

## MODELOS HIDROGEOLÓGICOS APLICADOS PARA O ENTENDIMENTO DA DINÂMICA HÍDRICA EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Lucas Santos<sup>1</sup>, Maurício Bertachini<sup>1</sup>, Daniel Bertachini<sup>1</sup>, Barbara Vaz<sup>1</sup>, Felipe Abbas<sup>1</sup>, Rafael Coutinho<sup>1</sup>

**Resumo** – Os modelos hidrogeológicos são essenciais para a compreensão da dinâmica hídrica em estruturas geotécnicas, como barragens e pilhas, sendo fundamentais na avaliação da estabilidade e da segurança dessas infraestruturas. A presença e o comportamento da água nesses sistemas influenciam diretamente processos como percolação, variação de poropressões e alterações nas propriedades geomecânicas dos materiais, impactando o desempenho estrutural e os planos de operação e descomissionamento. A caracterização da dinâmica hídrica em projetos hidrogeotécnicos exige metodologias integradas, que incluem desde levantamentos básicos como inventários de nascentes, análises hidroquímicas e isotópicas, além da construção de modelos conceituais e numéricos. O presente artigo propõe-se a descrever as aplicações, os métodos e as abordagens utilizadas no desenvolvimento da modelagem hidrogeológica, com foco para a gestão segura e sustentável de estruturas geotécnicas, destacando sua relevância na previsão de cenários de instabilidade, nos planos de rebaixamento e na otimização de estratégias de monitoramento.

**Palavras-Chave** – Modelos hidrogeológicos, Barragens, pilhas, minas.

**Abstract** – Hydrogeological models are essential for understanding the hydraulic dynamics in geotechnical structures, such as dams and waste piles, being fundamental in assessing the stability and safety of these infrastructures. The presence and behavior of water in these systems directly influence processes such as percolation, pore pressure variations, and changes in the geomechanical properties of materials, impacting structural performance and decommissioning plans. Characterizing the hydraulic dynamics in hydrogeotechnical projects requires integrated methodologies, which include spring inventories, hydrochemical and isotopic analyses, as well as the development of conceptual and numerical models. This article aims to describe the applications, methods and approaches used in developing hydrogeological modeling, focusing on the safe and sustainable management of geotechnical structures, highlighting their relevance in predicting instability scenarios, drawdown plans, and optimizing monitoring strategies.

**Key Words** – Hydrogeological modeling, geotechnical stability, dams, mine.

---

<sup>1</sup> Empresa MDGEO, Hidrogeologia e Meio Ambiente. Rua Santa Bárbara, 162, Sagrada Família, Belo Horizonte, Minas Gerais (MG).

## 1. INTRODUÇÃO

O entendimento da dinâmica hídrica em estruturas geotécnicas, como barragens e pilhas de estéril, é essencial para garantir a estabilidade e a segurança dessas infraestruturas, sobretudo em contextos de descomissionamento e descaracterização. A água desempenha um papel determinante no desempenho hidráulico, influenciando processos hidrogeológicos e geotécnicos, como a percolação, as variações de poropressões e as alterações nas propriedades mecânicas dos materiais. Esses fatores podem modificar significativamente o comportamento estrutural, exigindo uma gestão eficiente dos riscos para minimizar impactos ambientais e proteger áreas sensíveis.

Nesse contexto, a modelagem hidrogeológica, que engloba abordagens conceituais e numéricas, destaca-se como uma ferramenta fundamental para a análise desses processos. A caracterização detalhada da dinâmica hídrica constitui, portanto, um pilar central para o desenvolvimento de projetos geotécnicos seguros e sustentáveis.

Dessa forma, o presente artigo propõe-se a apresentar a lógica de desenvolvimento de modelos hidrogeológicos sob a perspectiva da hidrogeotecnia, com exemplos práticos elaborados pela empresa MDGEO – Hidrogeologia e Meio Ambiente. Esses modelos visam à compreensão da dinâmica hídrica em estruturas geotécnicas, com ênfase no enriquecimento das interpretações hidrogeológicas aplicadas. Objetiva-se discutir como essas ferramentas contribuem para a segurança e a sustentabilidade dos projetos, promovendo o aprimoramento das práticas de gerenciamento de barragens e outras infraestruturas geotécnicas.

## 2. MODELO HIDROGEOLÓGICO APLICADO

Um modelo hidrogeológico constitui uma representação conceitual ou matemática de um sistema hidrogeológico real, sendo empregado para analisar e prever o comportamento da água subterrânea em diferentes contextos ambientais e geotécnicos. Seu principal objetivo é descrever as características físicas e dinâmicas de um aquífero, abrangendo sua estrutura, propriedades hidráulicas e interações com sistemas superficiais adjacentes (Feitosa, 2008). A modelagem hidrogeológica permite avaliar a distribuição espacial do fluxo subterrâneo, os mecanismos de recarga e descarga, bem como os impactos de atividades antrópicas, como alterações na dinâmica hídrica (rebaixamento e elevação do nível de água subterrânea) e migração de compostos químicos.

