

ANÁLISE SOBRE POTENCIAIS ALTERAÇÕES NO COMPORTAMENTO DE BARRAGEM DE TERRA DEVIDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

ANALYSIS OF POTENTIAL CHANGES IN EARTH DAM BEHAVIOR DUE TO CLIMATE CHANGE

GUILHERME SILVA DE SOUZA

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (EESC)

LAZARO VALENTIN ZUQUETTE

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (EESC)

VALÉRIA GUIMARÃES SILVESTRE RODRIGUES

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (EESC)

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à órgão de fomento:

Agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

ANÁLISE SOBRE POTENCIAIS ALTERAÇÕES NO COMPORTAMENTO DE BARRAGEM DE TERRA DEVIDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Objetivo do estudo

O estudo explora a pouco abordada relação entre geotecnia e mudanças climáticas em barragens de terra. Evidencia como solos expansivos e eventos climáticos extremos interagem, comprometendo a estabilidade, e ressalta a urgência de soluções adaptativas e monitoramento integrado.

Relevância/originalidade

Analisar, com base em literatura técnico-científica, os efeitos das mudanças climáticas na estabilidade geotécnica, hidrológica e estrutural de barragens de terra, considerando solos expansivos, variabilidade climática extrema e intervenções humanas, e propor um modelo físico-conceitual para orientar estratégias de mitigação.

Metodologia/abordagem

Realizou-se revisão sistemática de artigos, teses e relatórios técnicos. Dados climáticos, hidrológicos e geotécnicos foram integrados para identificar mecanismos de instabilidade e avaliar medidas mitigadoras, enfatizando expansão de solos, infiltração, pressão de poros e adaptações estruturais frente às mudanças climáticas.

Principais resultados

Constatou-se que a estabilidade das barragens é fortemente afetada por extremos climáticos e solos expansivos. A adaptação exige estratégias combinadas: monitoramento em tempo real da pressão de poros (piezômetros), modelagem hidrodinâmica avançada e reforço geotécnico, garantindo resiliência estrutural diante da variabilidade climática.

Contribuições teóricas/metodológicas

O estudo avança ao integrar mineralogia de solos, dinâmica hidrológica e impactos climáticos na engenharia de barragens. Propõe um quadro conceitual para unir dados geotécnicos, hidrológicos e climáticos em avaliações de risco, fundamentando metodologias adaptativas e baseadas em evidências para segurança.

Contribuições sociais/para a gestão

Oferece subsídios técnicos a gestores para projetos e operação seguros de barragens em cenário de mudanças climáticas. Os resultados fortalecem estratégias de segurança hídrica, reduzem riscos ambientais e aumentam a resiliência comunitárias dependentes de infraestrutura hidrológica estável.

Palavras-chave: Barragens de terra, Mudanças climáticas, Obras de terra, Meio Ambiente

ANALYSIS OF POTENTIAL CHANGES IN EARTH DAM BEHAVIOR DUE TO CLIMATE CHANGE

Study purpose

To analyze, through technical-scientific literature, the effects of climate change on the geotechnical, hydrological, and structural stability of earth dams, considering expansive soils, extreme climatic variability, and human interventions, and to propose a conceptual physical model to guide mitigation strategies

Relevance / originality

This study addresses the underexplored intersection between geotechnics and climate change, focusing on earth dams. It highlights how expansive soils and extreme climatic events interact, compromising dam stability, and emphasizes the urgent need for integrated monitoring and adaptive engineering solutions.

Methodology / approach

A systematic review of peer-reviewed articles, theses, and technical reports was conducted. Climatic, hydrological, and geotechnical data were integrated to identify instability mechanisms and evaluate mitigation measures. Analysis emphasized soil expansion, infiltration, pore pressure, and structural adaptation under changing climatic conditions.

Main results

Findings reveal that dam stability is significantly influenced by climatic extremes and expansive soils. Effective adaptation requires combined strategies: real-time pore pressure monitoring (piezometers), advanced hydrodynamic modeling, and geotechnical reinforcement, ensuring structural resilience in the face of projected climatic variability.

Theoretical / methodological contributions

The research advances knowledge by linking soil mineralogy, hydrological dynamics, and climate change impacts in dam engineering. It provides a conceptual framework for integrating geotechnical, hydrological, and climatic data into risk assessments, supporting the development of adaptive, evidence-based engineering methodologies.

Social / management contributions

The study supports decision-makers by offering evidence-based guidelines for safer dam design and management under climate change. Results strengthen water security strategies, reduce environmental risks, and enhance community resilience, particularly in regions dependent on stable hydrological infrastructure.

