

**RICARDO MOREIRA VILHENA**

**OCORRÊNCIA DE CANALÍCULOS E SEUS IMPACTOS NA  
SEGURANÇA DE BARRAGEM.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens para Usos Múltiplos; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental; Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientador: Prof. Luís Edmundo Campos

Salvador  
2024

# **Ocorrência de Canalículos e seus Impactos na Segurança de Barragem.**

**Ricardo Moreira Vilhena**

## **Resumo**

O objetivo deste artigo é apresentar um retrospecto dos estudos e investigações de cavidades tubulares, ou também conhecidas como canalículos, que condicionam fundações de obras de terra em solos tropicais e seus aspectos geológico-geotécnicos, identificação em campo, laboratório, computacional e formas de tratamento. O processo de formação de canalículos pode ser considerado um processo erosão subterrânea ou interna (*piping*) associado ao fenômeno de esqueletização e somado ou não com a ação biológica, dependendo das características, físico-químicas, mineralógicas do solo e condições ambientais. A ocorrência dos canalículos pode provocar mudanças no comportamento hidráulico e mecânico do solo criando uma anisotropia extremamente complexa, pelo aumento da porosidade e infiltração de água no solo, bem como influenciar a deformabilidade do solo e apresentar comportamento colapsível quando saturados ou recalques acentuados quando submetidos às sobrecargas. Na identificação de canalículos deve-se proceder investigações e análises em campo, laboratório e utilização de recursos computacionais para mapear e classificar os canalículos. Os estudos prévios permitem um entendimento importantíssimo para a fase de projeto de barragens que devem ser detalhados à medida que se avança nas etapas até a sua construção. E nesta fase deverão ser considerados tratamentos específicos, visando a mitigação desse fenômeno. Na etapa operacional, todo o histórico do tratamento da fundação deve ser considerado para o monitoramento, controle e estudos de comportamento da instrumentação para a Segurança da Barragem.

**Palavras-chave:** Canalículos, Permeabilidade, Piping e Segurança de Barragem

## **Abstract**

The objective of this article is to present a retrospective of the studies and investigations of tubular cavities, or also known as canaliculi, which condition the foundations of embankment dams in tropical soils and their geological-geotechnical aspects, identification in the field, laboratory, computational and forms of treatment. The canaliculi formation process can be considered an underground or internal erosive process (piping) associated with the skeletonization phenomenon and combined or not with biological action, depending on the physicochemical and mineralogical characteristics of the soil and environmental conditions. The occurrence of canaliculi can cause changes in the hydraulic and mechanical behavior of the soil, creating an extremely complex anisotropy, due to increased porosity and seepage, in addition to influencing the deformability of the soil and presenting collapsible behavior when saturated or accentuated settlements when subjected to loads. When identifying the canaliculi, investigations and analyzes must be carried out in the field, laboratory and use of computational resources to map and classify the canaliculi. Previous studies provide a very important understanding for the dam design phase, which must be detailed as the construction stages progress. And at this stage, specific treatments should be considered, aiming to mitigate this phenomenon. In the operational stage, the foundation's entire treatment history must be considered for monitoring, control and behavior for Dam Safety.

**Keywords:** Canaliculi, Seepage, Pinping, Dam Safety

# **1 INTRODUÇÃO**

O objetivo deste artigo é apresentar um retrospecto dos estudos e investigações de cavidades tubulares, ou também conhecidas como canalículos, que condicionam fundações de obras de terra em solos tropicais e seus aspectos geológico-geotécnicos, identificação em campo, laboratório e formas de tratamento.

Além disso, alertar sobre os impactos da presença de canalículos para a área de Segurança de Barragens e possíveis soluções para minimizar os efeitos desse fenômeno.

A existência de canalículos em horizontes de solos é uma particularidade geotécnica característica da região amazônica, mas há relatos de sua presença em outras regiões do Brasil. O tema foi bastante estudado em projetos e durante a construção de algumas barragens para fins hidrelétricos localizadas, principalmente nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas.

O conhecimento deste fenômeno e as formas de identificação em campo e laboratório favorecem a obtenção de informações relevantes para os estudos geotécnicos e indicam procedimentos específicos para tratamento das fundações em solo.

## **2 OCORRÊNCIA DE CANALÍCULOS**

### **2.1 GÊNESE**

O termo canalículo é utilizado de forma genérica para denominar as cavidades tubulares presentes em horizontes de solo, principalmente na região amazônica e no domínio dos solos tropicais (AB'SABER, 1979; BUOSI e CADMAN, 1984; BARRADAS, 1985; GUIDICINI e BARTORELLI, 2023).

A presença de canalículos em terrenos de fundação de barragem pode comprometer sobremaneira a segurança futura da obra, por permitir passagens preferenciais de água e, portanto, podendo promover vazões localizadas bastante elevadas, tendo por consequência o possível carreamento de finos do solo de fundação e/ou do maciço da Barragem (BARRADAS, 1985).

Ab'Saber, 1979, atribuiu a origem das cavidades tubulares aos processos erosivos de natureza exclusividade geológica (erosão pedo-cárstica), que teria a contribuição da alta pluviosidade da região e elevada porosidade dos materiais componentes das camadas sedimentares na formação.

De acordo com Brito (1985), as zonas de solo canaliculados estão presentes em toda região amazônica, com a possível exceção das encostas e das serras úmidas, que permaneceram florestadas durante as oscilações climáticas do Quaternário.

Segundo Buosi *et al.* (1981), a origem dos canalículos poderia estar associada a raízes ou mesmo a processos de laterização superficial, facilitada pela percolação da água da chuva em direção às fraturas da rocha e com saída para o rio. Neste ponto, Buosi e Cadman (1984) em um trabalho posterior, identificaram uma correlação direta entre a concentração dos canalículos e os processos de laterização. Eles explicam que se trata do resultado da dissolução e lixiviação de certos elementos químicos, que normalmente ocorrem nos processos de laterização, onde é favorecida a infiltração de água através do solo. E sob condições climáticas e topográficas favoráveis, os canalículos teriam seus diâmetros aumentados pelo carreamento de materiais por estas águas de percolação.

Segundo Victor de Mello (1987), também concorda que a origem dessas cavidades a partir dos canalículos expostos e de seu comportamento em fluxo pode ser interpretada como processo de lixiviação em camadas lateríticas de sesquióxidos e recristalizações litificantes, geralmente iniciadas por aberturas provocadas por raízes.

Para o biólogo Willian Overal (1979), a hipótese da ação de raízes está fundamentada no fato de que raízes de pequeno diâmetro foram observadas preenchendo alguns canalículos à pequena profundidade. A argumentação esbarrou, porém, na profundidade em que o enraizamento da grande maioria das árvores pôde alcançar, geralmente menor que as observadas para as cavidades.

Adicionalmente, Lee e Wood (1971) registram inúmeros casos de modificações na distribuição e no estado de agregação do solo, de sua capacidade de drenagem e retenção da água, aeração, penetração das raízes, porosidade e conteúdo orgânico. Tais efeitos podem abranger áreas consideráveis e decorrem do hábito social de todas as espécies de cupins (*termites*), que formam colônias muito populosas, e que se estabelecem em grande número ao longo de extensões territoriais.