A construção de um modelo hidrogeológico voltado para aplicações geotécnicas envolve um processo multidisciplinar, composto por diversas etapas interdependentes que garantem a representação fidedigna do sistema analisado. O primeiro passo é o levantamento de dados primários, no qual são coletadas e compiladas informações geológicas, hidrogeológicas e hidrodinâmicas da área de estudo, por meio de campanhas de campo, monitoramento e análise de registros históricos. Essa etapa é essencial para estabelecer uma base de dados confiável que sustentará a modelagem. Em seguida, realiza-se a caracterização hidroquímica e isotópica, que permite avaliar a qualidade da água subterrânea e suas interações com o meio físico, com a finalidade de trazer informações complementares ou validar o modelo hidrogeológico a partir das assinaturas químicas e isotópicas. A análise hidroquímica possibilita a classificação dos tipos de água e a identificação de processos geoquímicos, enquanto a análise isotópica contribui para a determinação de fontes de recarga, tempo de residência e evolução hidrogeoquímica dos aquíferos.

Com os dados coletados e analisados, desenvolve-se o modelo conceitual, que consiste na formulação de um esquema interpretativo do sistema hidrogeológico. Esse modelo representa as unidades aquíferas, os limites hidrogeológicos, as direções de fluxo e os processos de interação entre a água subterrânea e os sistemas superficiais, servindo como base para a modelagem numérica. Na etapa final, ocorre a modelagem numérica, na qual o sistema hidrogeológico é representado matematicamente por meio da resolução de equações diferenciais que governam o fluxo subterrâneo e o transporte de solutos. A modelagem numérica permite a calibração do modelo com dados observacionais e a realização de simulações sob diferentes cenários,

possibilitando previsões sobre o comportamento do aquífero em distintas condições hidrogeológicas e operacionais.

A Figura 1 ilustra a sequência lógica para o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico, destacando as interações entre as etapas descritas. A seguir, cada uma dessas etapas será abordada detalhadamente, com ênfase na aplicação do modelo hidrogeológico para estudos geotécnicos, ressaltando sua importância na análise da estabilidade de taludes, no monitoramento de barragens e na avaliação das interferências no sistema hídrico subterrâneo associadas a atividades de mineração e engenharia civil.

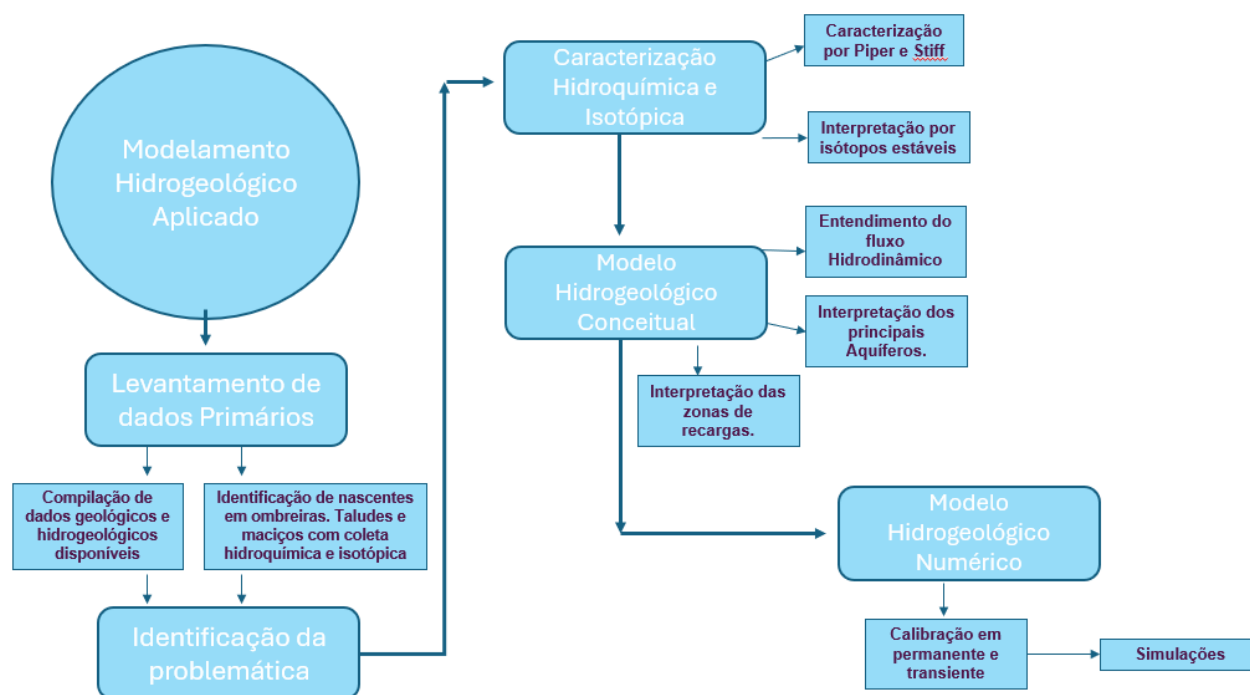


Figura 1: Métodos aplicados para o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico.