Keywords: Earth dams, Climate change, Earth structures, Environment

ANÁLISE SOBRE POTENCIAIS ALTERAÇÕES NO COMPORTAMENTO DE BARRAGEM DE TERRA DEVIDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

1 Introdução

As mudanças climáticas globais têm provocado transformações significativas nos regimes hidrológicos e atmosféricos da região amazônica, abordando especificamente a temática do trabalho, as mudanças climáticas têm impactando diretamente a segurança e o desempenho de barragens de terra, estruturas amplamente utilizadas na gestão de recursos hídricos na região.

O principal problema enfrentado atualmente é a instabilidade crescente dessas barragens, resultado direto da intensificação de eventos climáticos extremos (como precipitações concentradas, secas prolongadas e variações abruptas de temperatura) que, ao modificarem a dinâmica do ciclo hidrológico, comprometem as fundações geotécnicas e hidráulicas dessas estruturas. A literatura científica, incluindo os relatórios do IPCC (**Hirabayashi et al., 2013**) e análises regionais recentes (**INMET, 2023**), confirma que tais alterações são impulsionadas predominantemente por emissões antropogênicas de gases de efeito estufa e por distúrbios atmosférico oceânicos, como os eventos El Niño e o aquecimento anômalo do Atlântico Tropical.

Tais fenômenos alteram o balanço hídrico da Amazônia, o volume de escoamento superficial, o que favorece erosões, assoreamento e sobrecarga hidráulica nos corpos barrados. Com isso, há elevação da pressão de poros nos maciços de terra, redução da tensão efetiva dos solos segundo o princípio de Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$), e, conseqüentemente, maior propensão à ruptura por percolação, recalques diferenciais ou overtopping. As barragens de terra da Amazônia, muitas vezes construídas com solos argilosos locais e sem medidas adaptativas às novas condições climáticas, tornam-se vulneráveis frente a esse novo cenário hidrológico e geotécnico.

O Objetivo desta revisão foi analisar, com base na literatura técnico-científica atual, os impactos das mudanças climáticas sobre a estabilidade geotécnica, hidrológica e estrutural das barragens de terra na região amazônica, considerando as interações entre eventos climáticos extremos, características dos solos locais e intervenções antrópicas e apresentar um modelo físico de barragem de terra.

2 Referencial Teórico

Como mencionado por **Artaxo 2014** “as mudanças no clima de nosso planeta já estão em andamento e estão tendo efeitos importantes sobre os ecossistemas e a nossa organização socioeconômica”.

Como indicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as atividades humanas têm contribuído de forma significativa para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, resultando no aquecimento global. Esse processo provoca alterações nos regimes de precipitação e nas condições climáticas, o que, por sua vez, influencia a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, afetando tanto a frequência quanto a intensidade com que ocorrem (**Hirabayashi et al., 2013**).

Estudos também apontam que as mudanças climáticas estão associadas a modificações expressivas no ciclo hidrológico global, com repercussões sobre a disponibilidade e a distribuição da água em diferentes regiões do planeta (**Huntington, 2006**).

Em 2023, a precipitação observada na Amazônia ficou abaixo do esperado, resultado de eventos extremos associados ao El Niño. Anomalias térmicas na superfície do oceano Pacífico Equatorial evidenciam essa configuração, com uma extensa faixa de aquecimento de mais de 3 °C próxima à costa sul-americana (figura 01). Simultaneamente, o Atlântico Tropical Norte

apresentou temperaturas superiores à média histórica, indicando um aquecimento anômalo (INMET, 2023).