Machado (1983) relacionou a origem dos canalículos, com a ação de térmitas (cupins) como fator contribuinte no processo de laterização do solo. Esses insetos são os mais abundantes invertebrados de solo de ecossistemas tropicais (ASSAD, 1997) e habitam ninhos que podem durar de alguns anos a várias décadas, e cuja população pode chegar a vários milhões de indivíduos (FONTES, 1984). Além disso, edificam um amplo sistema de galerias subterrâneas, podendo causar profundas modificações no solo, tanto de natureza física como químicas e danos à estrutura de barragens (LI e PAN, 2021).

As térmitas, junto com formigas e minhocas, são reconhecidas como o grupo de animais do solo mais importante na influência da estrutura física e função biológica do solo. A construção de galerias subterrâneas de alimentação resulta em aumento da porosidade e a condutividade hidráulica do solo (HOLT e LEPAGE, 2000).

Já para Jury e Paraguassu (1990), a origem dos canalículos presentes no solo Amazônico, à luz da interpretação que os atribui à atividade termítica, não é recente. Ao contrário, eles remontam pelo menos 12.000-18.000 anos, por ocasião do último período glacial quaternário, quando na Amazônia o clima era seco e predominavam formações vegetais abertas, do tipo cerrado, caatinga ou ambos. A floresta semelhante à atual restringia-se a “ilhas” de umidade nas serras e nas margens dos rios. A expansão dos cerrados e caatingas proveria a área de densa e diversa fauna de cupins de solo.

Buosi e Cadman (1984), entendem que a origem dos canalículos, mesmo que ainda não totalmente explicada, sejam por processos geoquímicos, raízes, térmitas, lixiviação e minhocuçus. Em várias observações, verificou-se que os minhocuçus (minhocas de grandes dimensões, podendo atingir 90 cm de comprimento) acompanham com muita regularidade as variações do nível freático, o que permitiu estabelecer uma correlação positiva entre o nível da água no solo e presença desses animais, além do seu comportamento em relação à presença de matéria orgânica.

O processo de formação de canalículos também pode ser considerado um processo erosão subterrânea interna (*piping*) associado ao fenômeno de esqueletização e somado ou não com a ação biológica, dependendo das características, físico-químicas, mineralógicas do solo e condições ecológicas.

Hargerty (1991) *apud* Camapum de Carvalho *et al.* (2006) descreve o processo de erosão interna como o efeito da percolação de água causando a remoção de partículas do interior

do solo. E Camapum de Carvalho *et al.* (2006) entende que o fenômeno da esqueletização é o processo de degradação física do solo que aumenta sua porosidade, surgindo em consequência do transporte de partículas ou de compostos ou elementos químicos solubilizados.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2012) as características físico-químicas, mineralógicas e estruturais, os fluxos de umidade determinam as condições de estado desses solos, pois, além de responderem por constantes variações no conteúdo de água dos poros do solo, proporcionando alterações no estado de tensões, podem propiciar sua lixiviação e a consequente esqueletização do maciço.

Entre os autores que defendem a origem dos canalículos pela atividade biológica (ASSAD, 1997; FONTES, 1984; LEE e WOOD, 1971; OVERAL, 1979; e MACHADO, 1983) há um consenso que esse processo deflagra a abertura das cavidades e inicia ou facilita o processo de laterização. Entretanto, os autores Brito (1985), Buosi *et al.* (1981), Jury e Paraguassu (1990) e Mello (1987) consideram que a origem da ocorrência das cavidades tubulares inicia-se por processos físico-químicos, sendo modificadas ou ampliadas pela atividade biológica.

Contudo a origem dos canalículos, seja por processos físico-químicos ou por ação de agentes biológicos, aponta os processos de laterização como responsáveis diretos ou indiretos pela sua formação.

No trabalho de Limberger *et al.* (2023) é apresentado um resumo das hipóteses que já foram levantadas sobre a origem desse fenômeno, são elas: características intrínsecas do material, ação biológica, ação vegetal e ação combinada.

## 2.2 IMPACTOS PARA SEGURANÇA DE BARRAGENS

Os primeiros estudos sobre a presença de canalículos em terrenos de fundação no Brasil datam de 1957, durante a execução da barragem de Vereda Grande, no rio Itaueira, Estado do Piauí (BARRADAS, 1985). Além disso, também foi verificada a presença de canalículos e veios associados em solo residual pouco laterizado nos taludes do canal durante as escavações do canal Pereira Barreto, em São Paulo por Pimenta *et al.* (1981 *apud* MASSAD, 2005).

Bjornberg (1992) comparou cavidades tubulares encontradas durante a escavação do túnel do METRÔ na Av. Paulista com os canalículos encontrados na Amazônia e do interior de São Paulo. O autor não encontrou similaridade entre as ocorrências estudadas. Porém, uma característica peculiar e não explicada em seu trabalho foram as cavidades sub-horizontais com surgência de água, em formato achatado e densamente distribuídas no teto do túnel à 20 metros de profundidade.

Contudo, só no final dos anos 70 os estudos sistematizados sobre canalículos foram realizados devido a construção de grandes barragens na região amazônica (BARRADAS, 1985).

O trabalho de Buosi e Cadman (1984), seguido pelos estudos de Jury e Paraguassu (1990), apresentam a experiência dos autores sobre a ocorrência de cavidades tubulares em solos lateríticos na região amazônica no contexto geológico-geotécnicos das barragens de Tucuruí, Balbina e Samuel, nos estados do Pará, Amazonas e Rondônia, respectivamente. Já Limberger *et al.* (2023) e Guidicini e Bartorelli (2023) trazem também informações sobre este fenômeno no sítio da UHE Belo Monte. Na Tabela 2.1 está apresentado o resumo da ocorrência de canalículos em usinas pesquisadas na região amazônica.

Tabela 2.1 – Principais ocorrências de canalículos pesquisadas em barragens brasileiras

Barragem	UF	Origem provável	Tipo de Solo	Permeabilidade do solo (k) com canalículos	Diâmetro máximo (cm)	Prof. máxima (m)
Balbina	AM	Ação biológica	Solo aluvionar, residual, coluvionar e terraço aluvionar	$\geq 10^{-3}$ cm/s	10,00	4,00
Belo Monte	PA	Ação biológica (raízes)	Solo aluvionar, coluvionares e residuais	$10^{-4}$ cm/s	25,00	6,00
Samuel	RO	Ação biológica	Solo aluvionar, coluvionares e residuais	$10^{-1}$ cm/s	1,00	8,00
Tucuruí	PA	Ação biológica	Solo residual	$\leq 10^{-5}$ cm/s	25,00	18,00

No sítio da usina de Balbina, localizado no estado do Amazonas, as características dos canalículos observadas nas fundações da barragem têm sua origem por ação biológica



(térmitas) e sua ocorrência era de forma indistinta entre os tipos de solos da fundação, são eles: aluviões, terraços aluvionares, solos coluvionares e residuais de rochas vulcânicas. Dezenas de canalículos foram identificados nas trincheiras de investigação de 1 a 10 cm de diâmetro, sendo que a maioria deles subhorizontais e intercomunicantes. (BUOSI E CADMAN, 1984). Na presença de canalículos a permeabilidade atingia valores acima de  $10^{-3}$  cm/s e profundidades mapeadas em poços de inspeção até 4,00 metros.