## 2.1 Levantamento de dados primários

O levantamento de dados primários é a etapa inicial e fundamental para a construção de um modelo hidrogeológico. Esse processo consiste na obtenção e organização de informações geológicas, hidrogeológicas e hidrodinâmicas da área de estudo, permitindo a caracterização detalhada das condições do meio físico e da dinâmica hídrica. A coleta desses dados pode ser realizada por meio de investigações diretas e indiretas, envolvendo medições em campo, monitoramento contínuo, ensaios geotécnicos e hidrogeológicos, além da análise de registros históricos e bases de dados existentes. Dentre os principais aspectos avaliados no levantamento de dados primários, destacam-se a compilação de dados geológicos e hidrogeológicos, a qual reúne informações sobre a rede de monitoramento, incluindo medições de níveis d'água em piezômetros e Indicadores de Nível d'Água, medições de vazão de sistemas de drenagem interna. Esses dados são essenciais para entender o comportamento do fluxo subterrâneo e sua interação com as estruturas geotécnicas. Além disso, o levantamento de dados primários inclui o inventário de nascentes detalhado, e que para os projetos geotécnicos, são direcionados para a região dos maciços, ombreiras e o entorno das pilhas e reservatórios barragens, proporcionando um diagnóstico preciso sobre as zonas de descarga e a dinâmica de circulação da água subterrânea.

## 2.2 Caracterização Hidroquímica/Isotópica

A caracterização hidroquímica e isotópica desempenha um papel fundamental na construção e calibração de modelos hidrogeológicos, sendo essencial para compreender a dinâmica hídrica em estruturas geotécnicas, como barragens de rejeitos e pilhas. Esses estudos permitem

identificar a origem, qualidade e tempo de residência da água subterrânea, fornecendo informações críticas para a gestão de recursos hídricos, a avaliação de impactos ambientais e a segurança estrutural.

A análise hidroquímica envolve a determinação da composição iônica da água, além de elementos de interesse, como metais dissolvidos entre outros parâmetros. Tal análise possibilita a identificação de processos como interação entre a água e os materiais (fundação, sistemas de drenagem interna, maciço, rejeito, estêreis), mistura entre diferentes tipos de águas e influência de atividades antrópicas. Parâmetros como pH, condutividade elétrica, alcalinidade e as concentrações de íons principais ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) são essenciais para classificar os tipos de água e reconhecer padrões de fluxo e recarga. Ferramentas como mapas hidroquímicos, diagramas de Stiff e Piper, e perfis verticais e horizontais auxiliam na visualização da distribuição espacial dos componentes químicos, contribuindo para a caracterização de aquíferos heterogêneos e para a identificação de processos geoquímicos que afetam a qualidade da água (Clark & Fritz, 1997; Kendall, 1998).

A análise isotópica complementa as investigações hidroquímicas ao fornecer dados sobre a origem e trajetória da água subterrânea, permitindo a diferenciação entre águas meteóricas recentes e águas confinadas mais antigas. Isótopos como oxigênio-18 ( $^{18}\text{O}$ ), deutério ( $^2\text{H}$ ), trítio ( $^3\text{H}$ ) e carbono ( $^{14}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ ) são empregados para avaliar processos como evaporação, recarga, interações com a matriz geológica e o tempo de permanência da água no meio subterrâneo. Em barragens e pilhas, a aplicação de isótopos tem sido uma ferramenta valiosa para rastrear o movimento da água e entender os padrões de fluxo subterrâneo (Clark & Fritz, 1997; Kendall, 1998).

A seguir, será apresentado um exemplo prático dessa abordagem, baseado em um estudo hidrogeológico conduzido pela MDGEO, em uma barragem de rejeito de minério de ferro. O rejeito apresenta variação granulométrica ao longo do reservatório, indo de material fino a grosso, além de incluir outros elementos do domínio antrópico, como os alteamentos, os maciços construídos com aterros compactados de baixa permeabilidade e o sistema de drenagem interna. Quanto ao material geogênico, especialmente na fundação, observa-se um perfil de alteração que vai desde solos residuais até filitos fraturados pertencentes à Formação Fecho do Funil.

A Figura 2 ilustra a situação citada anteriormente em uma seção transversal, onde foram integrados dados hidroquímicos, isotópicos e hidrodinâmicos. A análise permitiu identificar distintos agrupamentos de águas ao longo da estrutura, cada um com características específicas. No topo do reservatório, as amostras apresentam um grau de salinidade baixo a moderado, conforme indicado pelos diagramas de Stiff. Essas águas estão mais expostas ao meio superficial, conforme evidenciado por elevadas concentrações de deutério ( $^2\text{H}$ ), indicando influência atmosférica e processos evaporativos. No entanto, a salinidade não é controlada pelos isótopos, mas sim pela interação com os rejeitos e pelo tempo de residência da água. As águas presentes na região dos rejeitos, com idades isotópicas de  $^3\text{H} < 3$  anos, exibem padrões químicos distintos, geralmente enriquecidos em sulfatos e metais dissolvidos devido à lixiviação de minerais do rejeito. Nos drenos, onde a idade da água é estimada em  $^3\text{H} = 38$  anos, há uma composição química intermediária, refletindo um tempo de residência maior e possíveis reações geoquímicas ao longo do fluxo subterrâneo, como troca iônica e precipitação mineral. Esse aumento na salinidade pode ser explicado pela baixa permeabilidade dos rejeitos, favorecendo interações prolongadas entre a água e os minerais. Na fundação da barragem, a água apresenta uma idade de  $^3\text{H} = 75$  anos e um padrão hidroquímico mais estável, com menor influência de águas recentes e composição química controlada pelo meio geológico. Os gráficos de Stiff indicam um sistema próximo ao equilíbrio geoquímico, com menores concentrações de metais dissolvidos. No dreno de fundo, onde a idade isotópica atinge  $^3\text{H} = 130$  anos, a composição química da água sugere um ambiente confinado, com menor influência de fontes superficiais. Os gráficos de Stiff nessa região indicam uma predominância de íons compatíveis com a lixiviação de minerais das rochas fraturadas do filito, refletindo um fluxo subterrâneo lento e um longo tempo de residência.

