadas segundo as tipologias de Modos de Falha identificadas.

MODO DE FALHA HIDROLÓGICA

Para reduzir o risco associado aos Modos de Falha de origem hidrológica, recomenda-se considerar os seguintes aspectos:

- **Determinação de cheias previstas:** Elaborar hidrogramas representativos das cheias afluentes ao reservatório, incluindo sua caracterização estatística e as probabilidades de ocorrência. Devem ser analisadas as cheias históricas registradas, considerando-se também o conhecimento disponível sobre possíveis mudanças a longo prazo nas condições hidrológicas da bacia, incluindo os efeitos das mudanças climáticas. Também será analisada a influência das vazões liberadas por reservatórios situados a montante, e justificada a confiabilidade das metodologias utilizadas na estimativa dessas cheias.
- **Segurança hidrológica do sistema barragem-reservatório:** Esta deve ser definida em termos de período de retorno (ou sua inversa, a probabilidade anual de excedência) associado a diferentes níveis do reservatório, sendo definidos os resguardos correspondentes, que poderão ter caráter sazonal.
- **Dimensionamento do sistema de desvio do rio:** Durante a fase de construção da barragem, deve-se definir uma cheia de projeto específica para o sistema de desvio, levando em conta os riscos aceitáveis durante a execução das obras.
- **Sobre-elevação por ação do vento:** Em barragens de aterro, deve-se considerar a sobre-elevação máxima gerada pelo vento, não sendo permitidos vertimentos sobre a crista da barragem, salvo se especificamente projetados para isso. Em barragens de concreto, apenas serão admitidos vertimentos acidentais sobre a crista devido à ação do vento, devendo ser demonstrado que tais eventos não comprometem a segurança da barragem.
- **Dimensionamento dos órgãos de descarga:** Os órgãos de descarga devem ser dimensionados com base nas cheias selecionadas e nos resguardos definidos. Deve-se comprovar que seu funcionamento em condições extremas não compromete a segurança da barragem. As descargas intermediárias e de fundo devem permitir o controle do nível do reservatório, especialmente durante o primeiro enchimento.
- **Confiabilidade dos elementos de controle:** Os sistemas de controle dos órgãos de descarga devem ser projetados para garantir seu funcionamento em qualquer situação, incluindo cheias extremas. Devem dispor de sistemas de acionamento redundantes, fontes de energia independentes, acessos garantidos e controlados, além de alta confiabilidade operacional.
- **Os gabaritos e a luz entre pilares dos vãos dos vertedouros de superfície** devem ser projetados para permitir a passagem de elementos flutuantes que possam chegar ao reservatório durante as cheias.

- Vertedouros controlados exclusivamente por comportas devem possuir, no mínimo, dois vãos. Os descarregadores de fundo devem contar, no mínimo, com dois condutos, cada um equipado com pelo menos dois elementos de fechamento instalados em série, passíveis de serem tamponados na extremidade a montante, em caso de necessidade.
- Não será permitido o uso de condutos de descarga sob pressão atravessando o corpo de uma barragem de aterro, a menos que estejam localizados no interior de galerias que os isolem do contato direto com o material da barragem ou, caso a fundação permita e seja devidamente justificado, em valas escavadas sob o corpo da barragem, devidamente projetadas, escavadas e posteriormente concretadas.
- De acordo com recomendações internacionais, as barragens não devem ser superadas por cheias com períodos de retorno inferiores a 5.000–10.000 anos. No caso de barragens de terra, deve-se não apenas considerar a cheia com período de retorno de 10.000 anos, mas também garantir um resguardo equivalente à altura da onda de vento nessa situação próxima ao galgamento.
- Segundo recomendações internacionais, as barragens e seus órgãos de descarga devem operar corretamente para cheias com período de retorno de 1.000 anos.
- No caso de haver escassez de dados pluviométricos no país, devido à baixa densidade da rede de estações meteorológicas e à alta variabilidade geográfica da precipitação, deverão ser realizados os ajustes e análises pertinentes nas séries históricas.
- Caso a rede de medição de vazões seja pouco densa, poderá ser avaliada a instalação de estações adicionais de medição de vazão para o projeto.
- Deve-se prever uma estação meteorológica na barragem que permita a coleta de dados de precipitação, vento e outros parâmetros relevantes para a bacia.
- Deve-se considerar a incerteza nos dados de precipitação existentes, devido a problemas nos registros e à manutenção da rede.
- Não realizar modificações durante a construção da barragem sem reavaliar seu comportamento hidráulico.
- Realizar uma batimetria no pé da barragem para verificar potenciais erosões, sendo a primeira imediatamente após a conclusão da construção. Essa batimetria permitirá avaliar a erosão no pé da barragem e a necessidade de proteção.
- Realizar visitas técnicas ao local da barragem para detectar possíveis aspectos não considerados no projeto ou para investigar causas de funcionamento inadequado.
- Elaborar um Manual de Operação e Manutenção da barragem, com o objetivo de dispor de procedimentos e pessoal necessário para realizar a operação e a manutenção da estrutura. Recomenda-se que o manual inclua: tarefas a serem executadas (inspeções, medições, manutenção da instrumentação, revisões de segurança, etc.), os responsáveis por cada tarefa, a periodicidade e o departamento/ administração local responsável.

