

Permeabilidade, Drenagem e Instrumentação em Maciços: Estudo e Aplicações em Barragens

Permeability, Drainage, and Instrumentation in Massifs: Study and Applications in Dams

Marcelo de Paula Barreto¹; Sidnei Helder Cardoso Teixeira²; Andres Miguel Gonzalez Acevedo³; Alex Martins Calcina⁴; Soraia Bastos Katereniuk⁵

- ¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: mpbarretonline@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1295-0497>
- ² Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: s.teixeira@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3522-1706>
- ³ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: andres.gonzalez@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3749-2278>
- ⁴ Instituto Paulista de Educação em Engenharia (IEEP), Departamento de Engenharia Civil, São Paulo/SP, Brasil. Email: amc@intertechne.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8961-4249>
- ⁵ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: eng.sbk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1019-3829>

Resumo: Este artigo aborda a influência da permeabilidade e velocidade de percolação da água em maciços de solo, destacando sua variação conforme a granulometria e a sensibilidade à quantidade de água presente. A permeabilidade está diretamente ligada à porosidade do meio, influenciando na drenagem do solo. São apresentadas tabelas com características de permeabilidade e drenagem de diversos tipos de solo, assim como valores consolidados médios de permeabilidade de materiais comuns em construção de aterros de barragens e suas fundações. Discute-se também os efeitos negativos da infiltração de água em barragens de aterro, como deslocamento e lixiviação de partículas de solo, ressaltando a importância de sistemas de drenagem adequados. Além disso, são descritos critérios empíricos e modelos probabilísticos para o dimensionamento de sistemas de drenagem e filtração de barragens, visando controlar os fluidos percolantes e garantir a segurança das estruturas. A instrumentação em barragens, especialmente no território brasileiro, também é abordada, destacando seu papel fundamental na monitorização e controle das estruturas.

Palavras-chave: Permeabilidade; Drenagem; Maciços de solo; Barragens; Instrumentação.

Abstract: This article addresses the influence of permeability and water percolation velocity in soil masses, highlighting their variation according to grain size and sensitivity to the amount of water present. Permeability is directly linked to the medium's porosity, influencing soil drainage. Tables are presented with permeability and drainage characteristics of various types of soil, as well as average consolidated permeability values of common materials used in dam embankments and their foundations. The negative effects of water infiltration in embankment dams are also discussed, such as soil particle displacement and leaching, emphasizing the importance of adequate drainage systems. Additionally, empirical criteria and probabilistic models for the design of drainage and filtration systems for dams are described, aiming to control percolating fluids and ensure the structures' safety. Instrumentation in dams, especially in Brazilian territory, is also addressed, highlighting its fundamental role in the monitoring and control of structures.

Keywords: Permeability; Drainage; Soil masses; Dams; Instrumentation.

Recebido: 27/04/2024; Aceito: 21/02/2025; Publicado: 07/03/2025.

1. Introdução

O dimensionamento de barragens é um processo complexo que envolve diversos critérios e cuidados para garantir sua estabilidade e segurança, incluindo a importância do sistema de drenagem interno para reduzir o risco de acidentes. Problemas como poluição, degradação ambiental e conservação da natureza estão ligados à ação humana e à falta de planejamento ambiental. A necessidade de constante desenvolvimento nas legislações de diferentes países em relação à construção e monitoramento de barragens de rejeitos é destacada, especialmente após os desastres de Mariana e Brumadinho. No Brasil, a Lei 14066/2020 foi instituída para regulamentar a Política Nacional de Segurança de Barragens, visando eliminar os riscos de acidentes, que podem ser resultantes de diversos fatores.

A conscientização sobre a probabilidade de ruptura em barragens é importante, apesar dos esforços governamentais, pois o Brasil ainda enfrenta numerosas ocorrências anuais de incidentes em barragens. A segurança das barragens também tem um impacto ambiental significativo, destacando a importância de considerar as restrições ambientais no desenvolvimento de projetos.

Do ponto de vista tecnológico, o avanço computacional facilita o processamento de dados de instrumentação e permite uma monitorização mais eficiente e segura das barragens. Socialmente, as barragens desempenham um papel importante no desenvolvimento econômico e social, fornecendo energia elétrica, apoio ao abastecimento local, contenção de cheias e áreas de lazer, embora a competição pela água seja crescente, especialmente em regiões áridas. Economicamente, o potencial hidrelétrico do Brasil é significativo, sendo o seguro de barragens uma forma importante de proteção financeira.

Barreto (2024) destaca que os avanços tecnológicos, especialmente no campo dos métodos numéricos e computacionais, têm desempenhado um papel fundamental na garantia da segurança durante a concepção, construção e operação de barragens. A escolha do tipo de barragem está diretamente relacionada às características do local, à disponibilidade de materiais e ao processo construtivo. Entre as mais comuns, as barragens homogêneas de terra e as mistas de terra e enrocamento se destacam, pois, sua adaptação às condições topográficas e aos materiais disponíveis permite a construção sobre fundações versáteis e adequadas a solos resistentes.

A permeabilidade e drenagem de maciços de solo são aspectos fundamentais em projetos de engenharia civil, especialmente em obras como barragens, sendo essencial para a estabilidade e durabilidade das estruturas. Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise detalhada da permeabilidade e drenagem de solos em maciços, destacando sua importância e influência em diferentes tipos de projetos, além de abordar o papel da instrumentação na monitorização de barragens.

2. Metodologia

A pesquisa foi realizada com base em revisão bibliográfica de obras e artigos científicos relacionados ao tema. Foram consultados autores como Terzaghi (1996), Lambe e Whitman (1969) entre outros, que abordam aspectos teóricos e práticos da permeabilidade e drenagem em maciços de solo. Também foram analisadas tabelas e dados consolidados de permeabilidade de diversos materiais comumente encontrados em construções de barragens.

Para a parte de instrumentação, foram consultados trabalhos de Gaioto (2003), Eletrobrás (2003), Silveira (2006), entre outros, que discutem a importância da instrumentação na monitorização de barragens.

A pesquisa foi complementada com a análise de conclusões de estudos recentes. Constatou-se que a utilização de medidores de vazão triangular é fundamental para o monitoramento preciso das vazões em barragens. A correta instalação e dimensionamento desses dispositivos garantem resultados confiáveis, contribuindo para a segurança das estruturas.

Lopes (2024) destaca a preocupação crescente com a estabilidade hidráulica de barragens de terra, levando à aplicação de modelos de fluxo em meios porosos e à formulação de modelos numéricos para resolver equações diferenciais que descrevem o fluxo de percolação hídrica. As equações diferenciais parciais que governam a percolação da água em aquíferos livres ou confinados em um domínio tridimensional constituído de material heterogêneo e anisotrópico descrevem o fluxo hídrico transiente através do maciço e da fundação de barragens de terra, submetido a um gradiente hidráulico natural.

A segurança de uma barragem, conforme estabelecido pela Política Nacional de Segurança de Barragens, deve ser considerada em todas as suas fases de existência, incluindo projeto, construção e operação. Durante o projeto, é importante o dimensionamento adequado e a consideração das simplificações adotadas. Na fase de construção, a conformidade com os critérios estabelecidos no projeto executivo é fundamental, enquanto na operação, o foco está no monitoramento contínuo da estrutura."

É importante ressaltar a importância da instrumentação adequada em barragens, incluindo medidores de vazão, sensores de nível, piezômetros, entre outros, para o monitoramento eficaz das estruturas. A análise detalhada da permeabilidade e drenagem de maciços de solo, juntamente com o uso de dispositivos de monitoramento adequados, é essencial para garantir a segurança e durabilidade das barragens.

Barreto (2024) destaca que o principal objetivo da pesquisa é consolidar dados reais do histórico de monitoramento de obras executadas e operacionais no Brasil, contribuindo para a análise da instrumentação por meio da inclusão de valores reais de vazão observados nos medidores de vazão.

Barreto (2024) discute um conjunto de soluções voltadas tanto para situações de emergência quanto para o longo prazo, com o objetivo de mitigar anomalias associadas ao início da erosão interna em barragens. Dando ênfase à prevenção do piping, o estudo ressaltar a importância dessas medidas para a preservação da integridade estrutural e da segurança dessas infraestruturas. Entre as abordagens apresentadas, destacam-se o uso de filtros invertidos, poços de alívio e diques interceptores, que desempenham um papel fundamental na contenção da surgência de água e na redução do carreamento de materiais, fatores essenciais para minimizar os riscos de instabilidade em barragens de terra e enrocamento.

2.1 Permeabilidade e drenagem

A permeabilidade e drenagem do solo são características intrínsecas aos maciços, influenciadas pela sua composição granulométrica. Solos com maior índice de vazios tendem a ser mais porosos e, portanto, mais permeáveis. A água presente no solo pode percolar através dos poros, sendo sua velocidade de percolação variável conforme a granulometria do solo.