De modo geral, a aplicação dessa metodologia na estrutura permitiu identificar a ocorrência de misturas entre diferentes tipos de águas no maciço, cada uma com tempos de residência distintos. Além disso, possibilitou descartar a recarga direta pelo maciço e evidenciou que a

estrutura é alimentada por um fluxo ascendente, uma vez que sua fundação se encontra em um ambiente confinado.

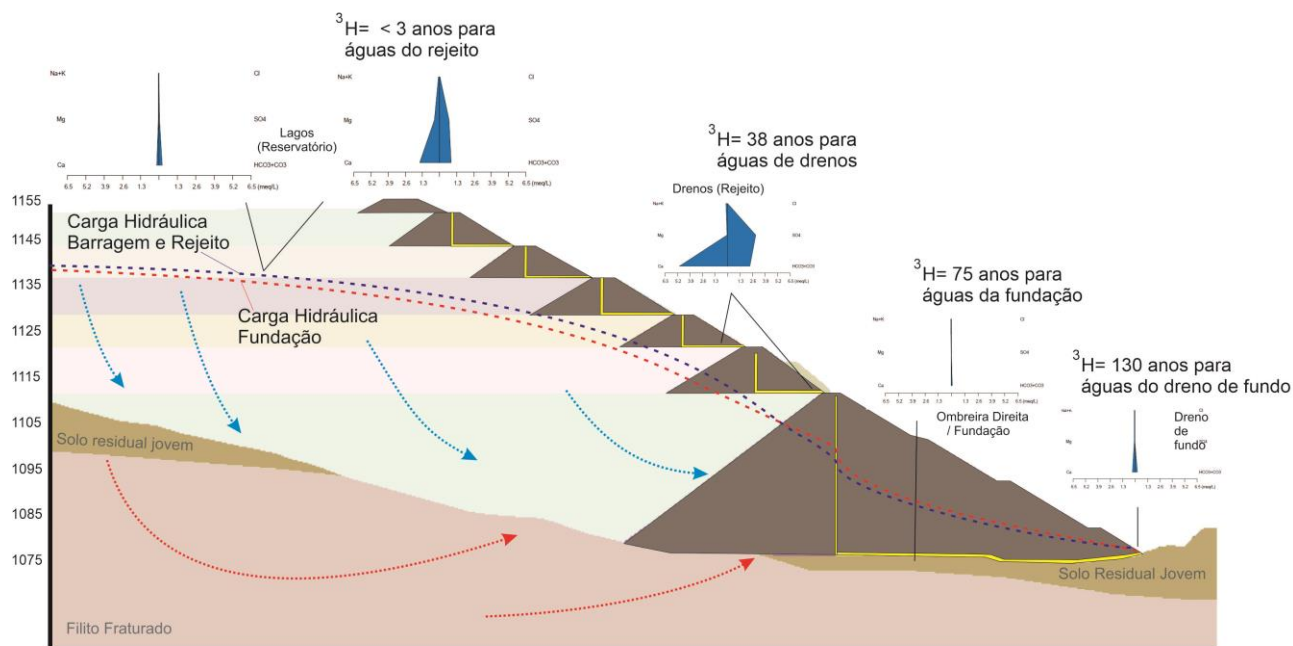


Figura 2: Seção esquemática de uma barragem, interpretada com base em dados hidroquímicos, isotópicos e hidrodinâmicos.

Um outro exemplo dessa aplicação está ilustrado na Figura 3, que apresenta os dados isotópicos utilizados para compreender a dinâmica hídrica em um Dique de Sela/Pilha, localizado nas margens de um reservatório de uma barragem de rejeitos de ferro, constituído também por material de aterro compactado e uma fundação associada a camadas de solos residuais jovens). A investigação por meio de mapeamento hidrogeológico de nascentes revelou a ocorrência de uma surgência próxima à fundação do maciço do dique de sela, levantando questionamentos sobre a origem desse fluxo, responsável pelo acúmulo de água na região e qual a implicação para a estabilidade da estrutura. Para aprofundar essa análise, foram conduzidos estudos isotópicos, visando esclarecer o comportamento hídrico no local.