Os relatos da ocorrência de canalículos na fase de construção da usina de Belo Monte (Limberger *et al.*, 2023), estado do Pará, inferem origens combinadas de raízes, termítica e pela lixiviação de solos. Aparecem em solos coluvionares, aluvionares e residuais de migmatito, associadas a laterização. Apresentam desenvolvimento subvertical mas se comunicam lateralmente através de microcanalículos e/ou porosidades do solo, possuem diâmetros de até 5 cm e podem atingir profundidades iguais ou superiores a 6,0m.

Em Tucuruí, segundo Buosi *et al.* (1981), foram identificadas cavidades tubulares subverticais e subhorizontais, principalmente em solos residuais de rochas vulcânicas e metamórficas, bem como na região do saprolito. Os maiores diâmetros encontrados foram de 25 cm e profundidades de 30 m. Capacidade de absorção de até 40 l/min com indicações de intercomunicação entre canalículos. A partir de resultados de coeficiente de permeabilidade maiores que valores médios de  $k \leq 10^{-5}$  cm/s. Fotografias dos canalículos encontrados em Tucuruí são apresentadas nas Figura 2.1.

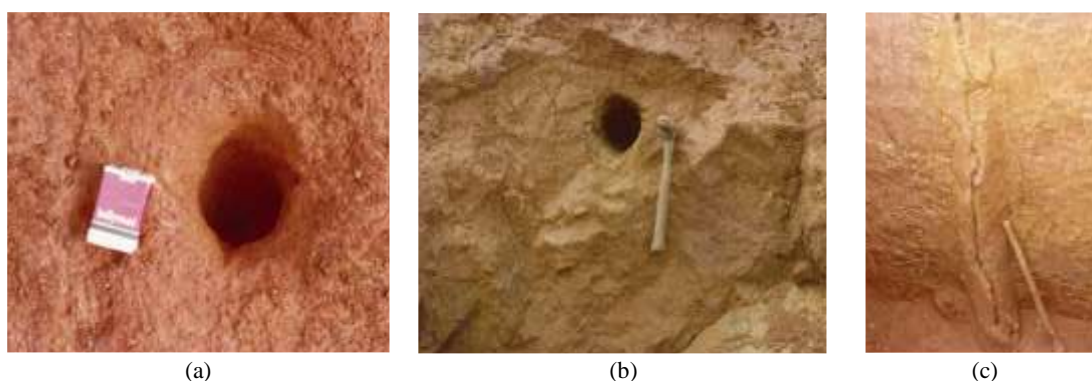


Figura 2-1 – Canalículos encontrados nas fundações da barragem de Tucuruí. (a) Canalículos em solo residual de metabasito com diâmetro superior a 10 cm. (b) Canalículo subhorizontal ( $\varnothing$  10 cm) no talude de erosão junto a margem direita – trecho metabasito. (c) Canalículo subvertical ( $\varnothing$  2 a 3 cm) em parede de poço (4m profundidade), escavado em solo residual de metabasito. Imagens de Buosi *et al.* (1981).

A fundação da barragem de Samuel é caracterizada por solos aluvionares argilosos e arenosos, colúvio e solos residuais de granito. Foram observados que a área com maior incidência de canalículos nos sedimentos atinge 6,0m de profundidade e possui

coeficiente de permeabilidade da ordem  $10^{-1}$  cm/s, ou seja, um aumento na ordem de 10.000 vezes dos valores de permeabilidade ( $1 \times 10^{-5}$  cm/s) de solos com características siltosas (Jury e Paraguassu, 1990). E segundo Buosi e Cadman (1984), os canalículos foram observados na escavação da vedação da ensecadeira de montante no leito do rio e ombreira esquerda em solos aluviais recentes. Foram identificados centenas de canalículos subverticais e subhorizontais, todos com cerca de 1 centímetro de diâmetro e podendo chegar até 8 metros de profundidade.

De um modo geral, Bousi e Cadman (1984) consideram que os solos laterizados da Amazônia têm mostrado ocorrências de cavidades distintas de outras regiões de solos lateríticos. Existe uma evidente relação entre as cavidades e a laterização dos solos, seja por processos geoquímicos, seja por influência das térmitas ou por influência de raízes. E embora as cavidades ocorram quase sempre em solo laterizado bastante resistentes aos processos de erosão é necessário algum tipo de tratamento (trincheira, injeções, etc) visando impedir riscos de carreamento de finos do aterro e/ou fundação e vazões indesejáveis, particularmente quando há comunicação das cavidades com fraturas abertas no topo rochoso.

Há também relatos da presença de canalículos em projetos de grandes barragens construídas em Rondônia (Figura 2-2) e nos estudos de viabilidade de São Luiz do Tapajós – PA (CNEC, 2014).



Figura 2-2 – Canalículos encontrados nas fundações de barragem em Rondônia (fotos do autor). (a) Identificação de canalículos durante o monitoramento das escavações. (b) Detalhe dos canalículos na fundação da barragem. Imagens do autor.

Esta barragem no estado de Rondônia, durante a fase de construção foram identificados uma grande quantidade de canalículos na fundação da barragem, em solo residual, sendo

identificadas cavidades de até 50 cm de diâmetro e 80 cm de profundidade, conectados a outros condutos, e com diversos tipos de preenchimento (sedimento, raízes, dentre outros) e organismos (insetos, dentre outros). Devido ao padrão radial de distribuição, sugere que sua origem esteja associada a presença de raízes. Já para barragem em fase de estudos no estado do Pará, os canalículos observados são milimétricos em solo de terraço aluvionar com permeabilidade que varia de  $10^{-6}$  a  $10^{-2}$  cm/s.

Como condicionante geológico-geotécnico, os canalículos nas fundações de barragens podem aumentar a deformabilidade do solo e apresentar comportamento colapsível quando saturados ou recalques acentuados quando submetidos às sobrecargas. Outra influência significativa está relacionada à diminuição da estanqueidade de uma barragem e percolações excessivas pela fundação, ocasionando erosões internas, redução do volume armazenado e subpressões elevadas. O risco mais severo é de fato a ruptura da estrutura da barragem ou taludes.

Outra condicionante é a influência na permeabilidade, pois dependendo das quantidades e suas dimensões haverá um efeito direto nos valores de condutividade hidráulica do solo. Outrossim, pode favorecer o destacamento de partículas pela fundação com efeito da percolação de água (HARGERTY, 1991 *apud* CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006) e promover a formação de erosão subterrânea interna (*piping*), associado ao fenômeno de esqueletização.

Autores como Camapum de Carvalho *et al.* (2006), entendem que o fenômeno da esqueletização é o processo de degradação física do solo que aumenta sua porosidade, surgindo em consequência do transporte de partículas ou de compostos ou elementos químicos solubilizados.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2012), as características físico-químicas, mineralógicas e estruturais, os fluxos de umidade determinam as condições de estado desses solos, pois, além de responderem por constantes variações no conteúdo de água dos poros do solo, proporcionando alterações no estado de tensões, podem propiciar sua lixiviação e a consequente esqueletização do maciço.

Então, pelas análises e estudos dos autores citados, principalmente Buosi e Cadman (1984), a ocorrência dos canalículos em solos lateríticos está associada intimamente ao processo de lixiviação, que por sua vez está ligado aos processos de erosões subterrâneas.