Os solos com maior índice de vazios representam maior porosidade do meio, o qual consequentemente são mais permeáveis (LAMBE E WHITMAN, 1969).

Tabela 1 – Permeabilidade e Drenagem dos Solos.

k (cm/s)	Permeabilidade	Drenagem	Tipo de solo		k (cm/s)
1,00E+02	elevada	boa	Pedregulhos limpos		1,00E+02
1,00E+01					1,00E+01
1,00E+00			Areia limpa, areia limpa e mistura de pedregulho		1,00E+00
1,00E-01					1,00E-01
1,00E-02	média	pobre	areia muito fina, silte orgânico e inorgânico, mistura de silte arenoso e argila, depósito de argila estratificada, etc.	solo "impermeável" modificado pelos efeitos da vegetação e intemperismo	1,00E-02
1,00E-03					1,00E-03
1,00E-04	baixa				1,00E-04
1,00E-05					1,00E-05
1,00E-06	muito baixa	praticamente impenetrável	solo "impermeável", argilas homogêneas abaixo da zona intemperizada		1,00E-06
1,00E-07					1,00E-07
1,00E-08	praticamente impermeável				1,00E-08
1,00E-09					1,00E-09

Fonte: Adaptada de Terzaghi et. al (1996).

A infiltração de água em barragens de aterro pode causar deslocamento e lixiviação de partículas, sendo importante o uso de sistemas de drenagem eficientes para evitar tais problemas.

Apresentado na TABELA 2 os critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens, destaca-se ainda que Silveira (1965) propõe um modelo probabilístico para avaliar a capacidade de retenção de partículas de um filtro a partir da distribuição dos diâmetros (ASSIS, 2003).

Tabela 2 – Sistemas de Drenagem e Filtração.

Autor	Material Adjacente	Critério de Filtro	Principais Características
Terzaghi (1922)	Areia uniforme	$D_{15}/d_{15} > 4 - 5$ e $D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	Baseado na experiência do autor.
US Bureau of Reclamation (1963)	$C_u = 3 - 4$ (solos não coesivos)	$5 < D_{50}/d_{50} < 10$ (areia fina)	D ₁₀₀ < 75 µm D ₅ > 0,074 mm e as frações finas dos materiais do filtro e do solo adjacente devem ter granulométricas paralelas.
	$C_u > 4$ (solos bem graduados)	$12 < D_{50}/d_{50} < 58$ e $12 < D_{15}/d_{15} < 40$ (partículas arredondadas)	
		$9 < D_{50}/d_{50} < 30$ e $6 < D_{15}/d_{15} < 18$ (partículas angulares)	
Vaughan e Soares (1982)	-	$kF < 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot \delta d^{1,52}$	δ em µm.
Sherard e Dunnigan (1985)	Siltes finos e Argilas (+ 85% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} \leq 9$	Filtros de solos finos (mais de 40% < 0,074 mm) devem ter menos de 60% mais grosseiro que 4,76 mm e tamanho máximo de partícula de 50 mm. Para condutividade hidráulica propõe $D_{15}/d_{85} < 3 - 5$.
	Siltes e Areia Argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7$ mm	
	Material intermediário (15 a 40% < 0,074 mm)	$D_{15} = (40 - A / 40 - 15) \cdot ((4 \cdot d_{85}) - 0,7) + 0,7$ mm	
	Material Grosso (- 15% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	

Fonte: Assis (2003).

Legenda:

C_u = corresponde ao coeficiente de não-uniformidade do solo, dado pela relação d_{60}/d_{10} .

D_n = é diâmetro máximo (mm) das % partículas mais finas do material do filtro;

d_n = é o diâmetro máximo (mm) das % partículas mais finas do material adjacente ao filtro;

kF = condutividade hidráulica do filtro;

δ = é o diâmetro equivalente representativo das partículas do solo adjacente ao filtro, frequentemente $\square = d_{85}$,

A = é a porcentagem de partículas (%), do material adjacente ao filtro, menores que 0,074 mm.

2.2 Medição de vazão

Quanto à instrumentação, ao longo dos anos ela tem se consolidado como parte indispensável em projetos de barragens, essencialmente com o objetivo principal de monitorar as principais grandezas de uma estrutura imposta a carregamentos e esforços.

Para que a instalação do medidor de vazão triangular proporcione resultados confiáveis, alguns elementos são fundamentais para a medição. Estes incluem uma placa metálica com geometria de abertura triangular instalada no término

da bacia do vertedouro, transversalmente ao fluxo de água. Além disso, é necessário o uso de um dispositivo tranquilizador de fluxo, que pode ser um dissipador com parede corta fluxo ou uma placa perfurada de inox/PVC rígido. O acabamento deve ter uma superfície hidráulica o mais linear possível. A bacia de contenção do medidor de vazão deve ter seu comprimento maior igual a 10 vezes a largura do canal. É importante também atentar-se à posição da placa de medição em relação ao fundo do canal, para não trabalhar afogado (SILVEIRA, 2006).

Os medidores de vazão do tipo triangular têm uma capacidade máxima de leitura de 8000l/min, equivalente a 130 l/s. Entretanto, é indicado que este funcione numa faixa de leituras de 0l/min a 600l/min para medidores do tipo triangular, em particular recomenda-se sua utilização para medições inferiores a 1800 l/min (30l/s) (SILVEIRA, 2006).

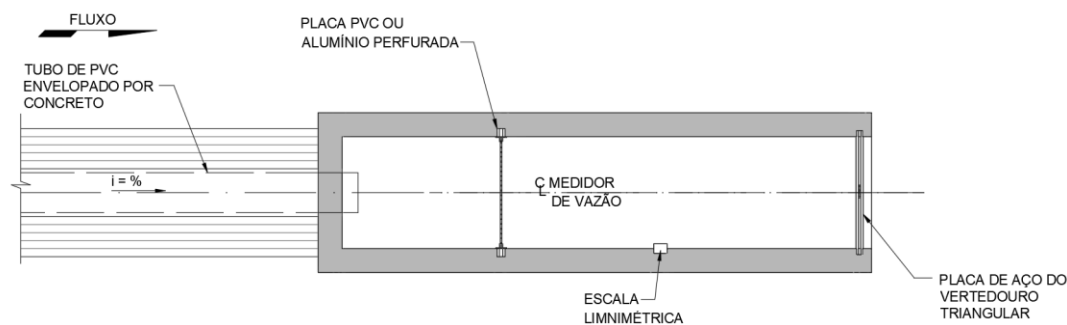


Figura 1 – Medidor de Vazão (Planta).

Fonte: Barreto (2023).

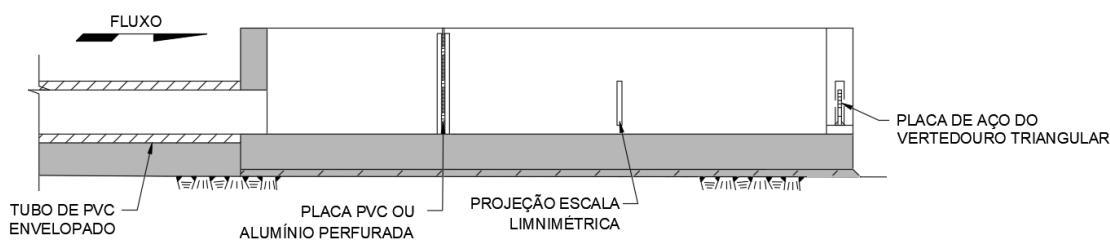


Figura 2 – Medidor de Vazão (Perfil Longitudinal).

Fonte: Barreto (2023).

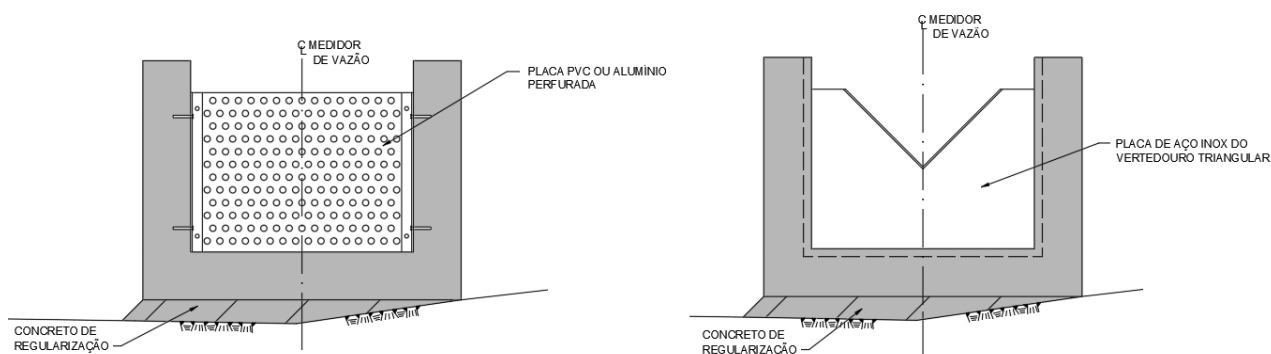


Figura 3 – Medidor de Vazão (Corte e Vista).