De maneira geral, a água da barragem se diferencia por apresentar valores significativamente mais elevados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  em comparação às águas subterrâneas, evidenciando um intenso processo de evaporação, característico de corpos d'água superficiais. Em contraste, os demais pontos analisados exibem assinaturas isotópicas similares, com variações de  $\delta^{18}\text{O}$  típicas de águas originadas da precipitação, sem alterações isotópicas significativas causadas por evaporação. A relativa homogeneidade dos valores isotópicos entre os piezômetros e a nascente próxima ao maciço sugere que compartilham a mesma origem de recarga, possivelmente proveniente da precipitação local, sem influência do reservatório da barragem. Além disso, a diferença entre a assinatura isotópica do reservatório da barragem e das águas subterrâneas indica que não há conexão significativa entre esses sistemas, ou seja, a barragem não contribui de forma relevante para a recarga dos aquíferos subterrâneos. Assim, a análise isotópica confirma que as águas subterrâneas estudadas têm origem predominantemente na precipitação e não passaram por processos expressivos de evaporação, ao contrário da água da barragem, fortemente influenciada por esse fenômeno, indicando área de recarga distinta da região do reservatório da barragem.

Por fim, a presença do fluxo acumulado pode ser explicada por movimentos ascendentes da água subterrânea. Esse entendimento possibilitou a identificação de conexões hidráulicas dentro

do sistema estudado. O entendimento da dinâmica hídrica permitiu avaliação de metodologias específicas para o controle dos níveis na região do maciço, como a implantação de poços de bombeamento nos níveis confinados do aquífero, permitindo o controle adequado do fluxo ascendente observado.

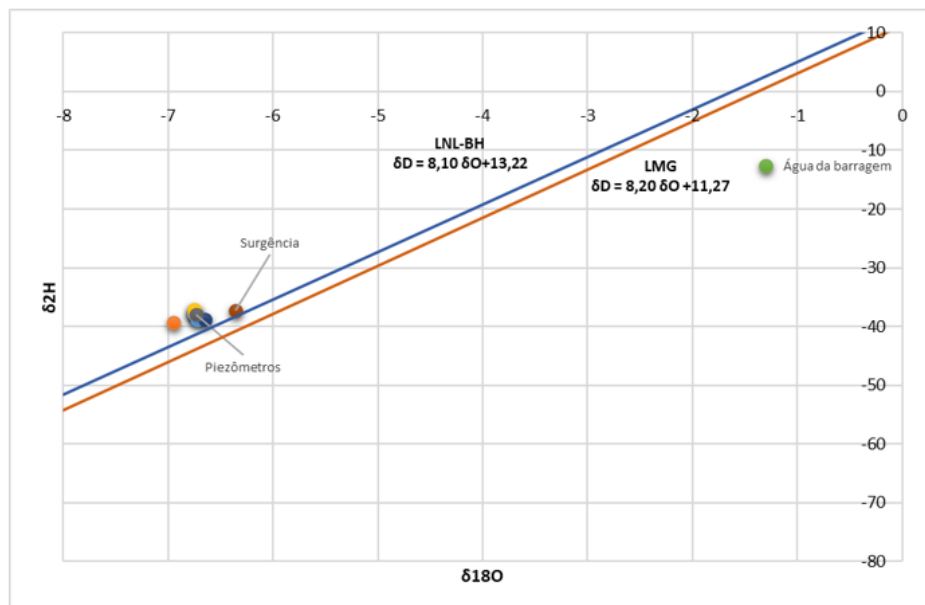


Figura 3: Assinatura de isótopos estáveis para as amostras analisadas em projeto de pilha.

### 2.3 Modelo Conceitual

Um modelo hidrogeológico conceitual consiste em uma representação simplificada e idealizada de um sistema hidrogeológico real, construída com base em um conjunto de hipóteses e premissas que buscam descrever as características mais significativas e os processos que governam o meio subterrâneo. Esse tipo de modelo é amplamente empregado para estudar fenômenos complexos relacionados ao fluxo de água subterrânea, especialmente em situações em que a aplicação direta de soluções matemáticas seria inviável devido à alta complexidade do sistema real. Ao simplificar o sistema natural em um modelo idealizado, torna-se possível realizar análises teóricas que aprofundam a compreensão das variáveis envolvidas, como o comportamento do fluxo e as interações entre diferentes componentes do sistema. No âmbito da hidrogeologia, o modelo conceitual considera aspectos como a geometria do sistema (incluindo camadas geológicas e contornos geográficos), os fluxos hidráulicos, as fontes de recarga, os pontos de extração de água (como bombeamentos) e outros fatores relevantes, permitindo a aplicação de metodologias analíticas para descrever o funcionamento do sistema de forma mais acessível e prática (Anderson *et al.*, 2015).

A construção de um modelo hidrogeológico conceitual envolve diversas etapas fundamentais, como a definição das condições de contorno, a caracterização das interações entre unidades hidrogeológicas, a determinação de parâmetros hidrodinâmicos (como condutividade hidráulica, porosidade e transmissividade), a identificação de zonas e valores de recarga, a realização do balanço hídrico, a análise potenciométrica e outras interpretações complementares que se façam necessárias. Esses elementos são essenciais para garantir que o modelo represente de forma adequada os processos hidrogeológicos e possa ser utilizado como base para simulações numéricas ou tomadas de decisão em gestão de recursos hídricos. Além disso, a construção do modelo exige uma abordagem integrada, que combine dados de campo, análises geológicas e hidroquímicas, e, quando disponível, dados isotópicos, para uma representação mais precisa do sistema (Bear & Verruijt, 1987).