Esse processo pedogenético de laterização irá gerar mudanças no comportamento hidráulico e mecânico do solo e quando relacionado às atividades biológicas criam uma anisotropia extremamente complexa aumento a porosidade, deformação e permeabilidade do solo.

Durante as etapas de estudos e projetos de uma barragem, principalmente na região amazônica, é importante considerar os canalículos como uma condicionante geológico-geotécnica e programar as investigações com o objetivo de mapeá-los e caracterizá-los. Em etapas de anteprojeto, projeto básico e estudos de viabilidade de grandes barragens haverá dificuldade de identificação e mapeamento dessa anomalia, mas a partir de aberturas de poços de inspeção e trincheiras, com coleta de amostras indeformadas é possível ter evidências de sua presença.

Contudo, durante a fase de projeto executivo e ao longo da construção deve-se detalhar as investigações para canalículos nas fundações e prever os tratamentos necessários. Nesta fase, a existência de cavidades em solos é facilmente observada nas escavações expostas e pelos mapeamentos geológico-geotécnicos sistemáticos. Deve-se prever no projeto instrumentação adequada para monitoramento do comportamento da percolação na fundação, principalmente piezômetros com bulbos instalados na fundação.

Já durante a operação do empreendimento, ou seja, na etapa de monitoramento da Segurança da Barragem é necessário acompanhar os resultados da piezometria e vazões pelas fundações, principalmente nas regiões que foram submetidas a tratamentos sistemáticos de cavidades tubulares. No caso de Balbina, Moreira *et al.* (1990) cita que o monitoramento das fundações com o objetivo de avaliar a eficiência das injeções de solo-cimento para controle dos canalículos perduraram ainda após 18 meses do enchimento do reservatório e os resultados mostraram que esse tratamento foi adequado.

Devido ao grande período de duração dessa etapa, que varia de acordo com a vida útil da obra, é nela onde se encontra a maior probabilidade de ocorrência de acidentes. Por isso, é importante que o monitoramento esteja associado à gestão de risco. Neste contexto, podem-se utilizar métodos probabilísticos qualitativo ou quantitativo, ou ainda semiquantitativos, para avaliar a probabilidade de ruptura por erosão regressiva pela fundação, devido a presença de canalículos. Um dos métodos sugeridos é por árvore de eventos (ETR).

Entretanto, caso não se tenha investigado adequadamente as fundações em sítios de barragens na região amazônica ou ainda, não se foram identificadas a ocorrência de canalículos durante a operação, eventuais surgimentos de anomalias geotécnicas (recalques ou surgências de água) podem estar relacionados à presença de cavidades tubulares. Por isso, cabe a realização de novas investigações e tratamentos específicos.

### 2.3 . METODOLOGIA

O objetivo deste artigo não é apresentar uma nova metodologia de investigação, tratamento ou controle dos canalículos, mas sim revisitar pesquisas existentes sobre o tema e trazer novas contribuições para Engenharia de Barragens, bem como aplicações na área de Segurança de Barragens.

É possível dividir as etapas de investigações de canalículos considerando a aplicação em todas as fases, incluindo a gestão de Segurança de Barragens, em métodos de investigações em campo, laboratório e computacional.

Recentemente, Limberger *et al.* (2023) apresenta o estado da arte sobre canalículos com a releitura das metodologias consagradas em grandes obras de barragens na região amazônica da década de 70 e 80 e a experiência de tratamento realizada em Belo Monte.

Sathler e Mesquita (1984) sugeriram metodologia de classificação de canalículos baseada em oito parâmetros de caracterização a partir de investigação em campo, baseada na experiência da Barragem de Tucuruí, são eles:

- a) Continuidade (contínuos ou descontínuos)
- b) Dimensão (macro ou micro-canalículos)
- c) Forma (ramificada, não ramificada ou anastomosada)
- d) Modo de Ocorrência (isolada ou agrupada)
- e) Inclinação (subvertical, subhorizontal ou inclinada)
- f) Características das Paredes (sem revestimento, oxidada ou com laterização)
- g) Preenchimento (vazio, parcialmente preenchidos ou preenchidos)
- h) Tipos de Preenchimento (terroso ou orgânico)

Posteriormente, Jury e Paraguassu (1990) propuseram a classificação de canalículos baseada nas ocorrências em Balbina, Samuel e Tucuruí, a qual foi dividida em 6 grupos com 8 parâmetros. Alguns parâmetros se assemelham ao de Sathler e Mesquita (1984),

mas os grupos são diferenciados principalmente pelo local/modo de ocorrência e origem provável. Na Tabela 2.2 é apresentado o resumo da classificação mais recente dos canalículos e a Figura 2.3 ilustra os grupos de canalículos em esquemas pela forma de ocorrência.

Tabela 2.2 – Classificação dos grupos de canalículos (Jury e Paraguassu, 1990)

Grupo	Local / Modo de Ocorrência	Continuidade	Diâmetro Médio (cm)	Forma/ Inclinação	Preenchimento /Tipo	Paredes	Tipo de Solo	Origem Provável
I	Encostas e barrancos de igarapés	Contínuo no pé dos taludes	2,00 a 10,00	Irregular, ramificada ou anastomosada	Vazios ou parcialmente preenchidos	Laterizadas endurecidas e/ou oxidadas	Solos residuais coluviais e de planície de inundação	Lixiviação e erosão
II	Agrupados com densidade variável, eventualmente isolados	Contínuos (individualizados)	0,50 a 1,20	Seção circular de alongamento sinuoso sem ramificação/ subvertical	Vazio ou parcialmente preenchido/orgânico fecal	Endurecidas, lisas	Qualquer tipo de solo, sendo raro nos paleocanais	Escavação por minhoca
III	Isolados em pequena densidade	Descontínuos	2,00 a 30,00	Arredondada/ subvertical e inclinada	Parcialmente preenchidos / material pulverulento ou orgânico	Revestimento termítico	Solos residuais coluviais e de planície de inundação	Interação raízes e térmitas
IV	Agrupados em solo sedimentar sobrejacentes ao alvião	Contínuos	3,00 a 30,00	Irregular, ramificada a não ramificada/ variável	Abertos ou parcialmente preenchidos / material pulverulento	Oxidadas ou parcialmente laterizadas	Solo de planície de inundação	Erosão interna podendo apresentar atividade termítica a posterior
V	Agrupados em grande densidade em solo superficial	Não perceptível a olho nu	0,20	Ramificada / variável	Preenchidos ou vazios/ terrosos ou com finas raízes	Não perceptível a olho nu	Solos residuais e sedimentares	Interação – intemperismo, erosão, micro-organismo e mermes
VI	Ninho isolado em áreas restritas	Contínuos com pequenas profundidades e distância	1,00 a 8,00	Circular elíptica /SH e SV	Aberto ou parcialmente preenchido/termítico	Revestimento termítico	Solos residuais coluviais e de planície de inundação	Escavação por formigas e atuais cupins