Fonte: Barreto (2023).

A instalação do medidor de vazão triangular em regiões confinadas com encosto (abraço) da barragem a alguma estrutura de concreto, a jusante da barragem de terra e enrocamento é possível executar uma mureta acompanhado o pé do

talude da barragem, executando-se o medidor de vazão na região mais adequada para saída de drenagem (SILVEIRA, 2006).

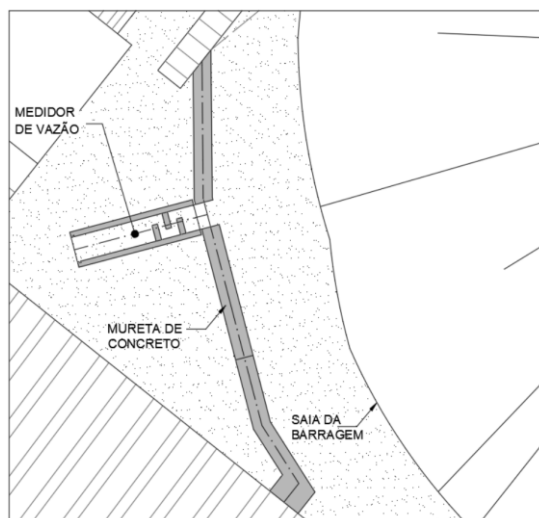


Figura 4 – Medidor de Vazão com Mureta Externa (Planta).
Fonte: Barreto (2023).

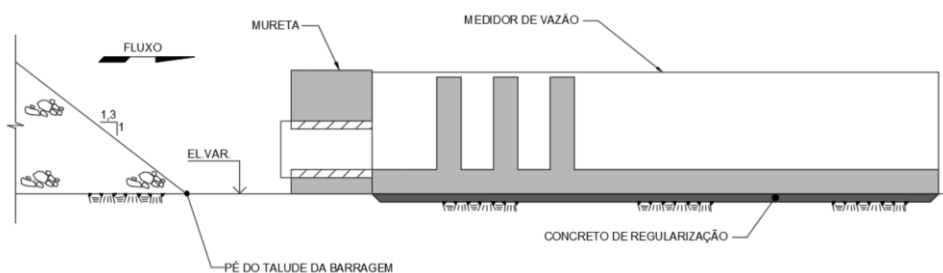


Figura 5 – Medidor de Vazão com Mureta Externa (Perfil Longitudinal).
Fonte: Barreto (2023).



Figura 6 – Medidor de Vazão com Mureta Externa (Implantação).
Fonte: Barreto (2023).

Para calcular as vazões com medidores de vazão triangulares utiliza-se a equação (1) a seguir observando as dimensões da FIGURA 7. Para medidores do tipo triangulares com abertura de 90°, em decorrência das fórmulas apresentadas é possível obter de forma gráfica a vazão em litros por segundo por correlação:

$$Q = \frac{8}{19} \cdot Cd \cdot \sqrt{2g} \operatorname{tg}(\alpha / 2) h^{5/2} \quad (1)$$

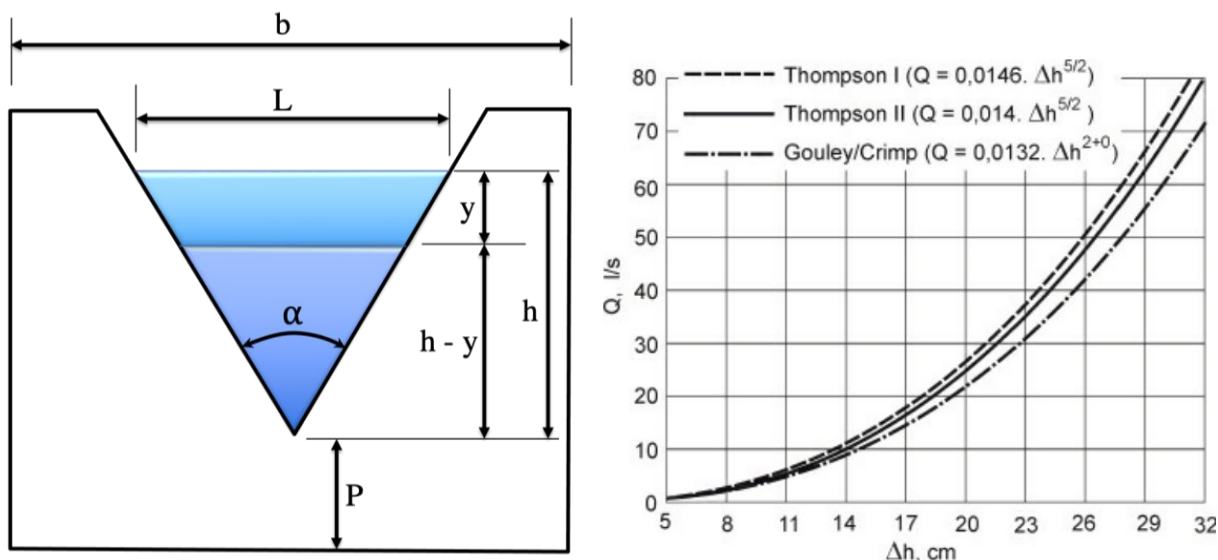


Figura 7 – Esquema do Medidor Tipo Triangular.

Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

Legenda:

Cd = coeficiente de vazão (Bazin, Rehbock, Francis ou Kindsvater & Carter (MELLO PORTO, 2001);

g = aceleração da gravidade;

α = ângulo de abertura do medidor

h = altura da lâmina vertical em relação ao vértice do medidor.

O medidor mais utilizado é o com o ângulo de 90° na placa, onde pode-se calcular as vazões pelas equações de Thompson ou Gouley e Crimp.

$$\text{Thompson I: } Q = 1,46 \cdot h^{5/2} \quad (2)$$

$$\text{Thompson II: } Q = 1,40 \cdot h^{5/2} \quad (3)$$

$$\text{Gouley e Crimp: } Q = 1,32 \cdot h^{5/2} \quad (4)$$

Para que os resultados sejam avaliados, devem satisfazer os seguintes critérios limites que são:

$$0,05 < h < 0,38\text{m}$$

$$P > 3h$$

$$b > 6h$$

A figura 8 indica o exemplo de cálculo pela fórmula de Thompson com resultados tabelados correlacionados com as medições através da leitura da régua limnimétrica para obtenção da vazão do vertedouro triangular.