A Figura 4 ilustra uma segmentação básica e esquemática, elaborada com base nas premissas conceituais de um modelo hidrogeológico descrito por Feitosa *et al.* (2008), que pode ser seguida para a construção de modelos aplicados ao entendimento de estruturas geotécnicas, como barragens e pilhas de rejeitos. É fundamental destacar que cada modelo deve ser

desenvolvido de maneira única, considerando as especificidades geológicas e hidrogeológicas de cada área de estudo, uma vez que os contextos geológicos podem variar significativamente. No entanto, o objetivo central de um modelo hidrogeológico conceitual bem elaborado é responder a questões específicas e propor hipóteses consistentes sobre a dinâmica de fluxo em uma determinada região, servindo como base para estudos mais aprofundados e para a gestão sustentável dos recursos hídricos (Custódio & Lhamas, 1983; Feitosa *et al.*, 2008).

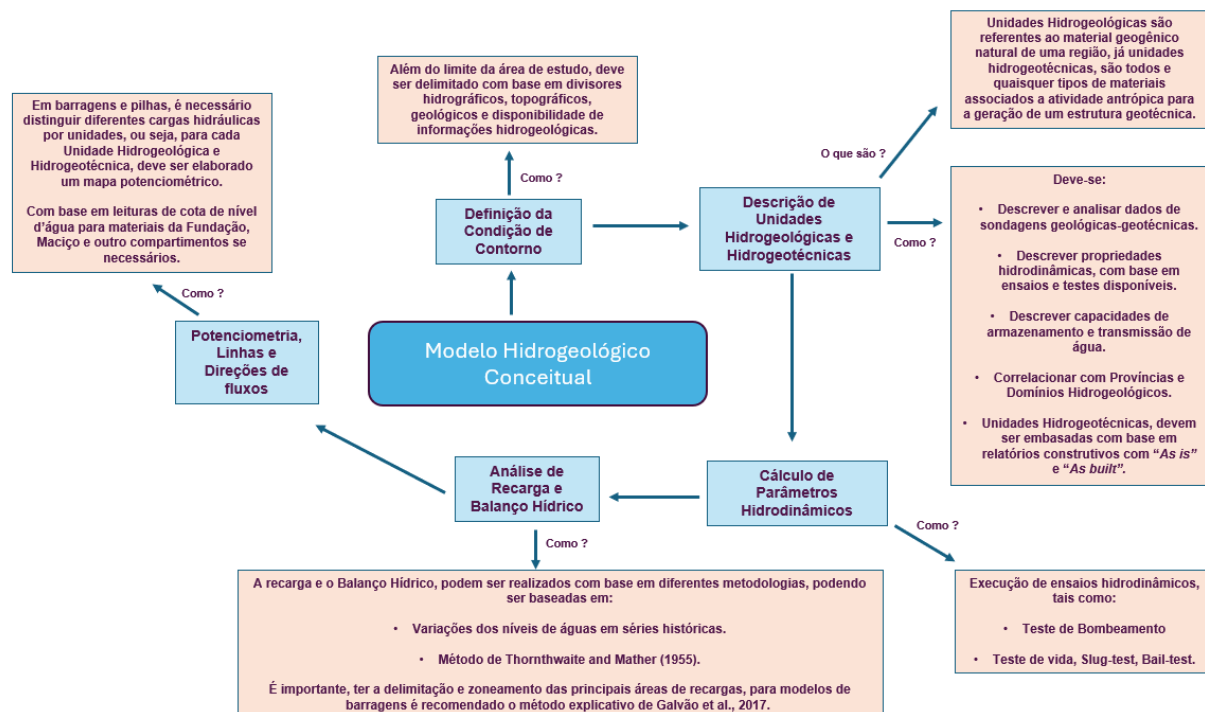


Figura 4: Sequenciamento lógico para desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual aplicado para estruturas geotécnicas.

## 2.4 Modelo Numérico

O modelo numérico é uma ferramenta computacional utilizada para simular o comportamento de sistemas hidrogeológicos e geotécnicos, permitindo a análise quantitativa de processos físicos complexos. Diferente do modelo conceitual, que estabelece uma representação qualitativa do sistema, o modelo numérico traduz essa concepção em equações matemáticas que descrevem o fluxo subterrâneo, além da interação entre a água e estruturas (Kresic, 2006).

A construção de um modelo numérico envolve a definição do domínio do problema, a discretização do meio em uma malha computacional e a parametrização das propriedades hidráulicas e geotécnicas, como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e porosidade efetiva (Figura 5). Para garantir a confiabilidade dos resultados, a calibração é uma etapa fundamental, sendo realizada por meio da comparação entre os resultados simulados e os dados de campo observados. Esse processo é conduzido tanto para condições de regime permanente, onde se busca representar um estado de equilíbrio das condições hidráulicas, quanto para regime transitório, no qual a resposta do sistema é avaliada ao longo do tempo diante de variações naturais ou induzidas. A calibração em regime transitório é particularmente relevante para a análise de respostas sazonais, impactos de bombeamento e a evolução da saturação e fluxo em estruturas como barragens e pilhas de rejeito. Os padrões estatísticos devem ser levados em conta, como coeficiente de correlação entre os valores medidos e calculados na calibração, além de análises críticas referentes aos erros residuais apresentados pelo modelo.