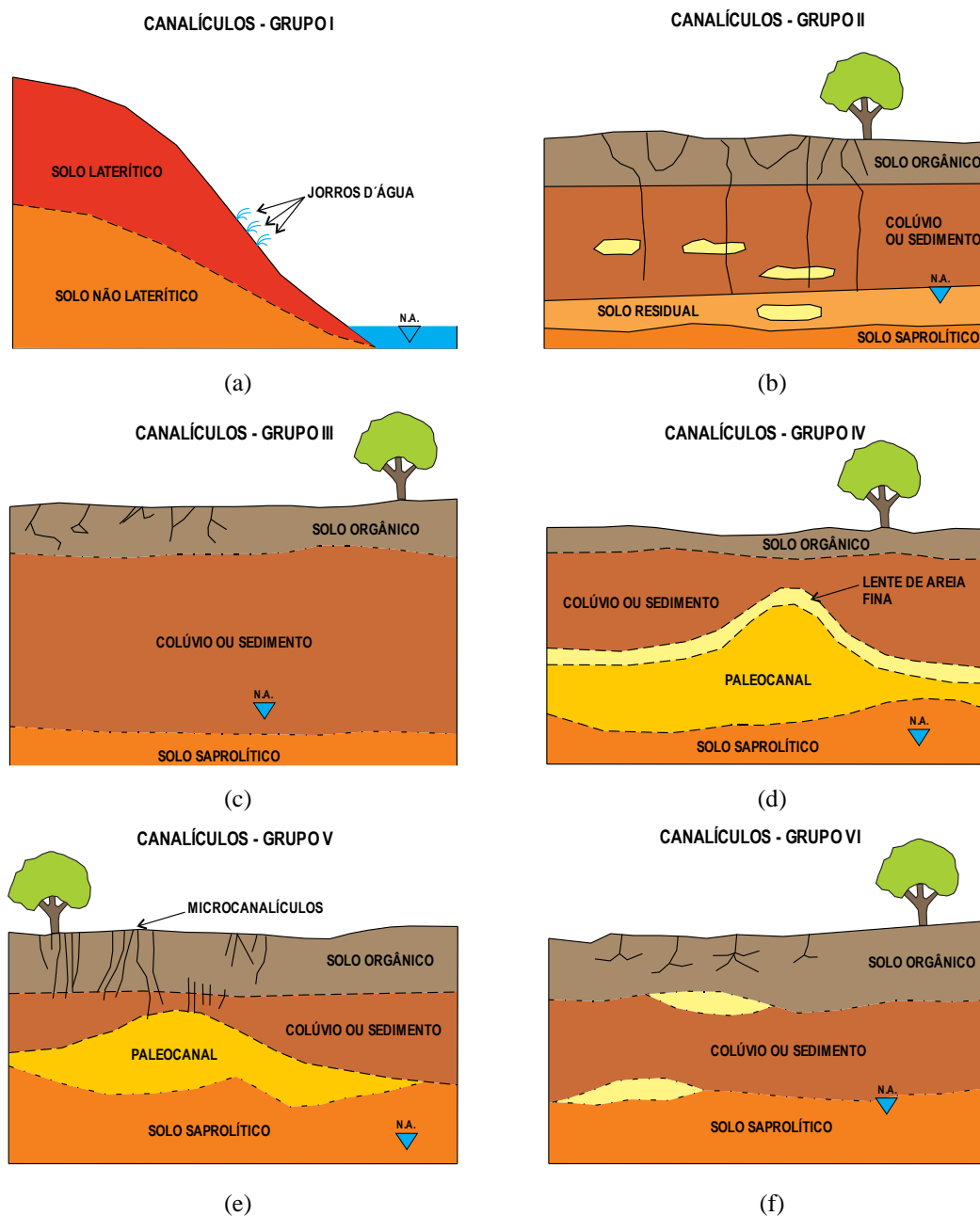


Figura 2-3 – Grupos de canalículos pela forma de ocorrência (Modificado de Jury e Paraguassu, 1990).

(a) Grupo I – Lixiviação/Erosão. (b) Grupo II – Minhocuçú. (c) Grupo III – Interação raízes – térmitas. (d) Grupo IV – Erosão com atividades termíticas a posteriore. (e) Grupo V – Interação de processos, intemperismo, erosão, micro-organismos, insetos, vermes e radículas. (f) Grupo VI – Atividade de cupins e formigas.

## 2.4 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO EM CAMPO

Segundo Sathler e Mesquita (1984), as investigações de ocorrência de canalículos iniciam-se com a análise dos resultados dos ensaios de infiltração efetuados em furos de sondagem e exame minucioso em poços de inspeção, trincheiras ou taludes de

escavações. Suspeitando-se da sua presença ou comprovando-se a sua ocorrência, as investigações de campo devem utilizar mecanismos de raspagem da porção orgânica superficial do solo e em alguns casos, após essa limpeza, soprá-la com jato de ar para remoção de material solto. Posteriormente são instalados piquetes para identificação dos canalículos e realizados ensaios de infiltração.

Em seguida, os canalículos que apresentaram maiores coeficientes de permeabilidade e vazão total da bomba serão selecionados para execução de ensaios de absorção de calda de cimento para posterior abertura de poços ou trincheiras ao longo dos canalículos. E depois de caracterizados e classificados, por meio de mapeamento detalhado das paredes escavadas e ensaios executados, os canalículos são cadastrados e definido o tratamento apropriado. As etapas de identificação em campo podem ser visualizadas na Figura 2-4.

Os métodos geofísicos podem ser consideravelmente úteis nas investigações de campo de canalículos em todas as fases do ciclo de vida de uma barragem, ou seja, tanto nas etapas de estudos quanto na operação do empreendimento. Cabe destacar, que essa metodologia sempre age de forma complementar às investigações diretas, tais como, poços de inspeção e trincheiras.

Os levantamentos geofísicos que comumente são usados na Engenharia de Barragens envolvem métodos sísmicos, eletromagnéticos e elétricos (SOARES, 1996; TEIXEIRA, 2013; PHILIPPE et al., 2017; KAYODE et al., 2018; ABDULSAMAD et al., 2019; ADAMO et al., 2020; MASI et al., 2020; MAALOUF, 2021; ZHAO et al., 2021;). Além disso, com intuito de detectar e caracterizar anomalias relacionadas à fluxos de percolação de água e erosão interna (*piping*) em fundações de barragens realiza-se técnicas combinadas como Eletrorresistividade (ETR), Potencial Espontâneo (SP) e radar de penetração no solo (GPR) ou ETR, sísmica de refração e GPR (TEIXEIRA, 2013; MAALOUF, 2021), ou seja, utilizando-se múltiplos levantamentos é possível proceder uma análise mais assertiva na caracterização de problemas geotécnicos (ZHAO et al., 2021).

A utilização de métodos gravimétricos para monitoramento de barragens não é algo usual, pois são mais utilizados em terrenos cársticos para avaliação grandes cavidades (SILVA JÚNIOR, 2006), mas a microgravimetria (MG) poderia contribuir de forma assertiva na identificação dos canalículos.





Figura 2-4 – Etapas de identificação em campo de canalículos para fundação de barragens (fotos do autor). (a) Raspagem mecânica e limpeza. (b) Identificação e classificação dos canalículos. (c) Teste de infiltração do canalículo. (d) Teste de injeção de calda de cimento no canalículo. (e) Execução de poços e trincheiras nos canalículos com maiores absorções. (f) Mapeamento detalhado das paredes das escavações.