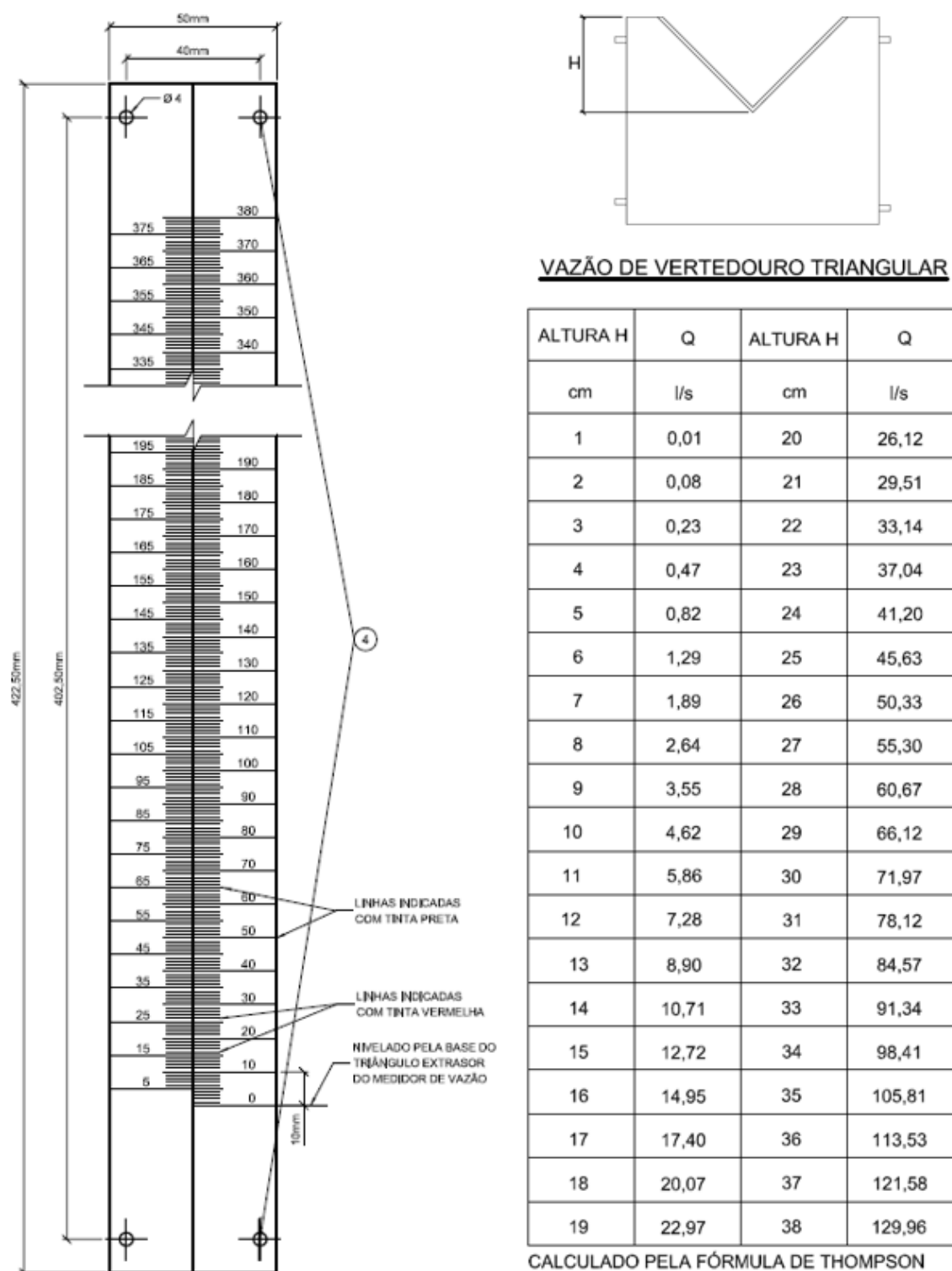


Figura 8 – Leitura da Régua (Thompson).

Fonte: Intertechne (2022).

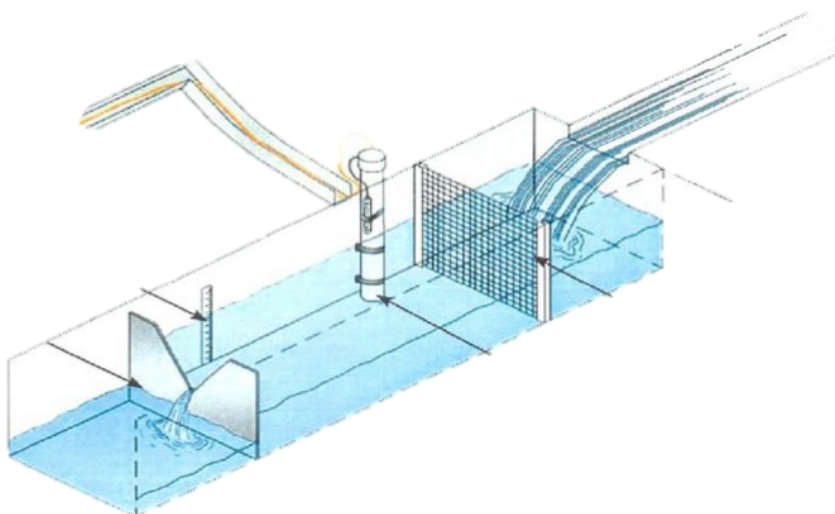
Durante a campanha de leituras nos medidores de vazão de uma barragem é preciso estar atento a coloração da água, se a mesma está saindo limpa ou turva, pois, além de atenção a aumento de vazões, deve-se verificar quantidade de sedimentos sugerindo um possível carreamento de sólidos de origem do núcleo da barragem (SILVEIRA, 2006).

Na figura 9 é apresentado um exemplo de um medidor de vazão em operação, com detalhe este executado com muretas em concreto, com uma canaleta tipo meia-cana a jusante para direcionamento das águas ao sistema de drenagem pluvial.



*Figura 9 – Medidor de Vazão Triangular.
Fonte: Intertechne (2022).*

Na figura 10 é dado um exemplo representando um medidor de vazão com sistema de leitura automatizados para transmissão de dados, permitindo o monitoramento de forma remota das leituras de vazão, este tipo de dispositivo tem sido comercializado por empresas especialistas em sistemas de monitoramento de barragens.



*Figura 10 – Esquema do Medidor de Vazão Triangular.
Fonte: FEMA (2015).*

Referente a manutenção de instrumentos, algumas ações devem ser tomadas durante as inspeções de rotina do empreendimento, no caso os medidores de vazão necessitam ser totalmente limpos de acúmulo de sedimentação e de

qualquer vegetação que venham se acumular na caixa de medição, para não ser impactada as medições e o escoamento. Também os medidores estando todos identificados facilita as inspeções e leituras (ANA, 2016).

2.3 Dique Intercepto

A medição das vazões de infiltração pela fundação e pelo maciço da barragem constitui uma grandeza importante a ser supervisionada na fase de enchimento do reservatório e no período de operação. As observações de crescimento abrupto de água percolada e a eventual detecção de carreamento de material fino refletem alguma anomalia no trecho de influência do medidor de vazão. As posições de instalação dos medidores de vazão de uma barragem necessitam de uma avaliação prévia da área de contribuição que se deseja monitorar (SILVEIRA, 2006).

Na figura 11 de forma esquemática, é indicado, dependendo da topografia da fundação, como podem-se dividir os trechos de contribuição para medir as vazões de uma barragem.

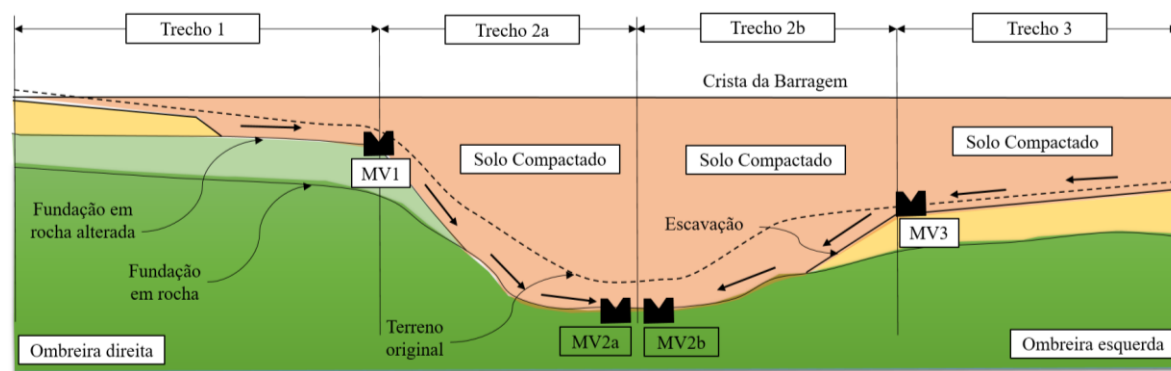


Figura 11 – Exemplo de Trechos de Contribuição.

Fonte: Barreto (2023).

O medidor de vazão visa prover especificamente dados e informações para avaliação de infiltrações que podem ocorrer pelo maciço e fundação. Para que se possa dividir as áreas de contribuição e limitar os trechos de medições, é necessário executar diques interceptos construídos com solo compactado, geralmente esses dispositivos cortam interrompendo o tapete drenante para poder direcionar a água coletada até a bacia de captação do medidor de vazão (SILVEIRA, 2006).

Na figura 12 e figura 13, é apresentado um exemplo do selo do dique intercepto interligado desde a vedação do maciço compactado até o pé de jusante da barragem, com intuito de barrar as águas em uma determinada bacia de contribuição no contato da fundação com o maciço da barragem (BARRETO, 2023).

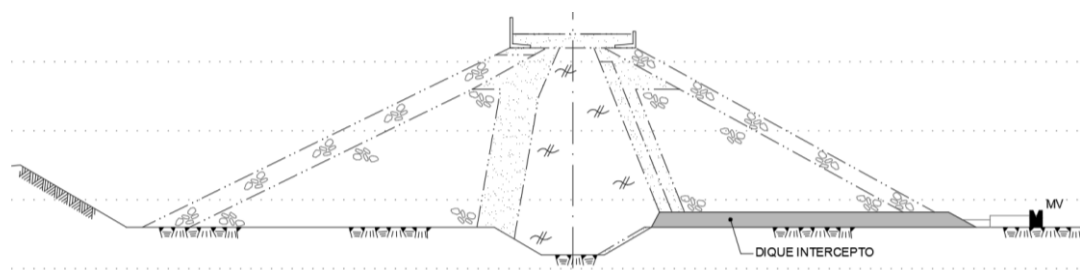


Figura 12 – Dique Intercepto em Barragem de Terra.

Fonte: Barreto (2023).

A ligação da saída do dique intercepto deve ser bem executada junto ao núcleo de vedação para não haver fuga de água para o lado extremo da bacia interna que se pretende captar. A altura do dique intercepto deve ser suficiente para cortar o tapete horizontal ou material disposto a jusante do eixo da barragem. O dique intercepto pode acompanhar o terreno, desde que no seu alinhamento não haja uma depressão capaz de transbordo do dispositivo (FEMA, 2022).