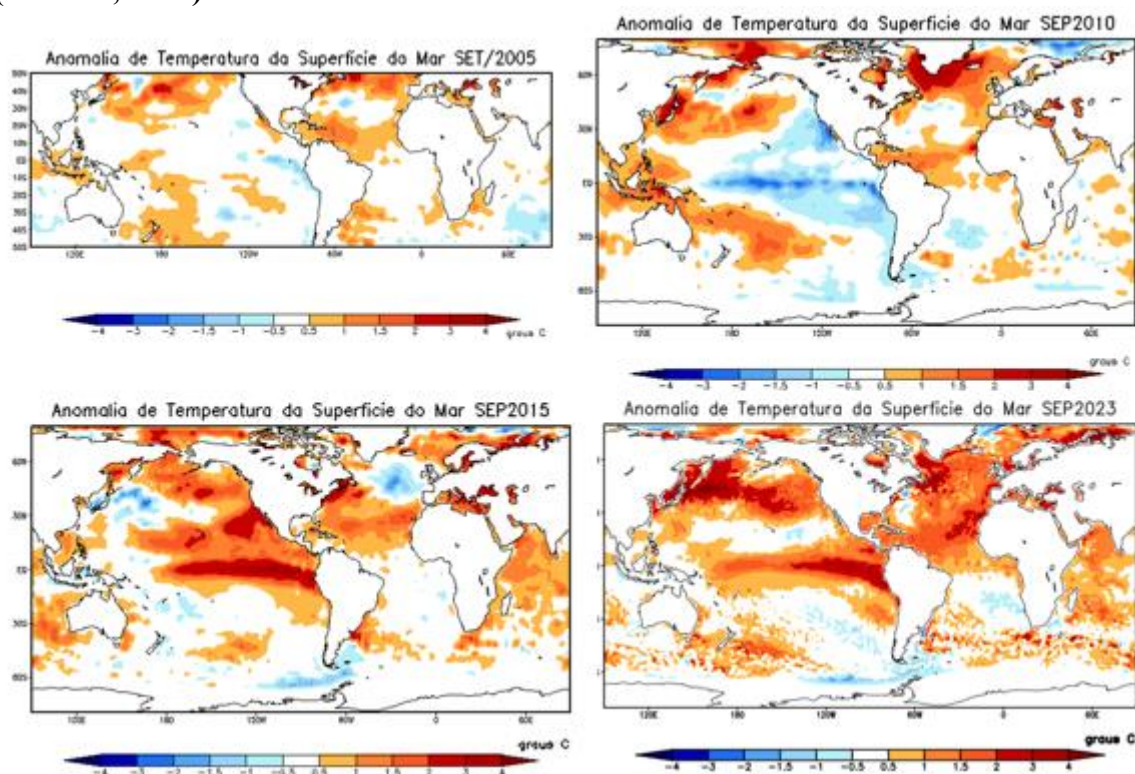


Figura 01. Anomalias de temperatura da superfície do mar em setembro para os anos de 2005, 2010, 2015 e 2023. Valores em graus Celsius. Fonte: CPTEC/INPE com dados da NOAA

Segundo **Paiva et al. (2012)**, a incerteza nas previsões de vazão na Amazônia deve-se, em grande parte, ao estado inicial dos corpos d'água e à precisão dos dados pluviométricos. No modelo MGB-IPH, essas condições iniciais influenciam especialmente os horizontes de previsão de 1 a 3 meses em rios de baixa declividade, onde as planícies alagáveis podem amplificar os erros.

Moura et al. (2015) projetam que, com elevação de temperatura entre 2,5 °C e 4 °C até 2070, a evapotranspiração poderá aumentar de 8 % a 12 %, reduzindo infiltração e recarga de aquíferos. Observa-se defasagem de até 3 meses entre picos pluviométricos e inundações na bacia do Madeira (**Vergasta et al., 2021**), com redução de 15% na vazão básica média em cenários RCP 8.5 (**Ricardo et al., 2020**).

Apesar da média nacional de chuva anual ser de 1.760 mm, há extremos: menos de 500 mm no Semiárido e mais de 3.000 mm na Amazônia (**Santos 2022**). Este dado mostra que há situações muito específicas em máximas e mínimas no Brasil, especialmente na Amazonia.

Uma das metodologias amplamente utilizadas para estimar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos é a curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF), que estabelece a relação entre a intensidade da precipitação, a duração do evento e o intervalo de recorrência de chuvas extremas. No entanto, as incertezas associadas às mudanças climáticas podem comprometer a confiabilidade dessa ferramenta. Estudos como o de **Donat et al. (2016)**, baseados em registros históricos de precipitação, evidenciam aumento expressivo no volume de água durante eventos extremos. De forma semelhante, **Markonis et al. (2019)**, ao analisar longas séries temporais, identificaram tendência consistente de intensificação das chuvas. Esses resultados reforçam que a região amazônica exige atenção especial, dado seu alto grau de vulnerabilidade frente às mudanças climáticas e à crescente ocorrência de eventos extremos.

Práticas como o desmatamento para construção de grandes barragens exemplificam tais alterações, causando impactos diretos aos ecossistemas locais. Estudos observacionais e modelagens climáticas, como o de **Nobre et al. (1991)**, evidenciam que mudanças no uso da terra podem influenciar substancialmente o clima regional e até global, ressaltando a vulnerabilidade da região às intervenções humanas.

Segundo **Ambrizzi et al. (2007)**, a Amazônia será a região da América do Sul mais afetada nas próximas décadas. Eles aplicaram três modelos climáticos regionais à América do Sul, com base em dados do modelo global do Hadley Centre, projetando, para o período de 2071-2100 (comparado ao referencial 1961-1990), um aumento de temperatura significativamente maior na Amazônia (da ordem de 4 a 8°C) indicando que essa região apresentará o maior aquecimento continental.