Recomenda-se que os múltiplos levantamentos geofísicos sejam realizados nas mesmas seções geofísicas para proporcionar redundância de dados adquiridos, utilizando métodos distintos (SOARES, 1996). Outrossim, é interessante combinar múltiplas técnicas com análises dos resultados em 2D e 3D para condição de identificação do fluxo de percolação

de água (KIM et al., 2007), bem como, poderia ser extrapolado para caracterização de distribuição dos canalículos.

Segundo pesquisa experimental em laboratório de Maalouf (2021), em desacordo com outros autores (i.e. MASI et al., 2020), a técnica de resistividade elétrica (ETR) não foi adequada em detectar e monitorar a infiltração de água no maciço de uma barragem em pequena escala e, mais importante, a evolução para sua ruptura. Essa pesquisa também considerou os dados do monitoramento sísmico muito complexos e não linear. Além disso, mesmo não utilizando o GPR, considera-se que essa técnica para investigações em profundidades rasas poderia de fato identificar cavidades na estrutura da barragem de terra.

Neste contexto, o GPR combinado com a MG pode identificar e caracterizar cavidades tubulares em fundações de barragens (PHILIPPE et al., 2017), pois o GPR é capaz de identificar anomalias tubulares em profundidade rasa em alta resolução e a técnica de MG é capaz de detectar a geometria de cavidades. Além disso, deve-se realizar análises em 3D para avaliar a distribuição dos canalículos, pois essa informação é relevante para sua caracterização.

## 2.5 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO

Ensaio de laboratório em que se busca a determinação da permeabilidade do solo podem ser inviabilizados pela existência de canalículos – fato comum quando da existência de canalículos no solo –, uma vez que o corpo de prova representa pequena porção do subsolo e os canalículos podem ocorrer ao longo de toda seção longitudinal. Com isso, os valores determinados de permeabilidade se mostram bastante elevados mesmo em se tratando de solos que são, a partir dos ensaios tradicionais de granulometria, tipicamente argilosos. Na verdade, os ensaios determinam uma certa “condutividade hidráulica” que não deve ser chamada de permeabilidade do maciço como um todo.

Em função das características locais os canalículos podem ter abrangência relativamente estanque, de pequenas profundidades (2 a 3 metros) e não necessariamente intercomunicados. Cada situação deverá ser estudada a partir das características locais e da estrutura que se vai construir sobre o maciço.

Solos de um mesmo maciço natural, não necessariamente com as mesmas características geotécnicas podem apresentar permeabilidade da ordem  $10^{-8}$  ou  $10^{-9}$  m/s em camada mais profunda, enquanto na camada mais superficial, onde ocorrem canalículos, essas determinações podem não passar de  $10^{-5}$  m/s.

Os efeitos da ocorrência de canalículos de pequenas dimensões se mostram muito acentuados nos ensaios de permeabilidade, contudo seus efeitos nos ensaios de deformabilidade e resistência, a menos de canalículos de grandes dimensões, não ficam tão evidentes, necessitando de análise de confirmação de existência de canalículos para explicar alguns comportamentos anômalos.

Para ilustrar a ocorrência de canalículos a Figura 2-5 apresenta algumas amostras de um empreendimento de barragem. E como observação o colorido de tom azul / esverdeado é o resultado da utilização de traçadores para a identificação de intercomunicação topo e base.

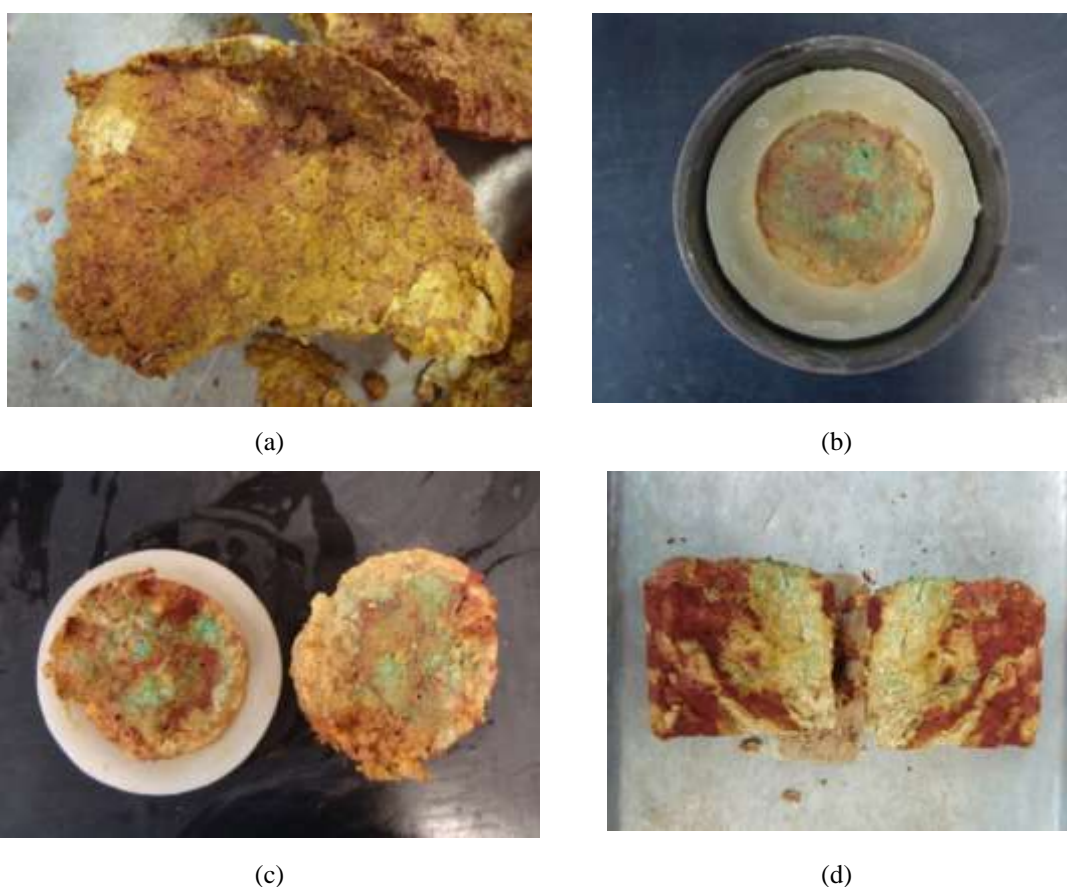


Figura 2-5 – Canalículos observados em ensaios de permeabilidade (fotos do autor). (a) Presença de canalículos disseminados. (b) Vista do topo da amostra no permeâmetro. (c) Vista do topo (esquerda) e

base (direita) da amostra, após ensaio de permeabilidade. (d) Vista de amostra partida ao meio, apresentando canalículos subhorizontais.

Solos com existência de canalículos também podem apresentar acentuada deformabilidade nos ensaios de laboratório (adensamento) e que eventualmente não retratam o comportamento no campo. Fato semelhante pode ocorrer para os ensaios de resistência (triaxial CU) os quais variações de volume durante o processo de consolidação dos corpos de prova para baixos valores de tensão confinante podem tão elevados quanto para tensões de consolidação mais elevadas. Isso leva as envoltórias de resistência que devem ser analisadas tendo-se em mente a existência dos canalículos no maciço.