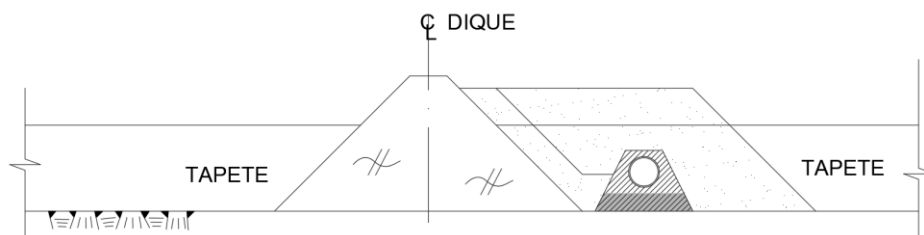


Figura 13 – Detalhe Típico de Dique Intercepto.

Fonte: Adaptado de Intertechne (2022).

Para barragens de pequeno porte, quando o nível de jusante não chega no pé do talude de jusante da barragem, é possível instalar um único dispositivo conforme exemplo da FIGURA 14 a medição da contribuição de ambas as ombreiras, importante antes da implantação verificar o nível de jusante durante a época de chuvas, ou verificar se no local de instalação do medidor de vazão não seja uma depressão, ou ponto de acúmulo de água onde o dispositivo trabalhe afogado dificultando, ou até impedindo que seja feita qualquer tipo de medição (ANA, 2016).

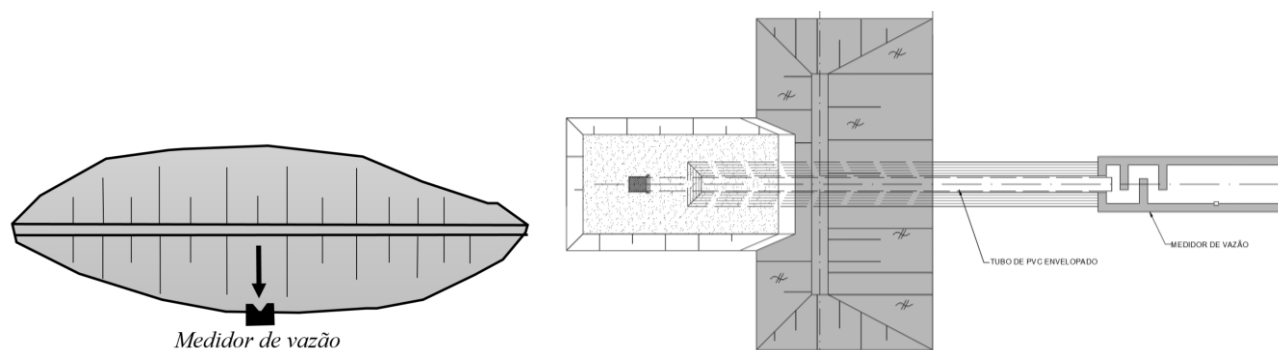


Figura 14 – Localização do Medidor de Vazão Único.

Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

Por experiência do autor em alguns projetos, destaca-se a importância e alguns cuidados com a área de captação do medidor de vazão, onde se recomenda que envolto do tubo de captação para não haver colmatação ou entrada de sólidos que possam entupir a tubulação, a entrada do tubo e protegida com material filtrante com tela de nylon ou bidim. Também nesta região de entrada de água pelo tubo é recomendável executar uma bacia de captação com material granular (transição média) (INTERTECHNE, 2022).

Barragens que indicam a necessidade de instalação de um medidor em único ponto, de modo a dividir a bacia de contribuição podem ser instalados dois medidores de vazão com a construção de um dique intercepto central conforme representado na FIGURA 15, esta divisão pode avaliar com mais precisão de qual lado da barragem pode haver uma concentração de água advinda do maciço da barragem ou fundação (SILVEIRA, 2006).

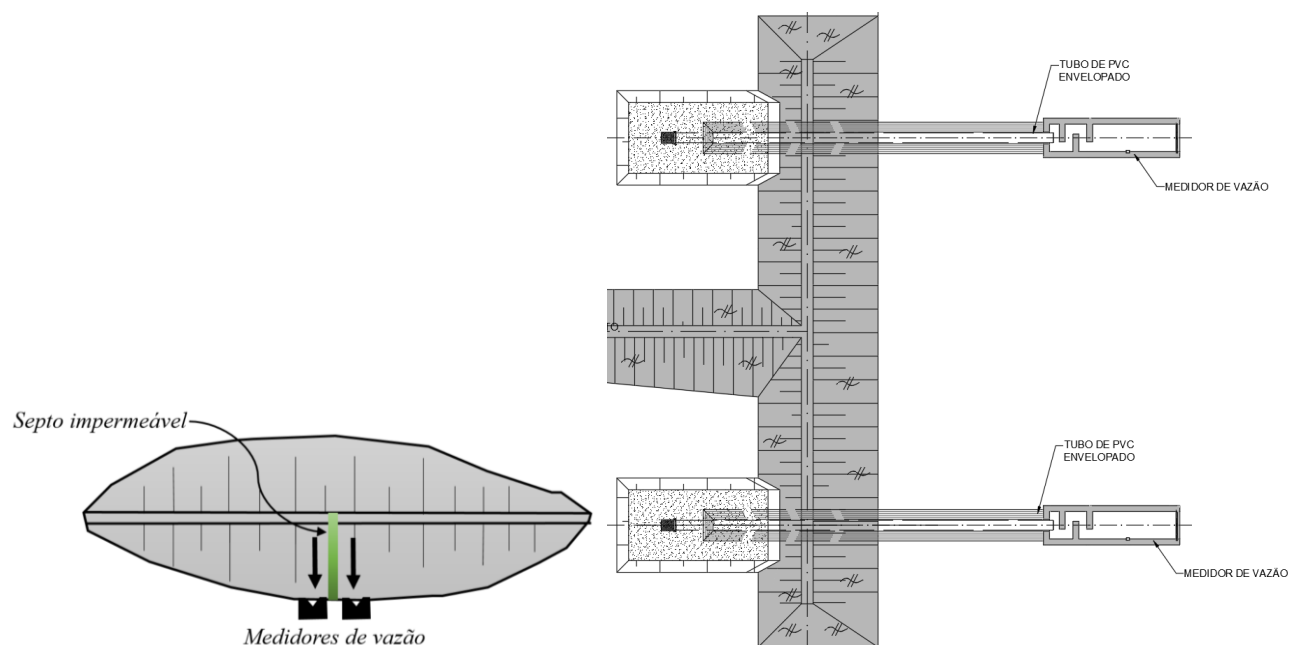


Figura 15 – Localização do Medidor de Vazão com Dique Intercepto Central.
Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

É comum em barragens onde há ensecadeira no leito do rio, ou mesmo com nível normal de jusante em contato com o espaldar de jusante representado no exemplo da FIGURA 16, neste caso os medidores de vazão se limitam às margens medindo somente as contribuições da margem esquerda e margem direita da barragem (SILVEIRA, 2006). De modo a garantir que não haja fuga de água pela lateral do tramo de fechamento, o dique intercepto em seu alinhamento no sentido da projeção do pé do talude de jusante da barragem, deverá encontrar na topografia a curva de nível imediatamente à ombreira na mesma elevação da crista do dique intercepto (INTERTECHNE, 2022).

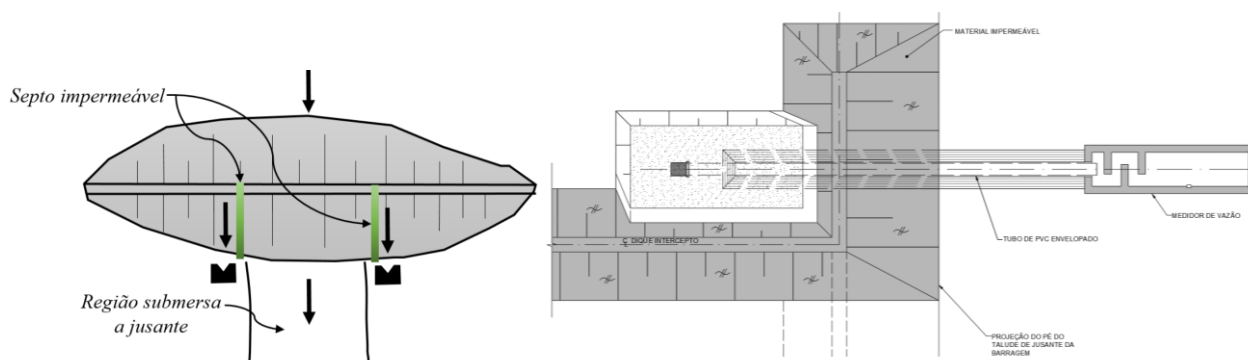


Figura 16 – Localização dos Medidores Limitados à Área Alagada a Jusante.
Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

Segundo a representação da seção da FIGURA 17, a depender da inclinação das ombreiras, é possível executar o dispositivo interceptor com o alinhamento da própria camada de aterro compactado junto a ombreira cortando o tapete na elevação definida para captação das águas para o medidor de vazão. Na elevação escolhida para o selo, a camada de compactação do aterro é interrompida deixando-se de executar o tapete numa janela de aproximadamente 1 m de espessura (INTERTECHNE, 2022).