Assim, as mudanças climáticas representam uma ameaça significativa ao equilíbrio hidrológico da Amazônia, pois o aumento da temperatura intensifica e acelera o ciclo da água (**Case, 2006**). Em consequência, a redistribuição das precipitações extremas e a elevação da evaporação impõem implicações críticas para a compactação geotécnica das barragens de terra na região. Sob condições de chuvas intensas e concentradas, observa-se frequentemente que a capacidade de infiltração do solo na estrutura de barragens de terra é rapidamente superada, especialmente em materiais argilosos. A saturação progressiva dessas camadas gera umidade e, consequentemente, promove a expansão volumétrica dos minerais de argila, fenômeno conhecido como inchamento ou expansão higroscópica. Este processo não ocorre de maneira homogênea ao longo da estrutura, uma vez que variações litológicas, de compactação e de porosidade contribuem para a formação de zonas localizadas com diferentes estados tensionais e níveis de saturação.

Diversos estudos reconhecem que o aumento da pressão intersticial no solo é o principal mecanismo de desestabilização das barragens durante chuvas intensas (**Ng, 2007**). Esse processo ocorre quando a infiltração da água pluvial eleva a pressão dos poros e reduzindo a tensão efetiva (σ'), conforme o princípio de Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$, onde σ é a tensão total e u a pressão de poros). A consequente redução da tensão efetiva diminui a resistência ao cisalhamento do material, comprometendo a estabilidade global da barragem.

Em comparação com outros tipos de barragem, como as de enrocamento, as estruturas em terra apresentam um processo construtivo mais simples (**Matos et al. 2003**), embora exijam compactação rigorosa para evitar problemas estruturais futuros (**Fao, 2011**). A escolha do material de construção é decisiva: argilas expansivas, particularmente as ricas em esmectita, podem reter água entre suas camadas, aumentando significativamente de volume — em alguns casos, até cerca de 150%. Esse comportamento está associado à interação com íons presentes na água, como sódio (Na^+) e cálcio (Ca^{2+}). **Tucci et al. (2004)** destacam que, na engenharia de barragens, a estimativa das vazões máximas é essencial e deve considerar as propriedades do regolito empregado.

No Brasil, as primeiras barragens de terra surgiram no Nordeste no início do século XX, como parte de ações governamentais voltadas à mitigação dos impactos das secas, um problema recorrente na região (**Vargas, 1977**). De acordo com o autor, essas obras iniciais baseavam-se em soluções empíricas, ainda sem respaldo científico consistente. Um marco importante ocorreu em 1938, com a construção da Barragem de Curema, na Paraíba, que passou a incorporar conceitos consolidados da mecânica dos solos no seu projeto.

Conforme enfatiza **Carvalho (2008)**, a intensidade das chuvas não é meramente uma estatística, mas constitui variável fundamental no dimensionamento de barragens.

Dessa forma, a combinação de solos argilosos, alta umidade e limitada capacidade de drenagem nos taludes requer cuidados adicionais, tais como a aplicação de revestimentos adequados, a implementação de sistemas de drenagem superficial e a manutenção contínua. Especificamente, o sistema de drenagem busca reduzir a erosão nos taludes a jusante, separando

a água captada pelo tapete drenante (proveniente de percolação interna) da água pluvial (De Lima Rodrigues et al. 2017).

3 Metodologia

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) de 1982-1983 configurou-se como um dos eventos climáticos mais extremos do século XX, promovendo alterações significativas nos padrões meteorológicos sul-americanos. A interação oceano-atmosfera associada a esse episódio perturbou a dinâmica regional, desencadeando secas severas no Nordeste brasileiro, inundações catastróficas no Peru e Equador, e anomalias térmicas sem precedentes no Pacífico tropical. Tais perturbações redefiniram os regimes de precipitação e temperatura, impactando ecossistemas, atividades agro econômicas e infraestruturas urbanas em escala continental (Kayano & Moura, 1986). A crescente variabilidade climática, intensificada pelas mudanças globais, introduz incertezas críticas aos métodos construtivos de barragens na Amazônia, região onde a estabilidade hidrológica é intrinsecamente vinculada a sistemas climáticos complexos.

Como método utilizado, foi empregado uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados (artigos, teses e relatórios técnicos) sobre barragens de terra, com seleção de estudos voltados a parâmetros geotécnicos e monitoramento e como se aplicavam de fato na realidade das obras geotécnicas. Consideramos as interações entre eventos climáticos extremos, características dos solos locais e intervenções antrópicas e apresentar um modelo conceitual de barragem de terra.