Elaborar um Plano de Manejo Integrado da Bacia, de forma que a gestão e operação da barragem considerem todos os fatores implícitos na bacia hidrográfica. Recomenda-se que esse plano incorpore um estudo detalhado sobre os sedimentos e, com base nos

resultados desse estudo, a realização de *flushing* (descarga de sedimentos) por meio do descarregador de fundo para evitar o assoreamento do reservatório.

Além disso, a gestão integrada da bacia deve ser acompanhada de outras ações que reduzam o aporte de sedimentos ao reservatório, como reflorestamento, a proteção da bacia e a construção de obras de retenção de sedimentos, visando reter os materiais que possam chegar ao reservatório a partir de qualquer ponto da bacia.

MODO DE FALHA GEOTÉCNICA

Para reduzir o risco dos Modos de Falha de tipologia geotécnica, devem-se considerar os seguintes aspectos:

- Deverão ser analisadas as características topográficas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do terreno da barragem e do reservatório. O alcance das investigações e estudos a realizar será tal que permita caracterizar os terrenos afetados pela barragem e os correspondentes ao reservatório e obter os parâmetros de cálculo necessários para determinar a resistência, deformabilidade, permeabilidade e estabilidade físico-química do terreno.
- Os parâmetros resistentes a empregar nos cálculos serão justificados com um número suficiente de ensaios, além de outros métodos indiretos que redundem em uma maior robustez da estimativa.
- Dada a incerteza inerente à estimativa da resistência ao corte dos maciços rochosos e, em particular, à do seu contato com as barragens de concreto, serão adotados valores conservadores das características resistentes de tal contato para a verificação da estabilidade ao deslizamento da barragem.
- Reavaliar o estado da fundação após realizar as escavações consideradas pertinentes, assim como comprovar que as injeções de calda foram eficazes para a impermeabilização da fundação uma vez realizadas.
- O projeto deverá definir os materiais a empregar, determinar sua procedência, localização geográfica e os volumes disponíveis, estabelecer as características que devem ser cumpridas e concretizar os procedimentos para sua comprovação e controle. Os materiais deverão ser ensaiados e as unidades de obra serão executadas conforme as especificações do projeto.
- Nos cálculos de verificação serão usados os valores característicos dos parâmetros resistentes dos materiais. Se não existir base estatística suficiente para estabelecer tais valores, estes serão atribuídos mediante estimativas conservadoras a partir dos dados disponíveis.
- As ações sobre a barragem a considerar para seu cálculo de estabilidade serão as seguintes: Peso próprio, Empuxo hidrostático, Pressões intersticiais no corpo da barragem e na fundação, Efeitos térmicos, Empuxo dos sedimentos, Efeito das ondas, Efeitos sísmicos, Empuxo do gelo e quaisquer outras que se estimem necessárias.
- A combinação de ações será realizada atendendo à sua probabilidade de apresentação e à sua permanência no tempo.

- O empuxo hidrostático sobre a barragem será considerado como atuando integralmente até o ponto mais baixo da fundação de cada bloco, no caso das barragens de concreto, ou até o ponto mais baixo do elemento impermeável no caso das de aterro.
- Deverão ser estudados, em cada situação de projeto, os processos de geração e dissipação das pressões intersticiais na fundação e no corpo da barragem.
- Nas barragens de terra, será cuidadoso o projeto de filtros e drenos para evitar o surgimento de fenômenos de erosão interna, e serão estudados de forma especial os contatos com obras de descarga ou galerias que possam atravessá-las, bem como as fundações que possam ser suscetíveis à erosão.
- Serão levadas em conta as ações sísmicas sobre a barragem e sobre o reservatório, de acordo com a atividade sísmica da região onde está localizado o reservatório e a classificação das barragens. Será justificada a metodologia utilizada para considerar o efeito hidrodinâmico da água do reservatório sobre a barragem e suas estruturas anexas.
- Nas barragens em que, pelas características sismotectônicas do local e pelas dimensões do reservatório, possa ser prevista a geração de sismicidade induzida, serão indicadas as ações oportunas para estabelecer a vigilância correspondente, analisando os efeitos do possível sismo.
- De acordo com recomendações internacionais, as barragens devem poder resistir sem danos estruturais a sismos com período de retorno de 1000 anos e manter sua integridade para sismos de 5000–10.000 anos de período de retorno, para os quais podem ser aceitos danos, mas não a falha da barragem.
- Nas barragens do tipo arco de simples ou dupla curvatura, será justificada a distribuição de temperaturas adotada no corpo da barragem em cada uma das hipóteses de cálculo. Serão determinadas as temperaturas máximas de lançamento do concreto, bem como o efeito dos sistemas de resfriamento e a temperatura de injeção das juntas. Além disso, serão analisados os movimentos e os estados tensionais para diferentes épocas do ano e diferentes níveis de reservatório.
- De acordo com recomendações internacionais, em condições normais, os coeficientes de segurança ao deslizamento devem ser superiores a 1,4, podendo ser estabelecidos coeficientes inferiores para situações acidentais ou extremas, sempre superiores a 1.
- De acordo com recomendações internacionais, em condições normais, os coeficientes de segurança à tração devem ser superiores a 3, podendo ser estabelecidos coeficientes inferiores para situações acidentais ou extremas, sempre superiores a 1.
- Quando se tratar de barragens do tipo aterro, realizar a compactação adequada dos materiais do corpo da barragem, especialmente dos núcleos de argila em barragens heterogêneas. As zonas especialmente delicadas são os contatos com qualquer elemento rígido (tubulações, túneis, muros...) e o contato com a fundação e os estribos.
- Os materiais utilizados para filtros e drenos devem ser adequados e não contaminados. Realizar estudos sobre a caracterização granulométrica dos solos do reservatório e os potenciais processos de erosão e sedimentação.