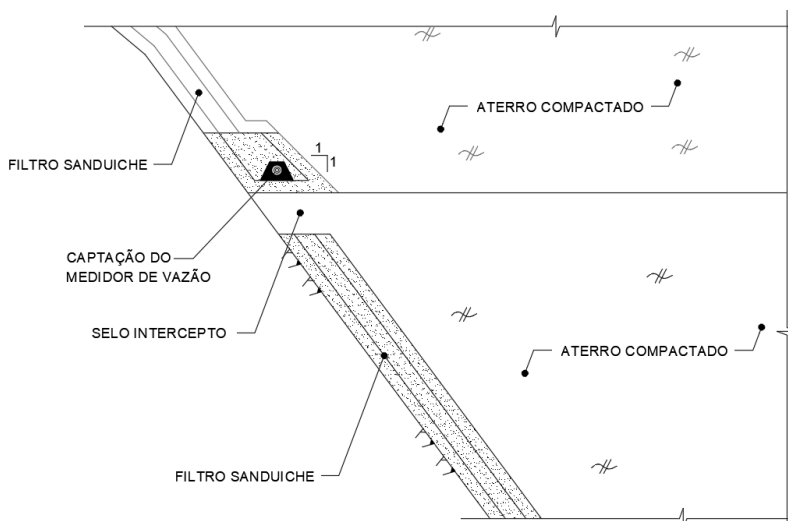


Figura 17 – Detalhe do Selo Intercepto em Ombreiras.

Fonte: Adaptado de Intertechne (2022).

Para que a tubulação de PVC rígido ou aço não seja danificada, pode ser executado um envelopamento em concreto semelhante ao exemplo da FIGURA 18, o comprimento deste envelopamento ficará entre a bacia de captação até a entrada da caixa tranquilizadora do medidor de vazão (INTERTECHNE, 2022).



Figura 18 – Tubulação na Região de Captação.

Fonte: Adaptado de Intertechne (2022).

2.4 Análise de Comportamento

A análise do comportamento das barragens envolve a medição do volume de infiltração que passa através do barramento, produzindo fluxo superficial e sub-superficial a jusante do barramento. Consolidar uma previsão efetiva do comportamento de uma barragem a longo prazo geralmente envolve um estudo analítico de uma quantidade mensurável e

considerável de dados reunidos ao longo do tempo. Isso inclui a compilação de registros de leituras efetuadas dentro da periodicidade do plano de instrumentação do empreendimento. A interpretação desses dados pode ser realizada por métodos estatísticos e/ou probabilísticos (MAXWELL, 2022).

O volume total de água emergida do solo, descarregada em algum dispositivo de drenagem, pode ser medido de forma direta. Já as águas que aparecem na superfície do solo a jusante da barragem podem ser medidas por meio de medidores de vazão (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004).

Para análise e acompanhamento de vazões, é comum elaborar gráficos que relacionam a vazão versus o tempo, com base no histórico de medições durante o enchimento do reservatório e início da operação, seguindo a periodicidade estabelecida em projeto. A variação do reservatório tem uma influência importante que pode se refletir nas vazões obtidas nos medidores de vazão quando instalados (SILVEIRA, 2006).

Os medidores de vazão são impactados diretamente pela pluviometria durante os períodos de chuva. Essa informação pode ser incorporada nos gráficos de vazão versus tempo para correlacionar com as informações medidas periodicamente (SILVEIRA, 2006).

Tabela 3 – Ocorrências e Comportamento de Vazões.

Estrutura	Ocorrência
Barragem Atibainha	(Oliveira et al., 1976) apresentaram a variação das vazões de drenagem e do nível do reservatório da barragem de Atibainha em função do tempo. Ao fim do processo de enchimento do reservatório, as vazões totais chegaram a 1050 l/min. Considerando o comprimento da barragem como área de contribuição, resultou em uma vazão específica de 2,4 l/min/m.
Barragem Esquerda Água Vermelha	Dois meses após o enchimento do reservatório da barragem de terra da margem esquerda de Água Vermelha, a vazão total ultrapassou o valor de controle estimado na fase de projeto, que era de 2300 l/min, sendo essa a maior vazão medida neste período. Na ombreira esquerda, constatou-se que a permeabilidade da camada de lava aglomerática era de 10-1 cm/s (SILVEIRA, 2006). Em uma saída de drenagem implantada por volta da estaca 191 + 00, há um dispositivo “medidor de vazão”. Neste dispositivo, além das leituras das vazões advindas do dreno de saída, foi também coletada a amostragem da água no reservatório e do dreno. Esta coleta foi realizada acompanhando o enchimento do reservatório, com o objetivo de determinar a medição do teor de sólidos em suspensão e em dissolução (SILVEIRA, 2014).
Dique UHE Santa Clara	O dique da câmara de carga da UHE Santa Clara, apesar de ser uma barragem do tipo enrocamento com face de concreto, demonstrou o acompanhamento das vazões durante o enchimento do reservatório da própria câmara. O efluente de uma valeta drenante instalada foi monitorado por medidores de vazão do tipo triangular (INTERTECHNE, 2006). A preocupação se deu, pois, o pátio da subestação fica em elevação inferior ao dique, ainda na possibilidade da incidência de percolação através do talude que fica entre as duas estruturas. Num período de 8 meses foi feito o monitoramento após o enchimento, onde o histórico de vazão demonstrou um comportamento do dique favorável satisfatório. As maiores vazões chegaram a 11 l/s na EL 805,50, já no primeiro rebaixamento do nível do reservatório da câmara na EL. 798,00 a vazão registrada foi nula (INTERTECHNE, 2006).

Fonte: Adaptado de Barreto (2023).

Na figura 19 observa-se uma fotografia do dique da câmara de carga e na FIGURA 20 o comportamento do medidor de vazão instalado para o monitoramento.



Figura 19 – Dique da Câmara de Carga da UHE Santa Clara.

Fonte: Intertechne (2006).

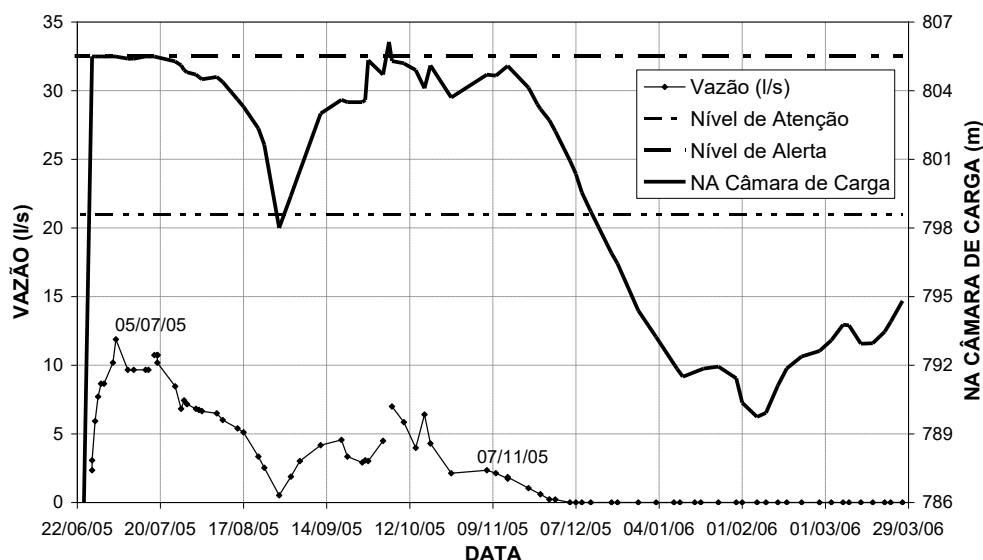


Figura 20 – Medidor de Vazão do Dique da Câmara de Carga da UHE Santa Clara.

Fonte: Intertechne (2006).

2.5 Aumentos Súbitos de Vazão

Para identificar aumentos súbitos de vazão, é importante definir a frequência de leitura do programa de monitoramento de uma barragem. A recomendação atual é que durante o enchimento do reservatório, as medições sejam diárias, passando para semanal quando a barragem entrar em operação. Em algumas barragens, a periodicidade de leituras migrou para quinzenal, devido a algumas dificuldades contratuais de mão de obra. No entanto, o histórico de anomalias em barragens sugere que este espaçamento quinzenal não seria adequado.

Exemplos disso são a barragem de Pampulha, no Brasil, e a barragem de Teton, nos Estados Unidos, onde os eventos de rompimento foram causados por erosão interna. Se as vazões estivessem sendo lidas com um espaçamento menor de dias, o aumento súbito de água poderia ter sido identificado (SILVEIRA, 2006).