## 2.6 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÕES COMPUTACIONAIS

Atualmente contamos com análises de percolação, tensão e deformação assessoradas por ferramentas computacionais que permitem o auxílio no estudo do comportamento de fundações com a presença de canalículos. Também possibilita a verificação de hipóteses, critérios e parâmetros utilizados no projeto, permitindo a adaptação de métodos construtivos que garantam condições mais econômicas mantendo a segurança da barragem.

Dentre os métodos de análises pode-se citar o Método dos Elementos Finitos (MEF) como um procedimento numérico para modelagem detalhada da geometria e interface fundação-estrutura. Ao incorporar as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo nos elementos finitos, o MEF possibilita a simulação do fluxo de água através do solo, bem como estudos de tensão-deformação. Isso inclui considerações sobre a permeabilidade do solo, o gradiente hidráulico e os gradientes de pressão que podem ocorrer sob diferentes condições de carregamento.

Cabe ressaltar que a principal causa do *piping* são os altos gradientes hidráulicos (percolação) na fundação ou maciço.

Tanto nas fases de projeto quanto durante a operação, essa última associada a instrumentação hidrogeotécnica, é possível realizar simulações computacionais e prever cenários e verificar hipóteses. Assim sendo, as barragens com registros históricos da presença de canalículos podem contar com o apoio de softwares para o seu monitoramento de segurança de barragens.

Outrossim, o trabalho de Limberger *et al.* (2023) faz parte de um projeto, intitulado “Modelo de previsibilidade de evolução de canalículos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens” com o objetivo de investigar o fenômeno de formação dos canalículos, sua evolução e seus impactos em obras como barragens.

Li e Pan (2021) apresenta outro exemplo de utilização de recursos computacionais utilizando o software HYDRUS (2D/3D) para análise de fluxo de água e transporte de cloreto de sódio em núcleos (barreiras) de solo compactados com NaCl nos maciços de barragens rurais. Essas barreiras são construídas na China para prevenção de canalículos gerados por ação de térmitas. A longevidade de barragens rurais sob ação de cuins pode chegar a 50 anos de idade com a construção de barreiras de solo misturados com NaCl.

## 2.7 TRATAMENTOS DE FUNDAÇÕES

Segundo Mello (1987) a conceituação básica do tratamento para fundações com ocorrência de canalículos originou-se na preocupação de que fluxos concentrados nas cavidades tubulares pudessem gerar vazões localizadas incontroláveis, com potencial de carreamento de material, culminando em uma ruptura da barragem.

Algumas soluções foram estudadas (Sathler e Mesquita, 1984; Barradas, 1985; Mello, 1987; Moreira *et al.*, 1990; Limberger *et al.*, 2023) para o tratamento de fundações com canalículos, são elas:

- a) Estudos da penetrabilidade ou injetabilidade dos canalículos, a partir do jateamento com ar comprimido e injeção com calda de cimento dos canalículos expostos;
- b) Trincheira de vedação até material com baixa permeabilidade;
- c) Trincheira de vedação com camada de concreto no fundo e injeções de calda de cimento;
- d) Aplicação de manta geotêxtil, solo cimento ou transições na face de jusante da trincheira de vedação;
- e) Sistemas de filtros ou Poços de alívio à jusante associados à trincheira de vedação;
- e
- f) Parede diafragma de concreto e injeções de calda de cimento.

O tratamento por injeção do solo residual visa criar uma zona na qual se elimina a existência de valores elevados de permeabilidade, homogeneizando a região tratada, que poderá passar a ser analisada em termos de valores médios. Pois, quanto maior é a probabilidade de canalículos serem obturados, gerando maior eficiência do tratamento (Barradas, 1985).

As pressões de injeção foram especificadas de forma a causar fraturamento hidráulico nos pontos de válvulas manchetes, criando planos de calda no solo, sendo os canalículos penetrados e obturados pela calda injetada (Barradas, 1985). Porém, existe o risco desse processo provocar caminhos preferenciais internos indesejados na fundação.

A dosagem da calda de cimento também influencia o comportamento do preenchimento dos canalículos, sendo importante os estudos de penetrabilidade.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tem o intuito de realizar uma releitura sobre a temática de canalículos e seus aspectos geológicos-geotécnicos frente às questões de Segurança de Barragens. Além disso, contribuir com outros métodos de investigações e análises não considerados em pesquisa de canalículos.

O processo de formação de canalículos também pode ser considerado um processo erosão subterrânea interna (*piping*) associado ao fenômeno de esqueletização e somado ou não com a ação biológica; dependendo das características, físico-químicas, mineralógicas do solo e condições ambientais.

A ocorrência dos canalículos pode provocar mudanças no comportamento hidráulico e mecânico do solo criando uma anisotropia extremamente complexa, pelo aumento da porosidade e infiltração de água no solo.

A permeabilidade de uma fundação depende da porosidade intergranular do solo e dos “defeitos” estruturais. Neste sentido, a presença de canalículos em quantidades e dimensões variáveis terá um efeito direto nos valores de condutividade hidráulica do solo.

Eles também podem influenciar a deformabilidade do solo e apresentar comportamento colapsível quando saturados ou recalques acentuados quando submetidos às sobrecargas.

Outra influência significativa está relacionada à diminuição da estanqueidade da barragem, a partir de excessiva percolação de água pela fundação, podendo provocar em último caso a ruptura da estrutura da barragem ou taludes.

Por isso, deve-se proceder investigações e análises em campo, laboratório e recursos computacionais com o intuito de mapear e classificar os canalículos. O uso de métodos geofísicos também é uma alternativa complementar às sondagens. Os estudos prévios permitem um entendimento importantíssimo para o a fase de projeto de barragens que devem ser detalhados à medida que se avança nas etapas até a sua construção. E nesta fase deverão ser considerados tratamentos específicos, visando a mitigação desse fenômeno.

Durante o monitoramento e controle na fase de operação da barragem com histórico de canalículos nas fundações ou sua localização na região amazônica, a gestão de Segurança de Barragens deve considerar a avaliação criteriosa do comportamento dos instrumentos de percolação (piezômetros, medidores de nível d'água e vazão) e deve-se utilizar métodos probabilísticos para mitigação de riscos.

Por fim, a contribuição deste artigo para Engenharia e Segurança de Barragens é da recomendação do uso combinado de diferentes métodos de investigações de campo, laboratório e computacionais para identificação, classificação, análise e monitoramento de fundações com presença de canalículos.

## 4 REFERÊNCIAS

ABDULSAMAD, F.; REVIL, A.; AHMED, A.S. (2019) **Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments.** *Engineering Geology*. V. 254. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.001>

ADAMO, N.; AL-ANSARI N.; SISSAKIAN, V.; LAUE, J.; KNUTSSON, S. (2020) **Geophysical Methods and their Applications in Dam Safety Monitoring.** *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Vol.11, No.1, 2020, 291-345 <https://doi.org/10.47260/jesge/1118>

AB'SABER, A. (1979) **Sobre a ocorrência de cavidades pedo-kársticas no sítio da barragem de Tucuruí (Pará).** Relatório da Eletronorte, 8 p.

ASSAD, M.L.L. (1997) **Fauna do solo**. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. *Biologia dos solos dos Cerrados*. Planaltina, EMBRAPA - CPAC, pp. 363-443.