- No caso de barragens de concreto, a aplicação do concreto deve ser feita de forma adequada para evitar a segregação de seus agregados.
- No caso de barragens de concreto, costuma ser recomendável dispor de juntas para que a dissipação do calor durante a cura não origine fissuração do concreto.
- No caso de barragens de concreto, costuma ser recomendável dispor de juntas transversais de contração a uma distância adequada para evitar a fissuração do concreto.
- Em barragens com mais de 15 metros de altura, construir galerias nas barragens de concreto para facilitar sua vigilância e a drenagem da fundação.
- No caso de barragens de concreto, realizar reperfuração de drenos com certa frequência ou quando se detectar um aumento das subpressões.

MODO DE FALHA DO RESERVATÓRIO

Para diminuir o risco dos Modos de Falha do reservatório, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Deverá ser investigado se nas margens do reservatório existem terrenos com risco de instabilidade que possam provocar deslizamentos das encostas, ao variar rapidamente o nível da água. Nesse caso, deverão ser estudadas as condições de estabilidade das encostas, particularmente diante de situações de descarga rápida, analisando-se a possível obstrução do reservatório pela massa deslizada e a geração de ondas no mesmo.
- Realizar uma batimetria do reservatório periodicamente, tanto do leito quanto do corpo do reservatório, sendo a primeira imediatamente após a finalização da construção da barragem. Essa batimetria permitirá avaliar a sedimentação no reservatório e a necessidade de implementar uma melhor gestão da bacia.
- Avaliação do balanço após o enchimento com o objetivo de identificar potenciais infiltrações através da fundação, do corpo da barragem ou dos contrafortes, para assegurar o bom funcionamento do sistema barragem-reservatório.

Referências

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Resumen ejecutivo de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático del BID*. 2018.

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID*. 2019.

International Standardization Organization (ISO). *Risk Management – Principles and Guidelines*. ISO 31000. 2009.

International Electrotechnical Commission. *Analysis Techniques for System Reliability – Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. International Standard. 2006.

Mecca, S., y Masera, M. *Technical Risk Analysis in Construction by Means of FMEA Methodology*. 1999.

Kim, J. H., H. Y. Jeong, y J. S. Park. *Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for Railroad Systems*. 2009.

Aguilar Otero, J., Torres Arcique, R., y Magaña Jiménez, D. *Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. 2010.

Zeng, S. X., Tam, C. M., y Tam, V. W. Y. *Integrating Safety, Environmental and Quality Risks for Project Management using a FMEA Method*. 2010.

Carlson, C. S. *Effective FMEAs. Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. 2012.

SPANCOLD. *Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Guía Técnica N° 8 de Explotación de Presas y Embalses. Análisis de Riesgos aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses*. 2012.

Hwang, H., Lansey, K., y Quintanar, D. R. *Resilience-based Failure Mode Effects and Criticality Analysis for Regional Water Supply System*. 2015.

Rasoul, Y. y Hanewinkel, M. *Climate Change and Decision-Making Under Uncertainty*. 2016.

Mrchau, Vincent A.W.J., Warren E. Walker, Pieter J.T.M. Bloemen, y Steven W. Popper. *Decision Making Under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. 2019.

Ministério do Meio Ambiente e Água (Bolívia). *Medidas de protección y mitigación para reducir riesgos para eventos de inundación y crecidas en áreas agrícolas y urbanas en cuencas Alta y Baja*. 2021.