Comparando os acidentes causados por erosão interna da barragem de Teton e, em maior escala, na Barragem de Fontenelle, percebe-se que as vazões iniciais de 300 a 400 l/s conseguiram erodir as zonas a jusante de cascalho arenoso.

Esses eventos ressaltam a importância de parâmetros como distribuição das partículas dos materiais com classificação fina e a baixa permeabilidade, que são críticos para o comportamento dessas barragens (FELL, 2005).

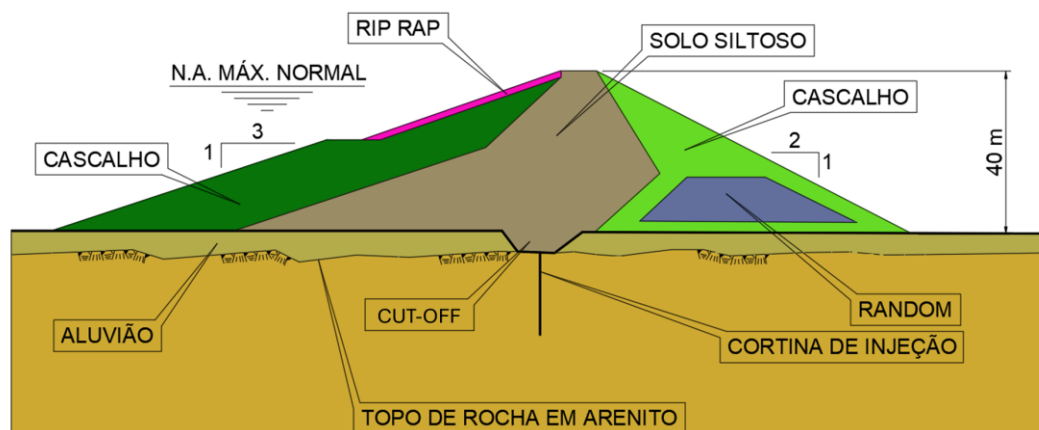


Figura 21 – Seção da Barragem de Fontenelle.

Fonte: Adaptado de Fell (2005).

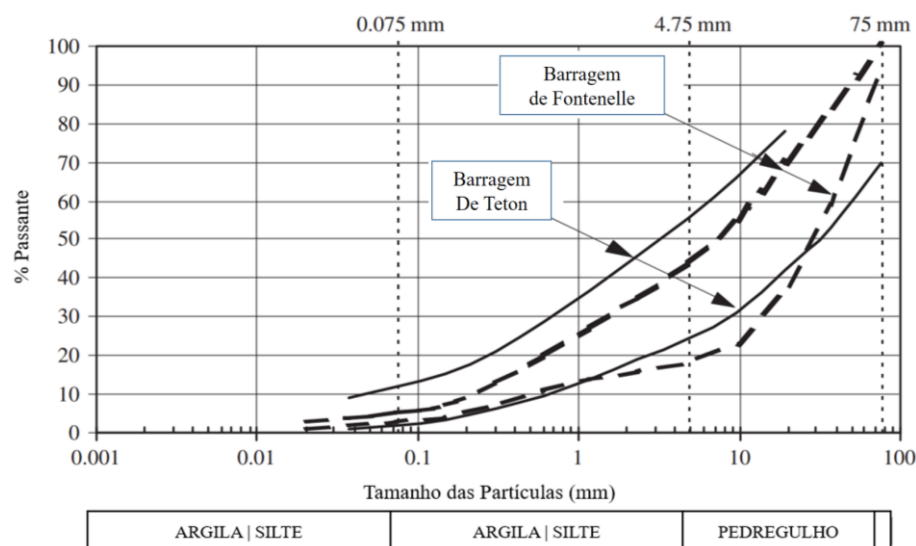


Figura 22 – Materiais de Jusante das Barragens de Teton e Fontenelle.

Fonte: Adaptado de Fell (2005).

Um modelo de gerenciamento que permite que a periodicidade de leituras seja feita em menor espaçamento de tempo é a automação do sistema de auscultação no empreendimento. Isso pode detectar anomalias que não seriam vistas nas medições feitas semanalmente ou quinzenalmente. Um exemplo disso é a barragem de Songa, na Noruega, onde entre os anos de 1976 a 1991, ocorreram 3 aumentos súbitos de vazão. Os recalques do maciço mantiveram-se dentro do normal, cerca de 0,6% da altura da barragem. Entre os anos de 1964 a 1991, houve variação das vazões apresentadas na tabela abaixo, chamando a atenção a variação de vazão com aumento significativo, pois avaliando somente em condições de vazão específica, chegaram-se a vazões máximas de 0,3 l/min/m, considerado um valor aceitável (SILVEIRA, 2006).

Tabela 4 – Aumento Súbito de Vazão na Barragem de Songa.

Barragem	Período de observação	Região de contribuição	Vazão Medida inicial (l/min)	Vazão Medida final (l/min)
Barragem de Songa Noruega	1964 a 1991	Ombreira Direita	30	60
	1964 a 1991	Parte Central	180	240
	1964 a 1991	Ombreira Esquerda	42	60
	6,3 horas somente	Aumento súbito em 11/08/1994	75	6420

Fonte: Adaptado de Silveira (2006)

O que permitiu analiticamente observar e registrar este aumento súbito de vazão num baixo intervalo de 6,3 horas somente, foi em função do sistema de automação da instrumentação implantada no empreendimento (SILVEIRA, 2006).

2.6 Variação do Reservatório

Também é possível analisar dados de vazões comparando com a oscilação do nível do reservatório, pois, se trata de outra forma de se acompanhar as vazões de drenagem por uma barragem utilizando-se gráficos de vazão versus nível d'água no reservatório, a vantagem nesta categoria de análise gráfica é poder auxiliar na identificação de algum evento anômalo da percolação de água através do maciço da barragem, pois, as variações bruscas refletem diretamente nas leituras.

Após um acúmulo de medições, será possível observar algumas tendências de comportamento que podem ser vistas mais claramente ao correlacionar as vazões a jusante da barragem com a variação do nível do reservatório. As causas necessitam ser identificadas e investigadas no caso da vazão aumenta gradualmente, e medidas corretivas devem ser tomadas urgentemente se continuar um aumento súbito de vazão abruptamente (SILVEIRA, 2006).

Geralmente nível de variação do reservatório é curto, pois, são projetados para manter uma constância no nível de água máximo normal, é necessária uma investigação cuidadosa da tendência de comportamento desta variação (DRIP, 2018). Na Figura a seguir é possível observar a projeção do comportamento que pode ser considerada com anômalo com efeito de crescimento abrupto de elevação fora de uma tendência de normalidade.

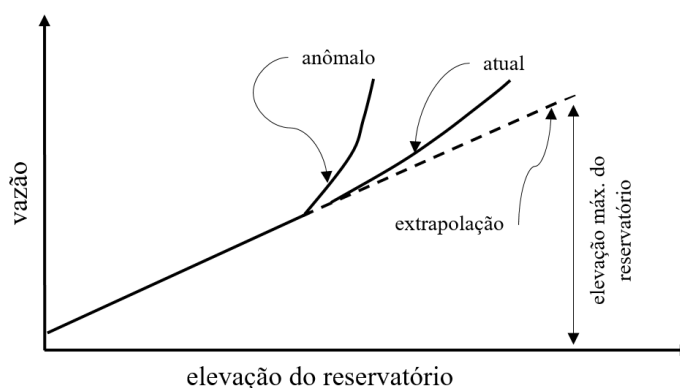


Figura 23 – Vazão versus Nível do Reservatório.

Fonte: Adaptado de DRIP (2018).

A figura 24 lado esquerdo demonstra uma análise de comportamento considerando a correlação entre a vazão versus tempo considerando o aumento do nível de água do reservatório. A FIGURA 24 do lado direito demonstra uma análise de comportamento considerando a correlação entre vazão versus tempo quando o nível de água do reservatório permanece constante, sendo mais comum durante a operação do empreendimento. Estas são formas mais adequadas que demonstram a tendência adequada na correlação entre vazão e o reservatório, sendo úteis para interpretação (DRIP, 2018).