No contexto de barragens, os modelos permitem a avaliação da dinâmica hídrica subterrânea, bem como avaliar a eficiência de projetos dos sistemas de drenagem interna e outras intervenções como medidas de impermeabilização de reservatórios, projetos de rebaixamento do

nível d'água, barreiras hidráulicas, além de avaliar alterações na dinâmica do fluxo subterrâneo que possam comprometer a estabilidade da estrutura (Figura 6) ou alterar a qualidade da água dos sistemas aquíferos adjacentes. No descomissionamento de barragens e pilhas, a modelagem auxilia na avaliação de projetos de reforço, drenagem, remoção ou reconfiguração dos materiais depositados, possibilitando a avaliação dos efeitos sobre o regime hidrogeológico local e a mitigação de riscos ambientais.

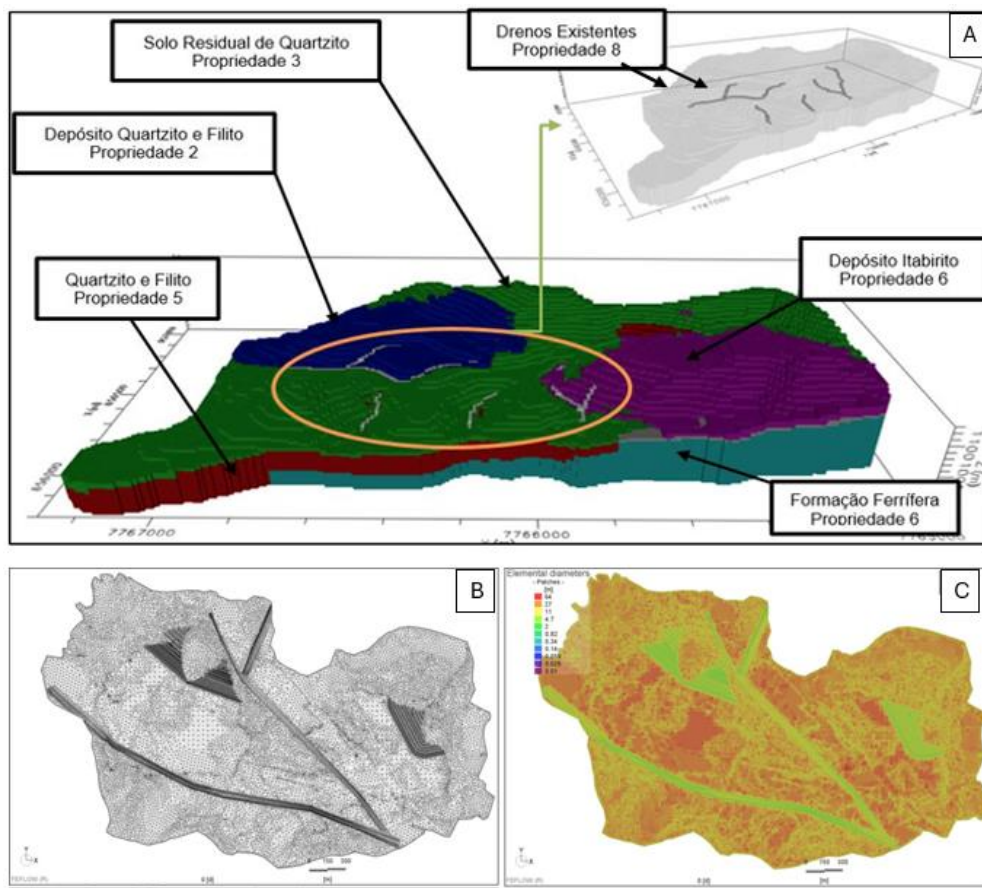


Figura 5: Representações de modelos numéricos aplicados para Pilhas (A) e para sistemas de barragens (B e C).