4 Análise dos resultados e Discussões

A barragem de terra ilustrada (Figura 02) representa uma tipologia muito comum na Amazônia devido à abundância de solos argilosos, topografia favorável e menor custo construtivo. Trata-se de uma estrutura composta por um maciço compactado que inclui elementos fundamentais como o núcleo impermeável, responsável por impedir o fluxo de água através da barragem; filtros horizontais e verticais que garantem o controle da percolação e previnem erosões internas; taludes de montante e jusante que definem a geometria estável da estrutura; além de sistemas auxiliares como canaletas de drenagem, tapete impermeável, dreno de pé, poço de alívio, e trincheira de vedação que reforçam a estabilidade e asseguram o adequado funcionamento hidráulico. Na região amazônica, essas barragens cumprem um papel estratégico no controle hídrico, mas estão particularmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas.

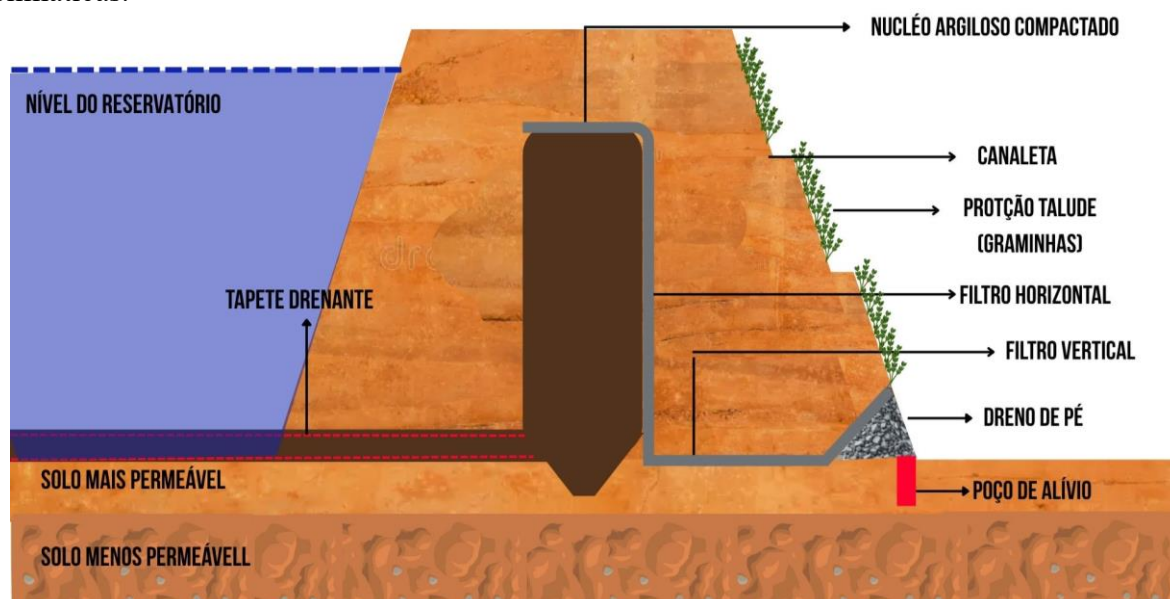


Figura 02. Representação do Modelo Conceitual da Barragem de Terra. Os autores 2025

O solo pode ser entendido como um sistema composto por fases sólidas, líquidas e gasosas, nas quais partículas minerais e orgânicas interagem de forma dinâmica, sendo suas propriedades estruturais fortemente condicionadas pelas variáveis ambientais (**Santos et al., 2018**). Nessa linha, **Lambe e Whitman (1970)** afirmam que “o módulo de deformabilidade não é uma constante de um solo”, o que evidencia a necessidade de tratar seu comportamento como não linear e dependente do histórico de tensões. Essa abordagem supera visões simplificadas que consideram os solos como materiais puramente elástico-lineares, demandando modelos mais sofisticados para representar adequadamente sua resposta mecânica.

Tal variabilidade é especialmente relevante nas barragens de terra da Amazônia, onde a composição química e mineralógica dos solos reflete o material de origem, frequentemente associado a sedimentos quaternários e processos pedogenéticos variados (**Lima, 2001**). Nas áreas de várzea, por exemplo, observa-se diversidade mineralógica marcada pela ocorrência de minerais primários, como mica, clorita e feldspato, e argilas secundárias, como esmectita, caulinita e vermiculita (**Kitagawa & Irion, 1984**). Os solos com alto teor de esmectita, pertencente ao grupo das montmorilonitas e reconhecida por sua elevada capacidade de retenção de água, apresentam expressivas variações de volume em função da umidade. Essas mudanças geram pressões internas capazes de provocar fissuras e comprometer a estabilidade de estruturas geotécnicas.