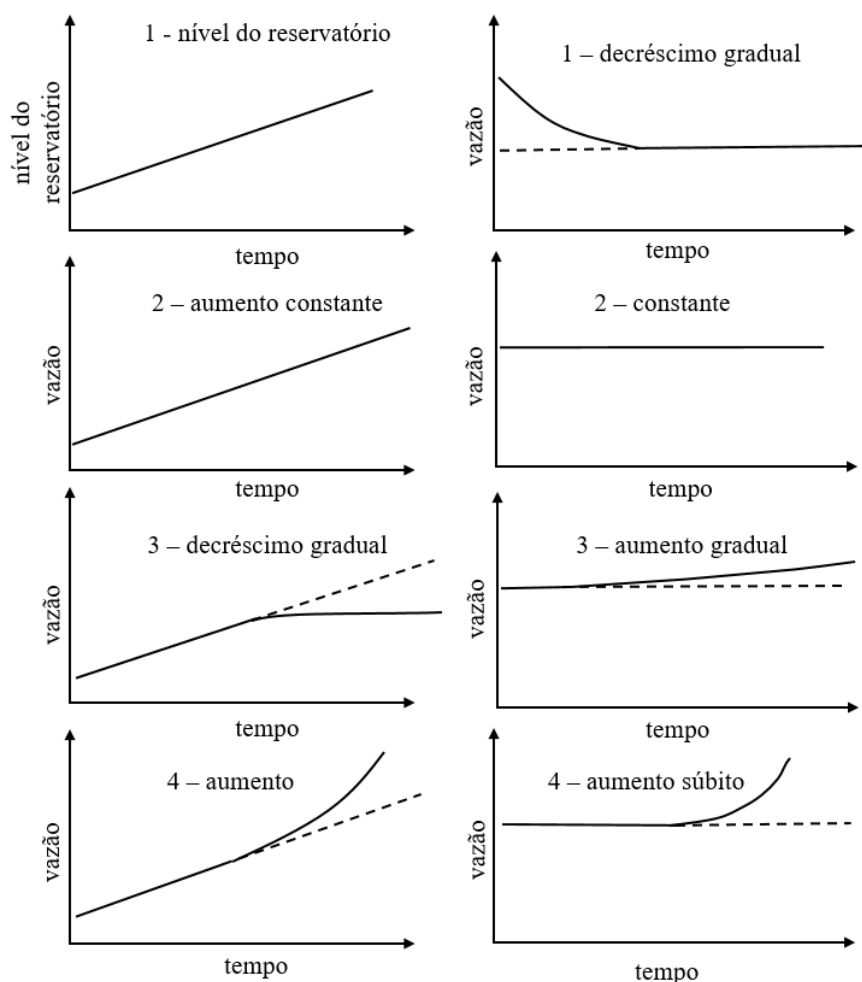


Figura 24 – Vazão versus Tempo (Reservatório).

Fonte: Adaptado de DRIP (2018).

3. Considerações finais

A utilização de medidores de vazão triangular é de grande importância para o monitoramento preciso das vazões em barragens, garantindo resultados confiáveis e contribuindo para a segurança das estruturas. A instrumentação adequada em barragens, incluindo medidores de vazão, sensores de nível e piezômetros, é fundamental para o monitoramento eficaz das estruturas. A análise detalhada da permeabilidade e drenagem de maciços de solo, juntamente com o uso de dispositivos de monitoramento adequados, é essencial para garantir a segurança e durabilidade das barragens, controlando adequadamente a infiltração e drenagem de água nos maciços.

A capacidade de um solo em permitir a passagem de água está diretamente ligada à sua composição granulométrica, sendo que solos mais porosos tendem a ser mais permeáveis. A infiltração de água em barragens pode causar problemas como deslocamento e lixiviação de partículas, tornando essencial o uso de sistemas de drenagem eficazes.

Critérios empíricos têm sido desenvolvidos ao longo do tempo para o projeto de sistemas de drenagem e filtração para barragens, fundamentais para garantir a segurança e estabilidade das estruturas, controlando adequadamente a infiltração e drenagem de água nos maciços. A correta aplicação desses critérios e modelos contribui para a segurança e eficiência das barragens, impactando positivamente no desenvolvimento socioeconômico e ambiental.

A instalação e manutenção corretas dos medidores de vazão são essenciais para garantir medições precisas, contribuindo para a segurança e eficiência das barragens, bem como para a gestão adequada dos recursos hídricos. A

automação do sistema de auscultação emerge como uma ferramenta fundamental para a identificação precoce de aumentos súbitos de vazão, contribuindo significativamente para a segurança das barragens.

A análise da variação do nível do reservatório em relação às vazões de drenagem é essencial para monitorar a integridade das barragens, permitindo uma ação rápida e eficaz para garantir a segurança das estruturas. Os medidores de vazão são importantes para monitorar a percolação através da fundação e do sistema de drenagem interno da barragem, fornecendo referências para interpretar o comportamento da estrutura.

Referências

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2016). *Curso de segurança de barragens*, Brasília.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2016). *Diretrizes para a elaboração do plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens*. Brasília.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2016). *Diretrizes para elaboração de projetos de Barragens*. Brasília.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. (2016). *Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem*. Brasília.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. (2016). *Guia Prático de Pequenas Barragens*. Brasília.
- ASSIS, A. P. (2003). *Apostila de Barragens. Disciplina do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília*. ENC/FT, Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- BARRETO, M. de P., TEIXEIRA, S. H. C. ., ACEVEDO, A. M. G. ., CALCINA, A. M., THA, P. de C. ., DUTRA, P., ANDRADE, H. A. C. de ., LOPES, J. C. ., & KATERENIUK, . S. B. . (2024). *Numerical analysis and study of stress and deformation in comparison to readings from instrumented swedish boxes in a concrete-faced rockfill dam located in Peru*. *Revista De Geociências Do Nordeste*, 10(1), 518–536. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID35608>
- BARRETO, M. de P. et al (2023). *Análise de Vazões de Percolação de 133 Barragens de Terra e Enrocamento Brasileiras e Definição de Valores de Controle para Medidores de Vazão*. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 213p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20981.79848>
- BARRETO, M. de P., & TEIXEIRA, S. H. C. (2024). *Analysis of the percolation flow of 133 earth and rockfill dams and control values for flow meters*. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 17(1), 15–34. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-002>
- BARRETO, M. de P., & TEIXEIRA, S. H. C. (2024). *Emergency repairs downstream of earth and rockfill dams with water spring with indication of internal erosion*. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(4), 2653–2670. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2653-2580>
- CRUZ, Paulo T. et al (2004). *100 Brazilian Dams Historical Cases Construction Materials Project*, 2nd edition, São Paulo: Oficina de Textos.
- DRIP - DAM REHABILITATION & IMPROVEMENT PROJECT. (2018). *Guidelines for Instrumentation of Large Dams*. Central Water Commission - Dam Safety Rehabilitation Directorate - Ministry of Water Resources, River Development & Ganga Rejuvenation Government of India. India, January. Doc. No. CDSO_GUD_DS_02_v1.0.
- ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. (2015). *Crêterios de projeto civil de usinas hidrelêtricas*. Rio de Janeiro: RJ.
- FELL, R., et al. (2005). *Geotechnical Engineering off Dams*. Taylor & Francis Group plc. London, UK. ISBN 041536440X.

-
- FEMA - FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY - *Interagency committee on Dam Safety (ICODS)*. (2015). Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion. Oklahoma.
- GAIOTO, N. (2003). *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. São Carlos - SP, EESC-USP. NLM.
- ICOLD - International Commission on Large Dams. (2003). *Dam surveillance guide: guide de la surveillance des barrages*. Paris. Bulletin 158.
- INTERTECHNE, DUARTE J. M. G, CALCINA A. M. e GALVÁN V. R. (2006). *Instrumentação geotécnica de obras hidrelétricas brasileiras: alguns casos práticos atuais*, Curitiba, Brasil.
- INTERTECHNE. *Consulta a Acervo e Relatórios relacionados a Instrumentação e Revisão Periódica de Segurança de Barragens*, Curitiba, Brasil, 2022.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- LEAL, F. C. A. et al. (2021). *Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro*. Revista de Geociências do Nordeste, v. 8, nº 1, p. 1-2. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID25727>
- LOPES, M.C. et al. (2024). *Modelagem computacional do fluxo de percolação em barragem de terra: um comparativo entre modelo 2D e 3D*. Revista de Geociências do Nordeste, v. 10, nº 1, p. 72-92. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34833>
- MAXWELL. *Instrumentação de barragens* - PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0221066/CA, [202-]. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/6368/6368_4.PDF. Acesso em 21/01/2023.
- MAXWELL. *Instrumentação e segurança de barragens* - PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0124945/CA, [202-]. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4244/4244_3.PDF. Acesso em 11/07/2022.
- MELLO PORTO, R. (2001). *Hidráulica Básica*. 2ª Edição – Publicação EESC USP. Brasil.
- SILVEIRA, A. (1965). *An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters*. In: 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, Montreal, Canada. Anais... Montreal: ICSMFE, p. 551-555.
- SILVEIRA, J.F.A. (2006). *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos.
- TERZAGHI, K, PECK R.B e MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3ª Edição, John Wiley and Sons, Inc., Nova Iorque.
- USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2004). *Engineering and Design - Manual - General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams*, July. EM 1110-2-2300.
- VERAS, P. M. C.; MENDONÇA, B. H. S.; FERREIRA, Y. B. (2016). *Observações sobre os impactos hidrológicos na barragem do rio Maranguapinho em Maranguape-CE*. Re Revista de Geociências do Nordeste, Volume 2, Número Especial.