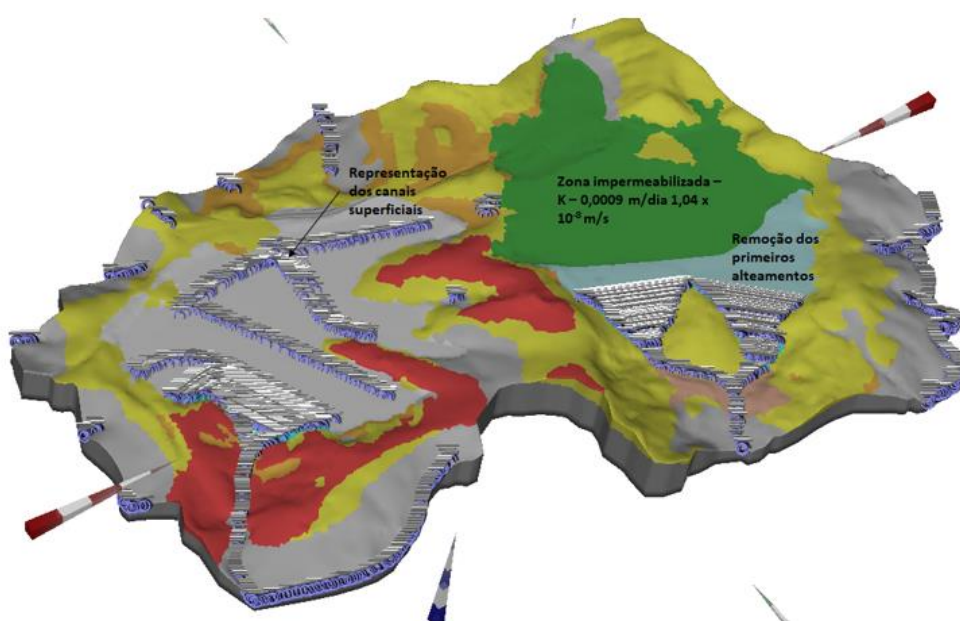


Figura 6: Exemplo esquemático de simulações realizadas para barragens.

Um exemplo de aplicação do modelo numérico em barragem de rejeito de ferro está apresentado na Figura 6. Neste exemplo foi desenvolvido um modelo com o objetivo de simular as condições de impermeabilização do reservatório de rejeitos, buscando minimizar ao máximo a recarga hídrica no sistema. Essa abordagem levou em conta não apenas a impermeabilização, mas também alterações estruturais significativas, como a remoção de parte dos rejeitos e alteamentos. Essa simulação foi elaborada especificamente no contexto do descomissionamento da estrutura geotécnica, um processo crítico que requer uma avaliação detalhada das mudanças hidrogeológicas e geotécnicas. O papel central do modelo numérico foi prever o comportamento do nível freático na região de estudo após as modificações propostas, gerando dados que serviriam como base para a construção de novos modelos com foco geotécnico, incluindo análises de percolação, estabilidade de taludes e tensões-deformação (Fetter, 2001; Anderson *et al.*, 2015).

É importante destacar que esse tipo de simulação possui uma ampla aplicabilidade, podendo ser estendido a dimensionamento de sistemas de rebaixamento de superfícies de nível d'água em barragens e pilhas, até mesmo para projeção de estruturas para contenção de migração de cargas contaminantes para os sistemas aquíferos adjacentes. Essa abordagem permite obter informações confiáveis sobre o nível d'água em uma determinada área quando submetida a um número específico de poços, sejam eles verticais, direcionais ou inclinados. Esses dados são essenciais para otimizar o gerenciamento hídrico durante intervenções estruturais, garantindo a segurança e a estabilidade das estruturas ao longo do tempo (Bear & Verruijt, 1987). Assim, o modelo numérico não apenas apoia o descomissionamento, mas também oferece uma base técnica para decisões em projetos de engenharia geotécnica e hidrogeológica.

### **3. CONCLUSÕES**

A elaboração de um modelo hidrogeológico para aplicações geotécnicas revela-se uma ferramenta essencial para a compreensão e gestão dos sistemas subterrâneos, integrando dados geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos em um processo multidisciplinar. A partir do levantamento de dados primários, que estabelece a base factual do sistema, passando pela caracterização hidroquímica e isotópica, que detalha a qualidade e origem da água, até o desenvolvimento de modelos conceituais e numéricos, cada etapa contribui para uma representação mais fidedigna do comportamento hidrodinâmico dos aquíferos. Esses modelos têm por objetivo, não apenas descrever a distribuição do fluxo subterrâneo e os processos de recarga e descarga, mas também prever os impactos de intervenções antrópicas, como bombeamento, impermeabilização ou descomissionamento de estruturas geotécnicas e migração de compostos químicos nos sistemas aquíferos adjacentes.

No contexto apresentado, a aplicação prática desses modelos em estruturas como barragens de rejeitos e pilhas demonstra sua relevância para a análise da estabilidade geotécnica e a mitigação de riscos ambientais. Assim, os modelos hidrogeológicos não apenas ampliam o entendimento científico dos sistemas subterrâneos, mas também oferecem suporte técnico indispensável para a tomada de decisões em projetos de engenharia e mineração, promovendo a segurança estrutural e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Dessa forma, sua construção e aplicação reafirmam a importância de abordagens integradas e adaptadas às especificidades de cada área de estudo, garantindo soluções eficazes para os desafios geotécnicos e ambientais contemporâneos.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a MDGEO, Hidrogeologia e Meio Ambiente pela liberação de informações e estudos.

### **REFERÊNCIAS**

FEITOSA, F. A. C., MANOEL, J. A., FEITOSA, E. C., & DEMETRIO, J. G. A. (2008). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

- BEAR, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier.
- ANDERSON, M. P., & WOESSNER, W. W. (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.
- FETTER, C. W. (2001). Applied Hydrogeology (4th ed.). Prentice Hall.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. (1983). Hydrogeology. Ediciones Omega.
- KRESIC, N. (2006). Hydrogeology and Groundwater Modeling. CRC Press.
- KENDALL, C., & MCDONNELL, J. J. (1998). Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier.
- CLARK, I., & FRITZ, P. (1997). Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press.