Nesse contexto, argilas expansivas, sobretudo as ricas em esmectita, constituem um desafio na construção de barragens de terra. Durante períodos chuvosos, a hidratação dessas argilas provoca expansão volumétrica, enquanto a estiagem leva à retração e à formação de fissuras, estabelecendo ciclos de tensão e compressão que degradam o maciço. Para minimizar tais efeitos, utilizam-se sistemas de drenagem eficientes para reduzir a pressão de poros e, em alguns casos, a adição de cimento à matriz do solo, o que aumenta a resistência e diminui a permeabilidade em solos argilosos típicos da região. Além disso, o monitoramento contínuo de parâmetros como pressão interna e teor de umidade é essencial para prever comportamentos críticos em ambientes sujeitos a forte sazonalidade.

O transbordamento (*overtopping*) em barragens de terra representa um dos mecanismos de ruptura mais severos, ocorrendo quando o nível da água ultrapassa o coroamento da estrutura. Nessa condição, inicia-se um processo de erosão superficial que, se não for controlado, pode evoluir rapidamente para a degradação progressiva do maciço. Na tese de doutorado de **Chang (2012)**, intitulada *Internal erosion and overtopping erosion of earth dams and landslide dams*, é apresentada uma análise abrangente dos processos de erosão interna e erosão por *overtopping*, evidenciando que ambos podem interagir e acelerar o comprometimento estrutural da barragem.

Levantamentos indicam que aproximadamente 35% das falhas em barragens de aterro estão associadas ao transbordamento, enquanto os outros 65% decorrem de infiltrações, vazamentos e diferentes mecanismos de ruptura (**ICOLD, 1973**). O início do *overtopping* ocorre quando a lâmina d'água supera a altura da crista, passando a escoar livremente sobre o coroamento e as faces a jusante. Nessa etapa, o fluxo superficial geralmente atinge regimes críticos ou supercríticos, o que amplia significativamente a capacidade de deslocamento de partículas finas e médias, principalmente em solos não coesivos ou com composição heterogênea.

Embora haja diversos trabalhos, como o de **Cheng (1993)**, que tratam do extravasamento considerando incertezas hidrológicas, tais incertezas tendem a ser intensificadas pelas mudanças climáticas. Quando as vazões de projeto são calculadas abaixo do real necessário, o risco de ocorrência de transbordamento aumenta. Para minimizar esse tipo de ameaça em barragens já implantadas, podem ser adotadas medidas como a instalação de

sistemas de *bypass* para sedimentos ou a realização periódica de dragagens, de modo a evitar a diminuição da capacidade útil do reservatório.

A figura 03 representa, em cinco painéis (A a E), as etapas sucessivas de um processo de ruptura por transbordamento (*overtopping*) em uma barragem de terra. O maciço da barragem está em cor marrom-alaranjada, a água em azul, e a linha tracejada indica o perfil original da barragem antes do início da erosão. No cenário A a barragem do reservatório está cheia até a crista e o perfil do talude está completamente preservado, sem sinais de erosão, no cenário B há o excesso de lâmina d'água, a água ultrapassa levemente a crista, iniciando escoamento superficial e a erosão localizada, observa-se a remoção das primeiras partículas no talude de jusante, formando um canal superficial. Na representação C existe a migração a montante, o ponto de início da erosão avança em direção à coroa, aumentando a profundidade e a largura do canal no estágio D começa o alargamento acelerado, com o aprofundamento, grandes volumes de solo são transportados, ampliando rapidamente a brecha. E por último o estado E onde o reservatório está esvaziado, a lâmina d'água atinge o fundo completo do vale, restando apenas remanescentes na jusante