BARRADAS, S. S. (1985) **Iniciação e Propagação de Fraturas Induzidas por injeções em solos argilosos com canalículos – Aplicação ao tratamento do solo residual da fundação da barragem de terra da UHE Balbina**. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ.

BJORNBERG, A.J.S. (1992) **Microestrutura dos solos**. In: MESA REDONDA: SOLOS DA CIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 12-14 mai., 1992. Anais. São Paulo, ABMS/ABEF, pp. 95-109.

BUOSI, M.A. & CADMAN, J.D. (1984) **Sobre a ocorrência de cavidades tubulares em solos lateríticos na região amazônica**. In: IV CBGB, Belo Horizonte, Anais. São Paulo, ABGE, 1984, v. 3, pp. 19-24.

BUOSI, M.A.; VALERIO, A.; MESQUITA, J. B. (1981) **Barragem de Terra e Enrocamento de Tucuruí**. In: Condicionamentos Geológico-Geotécnicos e Tratamentos das Fundações ABGE, 1981, Itapema. 3º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Itapema, SC.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; COUTINHO, R.Q. (2012) **A infiltração e os fenômenos da inundação, erosão e esqueletização do maciço**. In: José Camapum de Carvalho; Gilson de Farias Neves Gitirana Junior; Eufrosina Terezinha Leão de Carvalho. (Org.). *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. 1ed.Brasília: Faculdade de Tecnologia, v. 1, pp. 543-564.

CAMAPUM, J.C, SALES, M.M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J.A.; MOTTA, N.O.; FRANCISCO, R.A. (2006) **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**, Brasília - Universidade de Brasília - FINATEC, cap. 2, pp.48-55.



CNEC (2014) **Estudos de Viabilidade do AHE São Luiz do Tapajós. – Relatório Final – Volume 6 – Apêndice B – Geologia e Geotecnia – Tomo1/3 – Texto**. Estado do Pará, Relatório n°. NE389-GE-000-RF-0001, 2014, pp. 18 e 123

FONTES, L.R.O. (1984) **Sinais fósseis da ação de cupins**. Ciência Hoje, 2, (12): pp. 52-55.

GUIDICINI, G.; BARTORELLI A. (2023) **Barragens na região amazônica: condicionantes fisiográficos, geológicos e paleoclimáticos**. 1ª Ed., São Paulo: ABGE. pp. 223-228.

HARGERTY, D.J. (1991) **Piping/ sapping erosion**. In: basic consideration. Journal of Hydraulic Engineering, 117 (8): pp. 991 – 1008.

HOLT, J.A.; LEPAGE, M. (2000) **Termites and soil properties**. In: ABE, T. et al. (Eds.). Termites, evolution, sociality, symbiosis, ecology. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000. pp.389-407.

LEE, K.E & WOOD, T.G. (1971) **Termites and soils**. Australia, C.S.I.R.O. Division of Soil, 151 p.

LI Y.; PAN D-Z. (2021) **Barrier Longevity of NaCl-Laden Soil against Subterranean Termites in an Earth Embankment**. *Sustainability*. v.13(23):13360. <https://doi.org/10.3390/su132313360>.

LIMBERGER, A. E; BOAVENTURA M. B.; RODRIGUES R. L.; COSTANTIN FILHO M. A.; FERNANDES D. O.; KRAJEWSKI E. D.; LIMA L. C. (2023) **Ocorrência de Canalículos em Fundações de Barragens da Região Amazônica - Estado da Arte**. In: XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu - PR, Anais. CBDB, Tema 29, pp. 19-24.

JURY, W. J.; PARAGUASSU, A. B. (1990) **Considerações sobre a ocorrência de Canalículos em locais de Barragem na Região Amazônica**. In: Congresso Brasileiro

de geologia de Engenharia, 6, 1990, Salvador. In: VI CBGE e IX COBRAMSEF. Salvador: ABMS/ABGE. v.1.

KAYODE, O.T.; ODUKOYA, A.M.; ADAGUNODO, T.A.; ADENIJI A.A. (2018) **Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review**. 2nd International Conference on Science and Sustainable Development. Earth and Environmental Science V. 173, n. 012026 doi :10.1088/1755-1315/173/1/012026

KIM, J-H; YI, M-J; SONG, Y.; SEOL, S. J.; KIM K-S. (2007) **Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam**. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. V.12 (2): 221–235. <https://doi.org/10.2113/JEEG12.2.221>.

MAALOUF, Y. (2021) **Use of geophysical techniques for the detection and monitoring of water flow and internal erosion in porous media: Application to earth dams**. (Doctoral Thesis in Geophysics) Institut des Sciences de la Terre, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France.

MACHADO, A. B. (1983) **Inspecção dos canalículos nos solos residuais das áreas das usinas hidrelétricas de Tucuruí (PA), Balbina (AM) e Samuel (RO)**, Relatório da Eletronorte, 25 p.

MASI, M.; FERDOS, F.; LOSITO, G.; SOLARI, L. (2020) **Monitoring of internal erosion processes by time-lapse electrical resistivity tomography**. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125340>

MASSAD, F. (2005) **Escavações a Céu Aberto em Solos Tropicais: Região Centro - Sul do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos. 96 p.

MELLO, V. (1987) **Técnica usada na injeção reduz a permeabilidade do solo residual, UHE Balbina**. Revista da Construtora Andrade Gutierrez.

MOREIRA, J. D.; HERKENHOFF, C. S.; LOPES, A. S.; SIQUEIRA, G. H; AVILA, J. P. (1990) **Comportamento dos Tratamentos de Fundação das Barragens de Terra de Balbina**. In: Congresso Brasileiro de geologia de Engenharia, 6, 1990, Salvador. In: VI CBGE e IX COBRAMSEF. Salvador: ABMS/ABGE, v.1.

PHILIPPE, S.; VOJTECH, B.; VLADIMIR, B.; HELEN, K.; RON, B. (2017) **Post flooding damage assessment of earth dams and historical reservoirs using non-invasive geophysical techniques.** *Journal of Applied Geophysics.* V.146. doi:10.1016/j.jappgeo.2017.09.006

PIMENTA, C. BERTOLUCCI, J. C; LOZANO, M. H. (1981) **Escavação experimental em arenito Bauru.** In: III CBGE, Itapema, Anais.

SATHLER, G. & MESQUITA, J.B. (1984) **Canalículos: sugestões de classificação e metodologia de investigações de campo.** In: IV CBGB, Belo Horizonte, Anais. São Paulo, ABGE, v. 3, pp. 407-414.

SILVA JUNIOR, J. S.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R. (2006) Aplicação dos métodos gravimétrico e eletroresistivimétrico-IP em área de risco geotécnico do sistema aquífero cárstico em Almirante Tamandaré-PR. *Revista Brasileira de Geofísica.* V. 24 (3) <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300009>

SOARES, L. F. C. (1996). **Método geofísicos aplicados à avaliação das condições geotécnicas em barragem de terra.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

TEIXEIRA, W. L. (2013) **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do Dique de Sant Llorenç de Montgai – Espanha.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte -RN.

ZHAO, M.; LIU, P.; JIANG, L.; WANG, K. (2021) **The Influence of Internal Erosion in Earthen Dams on the Potential Difference Response to Applied Voltage.** *Water,* V.13, n.3387. <https://doi.org/10.3390/w13233387>