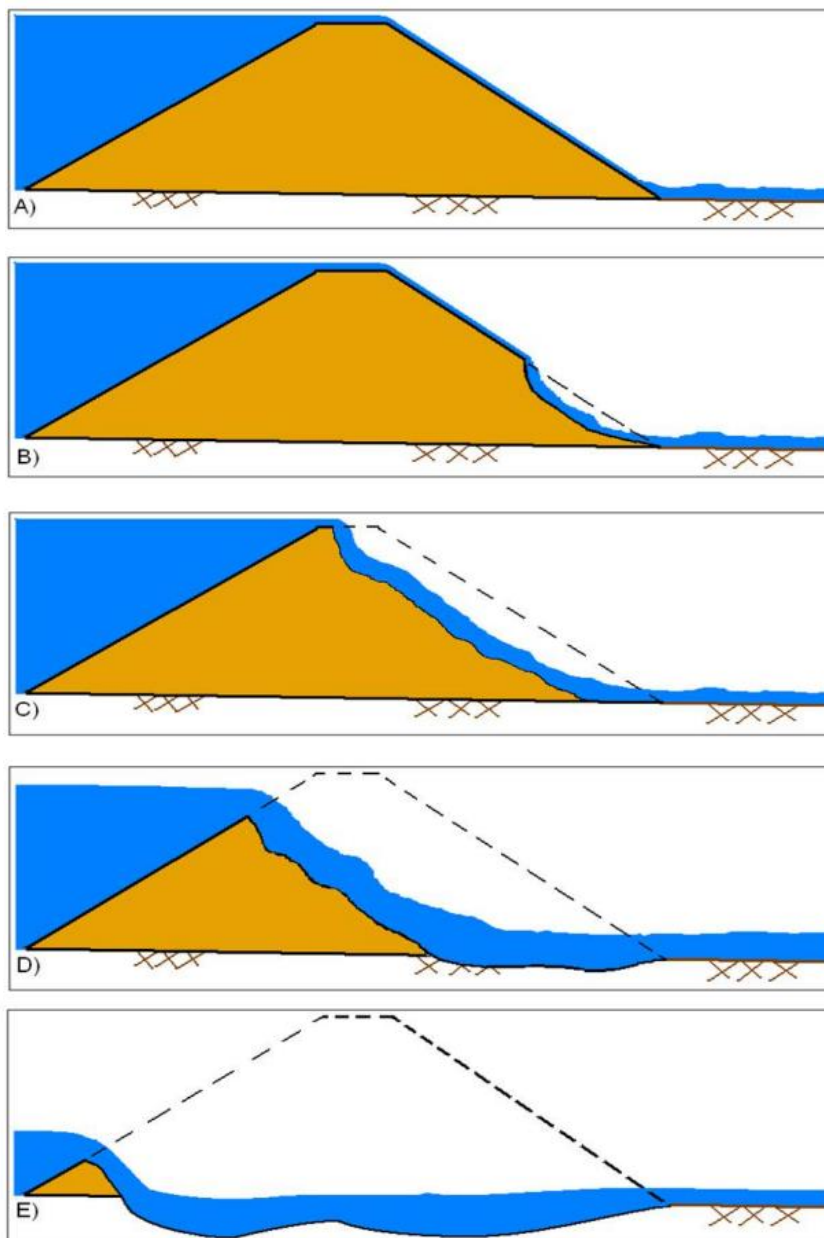


Figura 03. Processo de overtopping. Fonte: US Army Corps of Engineers, 2014.

Como solução conceitual para a mitigação de rupturas por transbordamento em barragens de terra, propõe-se a adoção de um modelo¹³ integrado de segurança hidrológica e geotécnica, fundamentado na combinação de monitoramento em tempo real com redundância estrutural. Esse modelo deve incluir a implementação de vertedouros auxiliares com controle automatizado de comportas, sensores de nível d'água com telemetria para previsão de cenários críticos e modelagens hidrodinâmicas atualizadas que incorporem variabilidades climáticas extremas.

As barragens de terra na Amazônia apresentam uma contradição socioambiental: oferecem vantagens econômicas imediatas, como retenção de água e produção de energia em pequena escala, mas seus efeitos de longo prazo podem alterar de modo permanente o equilíbrio hidrológico (**Tundisi, 2003**). O padrão pluviométrico tropical — marcado por forte sazonalidade e episódios de chuvas intensas — impõe desafios técnicos relevantes à construção e à conservação dessas estruturas (**Molion, 2006**). Além disso, a dinâmica hídrica local, influenciada pela cobertura florestal e por fenômenos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), interfere diretamente na estabilidade geotécnica das barragens, demandando respostas adaptativas frente a cenários climáticos incertos.

Nesse contexto, os piezômetros são ferramentas essenciais para medir a pressão da água em barragens. Seu princípio de operação transforma a ação hidrostática em sinais mensuráveis: a pressão sobre um diafragma causa sua deflexão, que é detectada por um sensor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao diafragma, gerando um sinal elétrico proporcional à pressão (**Silveira, 2006**). Em uma região onde a variabilidade hidrológica é intensificada pelas mudanças climáticas, o monitoramento contínuo da pressão de poros fornecido por esses instrumentos é crucial para detectar infiltrações, riscos de liquefação ou indícios de falha estrutural.

Entre os modelos usados, o piezômetro tipo Casagrande é muito comum em barragens por seu projeto simples, que torna a instalação e a manutenção menos onerosas. Além disso, é reconhecido por sua precisão metrológica e durabilidade em condições adversas, sendo uma opção consolidada para acompanhamento contínuo (**Sestrem, 2012**). Piezômetros de tubo aberto, por sua vez, costumam ser empregados na fase de fundação e em pontos críticos das barragens de terra e enrocamento, permitindo a identificação precoce de variações hidráulicas que possam afetar a segurança da estrutura (**Fonseca, 2003**).

5 Conclusões/Considerações finais

A análise sistemática da literatura revelou que, sob o efeito das mudanças climáticas, as barragens de terra na Amazônia apresentam múltiplos mecanismos de fragilização que atuam de forma integrada.

A proposta de um modelo físico conceitual para barragens de terra na Amazônia, fundamentado na combinação de elementos impermeáveis, filtros, drenagens e instrumentação (Seção 4), fornece um robusto entendimento e mitigação dos riscos associados à intensificação hidrológica. A análise consolidada na revisão revela que os mecanismos de instabilidade (percolação, aumento de pressão intersticial, recalques diferenciais, erosão interna e overtopping) não atuam isoladamente, mas de maneira sinérgica, moldando o comportamento do maciço sob condições extremas (Ng, 2007; Cheng, 2012).

O modelo físico destaca o papel do núcleo impermeável e dos filtros horizontais e verticais na contenção e no controle do fluxo de percolação interna. Conforme demonstrado por De Lima Rodrigues et al. (2017), a eficiência desses componentes depende diretamente da seleção granulométrica do material e da continuidade estrutural entre camadas, de modo a evitar zonas de estrangulamento ou de bypass inadvertido. Assim, sob chuvas extremas, a

sobreposição de eventos de alta intensidade pode elevar drasticamente a pressão de poros no maciço, reduzindo a tensão efetiva segundo Terzaghi.

Finalmente, a consolidação dos achados indica que o fortalecimento da estabilidade requer: (a) seleção e estabilização prévia de solos expansivos com aditivos como cimento ou geossintéticos; (b) adoção de taludes mais suaves e bermas de drenagem que evitem concentrações de tensão; (c) filtros contínuos para controlar percolação sem criar estrangulamentos; e (d) 16 sistemas redundantes de escoamento de superfície para impedir sobrecarga hidráulica.

6 Referências

- **Ambrizzi, T.** (2007). *Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais* (Relatório 3). Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas.
- **Artaxo, P.** (2014). Mudanças climáticas e o Brasil. *Revista USP*, *103*, 8–12. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p8-12>
- **Carvalho, J. A.** (2008). *Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação*. UFLA.
- **Case, M.** (2006). *Climate change impacts in the Amazon: review of scientific literature*. WWF.
- **Cruz, P.** (1996). *Cem grandes barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projetos*. Oficina de Textos.
- **De Lima Rodrigues, R., Silva, L. F., Oliveira, A. S., & Pereira, C. M.** (2017). Projeto de drenagem superficial da barragem de terra de Itaipu, com auxílio de laser scanner terrestre. *Revista Brasileira de Geotecnia Ambiental*, *12*(3), 45–62.
- **Food and Agriculture Organization (FAO).** (2011). *Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para localização, projeto e construção*. <http://www.fao.org/3/i2561pt/i2561pt.pdf>
- **Fonseca, A. R.** (2003). *Ausculatção de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso de barragens da UHE São Simão* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto].
- **Lambe, T. W., & Whitman, R. V.** (1970). *Soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- **Matos, A. T., Silva, D. D., & Pruski, F. F.** (2003). *Barragens de terra de pequeno porte* (2ª ed.). EDUFV.
- **Moura, M. S. B., Santos, C. A. F., Oliveira, G. M., & Carvalho, H. F. S.** (2015). Aptidão climática da mangueira frente ao clima atual e aos cenários futuros. *Revista Brasileira de Geografia Física*, *8*, 496–509. <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/762>
- **Ng, K. Y.** (2007). *Mechanisms of shallow rainfall-induced landslides in residual soils in humid tropical environments* [Tese de doutorado, Durham University].
- **Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J.** (1991). Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, *4*(10), 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957: ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957: ADARCC>2.0.CO;2)
- **Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., & Buarque, D. C.** (2012). On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(9), 3127–3137. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3127-2012>
- **Santos, P. M. C.** (2022). *Estatísticas de Chuvas e Vazões*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec95f52-d294-4102-807f-e71c56959fde>

- **Sestrem, L. P.** (2012). *Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná].
- **Silveira, J. F. A.** (2006). *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. Oficina de Textos.
- **Tucci, C. E. M.** (2004). *Hidrologia: ciência e aplicação* (3ª ed.). Editora da UFRGS.
- **U.S. Army Corps of Engineers.** (s.d.). *Training Document 39 (TD 39) – Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Quick Start Guide*. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>
- **Vargas, M.** (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos: Segunda parte – Hidráulica dos solos*. McGraw-Hill.
- **Vergasta, L. A., Silva, R. V., Menezes, I. L., & Lima, K. C.** (2021). Avaliação do Balanço de água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *36*(2), 153–169. <https://doi.org/10.1590/0102-77863610005>