XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/53

Modelagem Numérica de Sismicidade Induzida por Reservatório: Estudo de Caso da Barragem Irapé

Sabrine Júlia Alves Rodrigues
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, sabrinejjarodrigues@gmail.com

Giuliano Santanna Marotta
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, marotta@unb.br

Antônio Maurício Nabuco Tartarini
Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, antonio.tartarini@petrobrás.com.br

Manoel Porfírio Cordão Neto
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, porfirio@unb.br

RESUMO: A sismicidade induzida por reservatórios (SIR) é um fenômeno decorrente da modificação das condições de tensão e pressão nos maciços rochosos ocasionada pelo enchimento de grandes barragens. Diversos registros históricos, no Brasil e no exterior, demonstram que variações abruptas do nível d'água podem atuar como mecanismos de gatilho para a ocorrência de sismos. No contexto nacional, dos 19 casos documentados, destaca-se o evento de novembro de 1973, quando um sismo de magnitude 4,2 foi associado aos reservatórios vizinhos de Porto Colômbia (SP) e Volta Grande (MG). Na Usina Hidrelétrica Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira (UHE Irapé), localizada no rio Jequitinhonha, região nordeste de Minas Gerais, foram igualmente registrados eventos associados à sismicidade induzida durante o enchimento do reservatório. Com 205 m de altura, trata-se da barragem mais alta do Brasil, em operação desde 2006, com potência instalada de 399 MW. O monitoramento sismológico da UHE Irapé foi implantado em 2003, e o enchimento do reservatório iniciou-se em dezembro de 2005. Nenhum evento sísmico havia sido registrado até então; entretanto, pequenos sismos foram detectados logo após o início do enchimento, culminando em um evento de magnitude 3,0, ocorrido em 14 de maio de 2006 e sentido por moradores do distrito de Lelivélia e por operários da usina. Estudos posteriores indicam que a resposta não drenada das rochas micaxistosas de baixa permeabilidade levou ao acúmulo de poropressões e à reação poroelástica do maciço, desestabilizando falhas pré-existentes e caracterizando o evento como SIR. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo propor e estruturar uma metodologia de modelagem computacional, baseada no método dos elementos finitos, para a análise da sismicidade induzida pelo enchimento de reservatórios, aplicada, em nível conceitual, ao caso da UHE Irapé. A metodologia fundamenta-se em uma revisão técnica e sistemática da literatura especializada, com ênfase em abordagens de modelagem numérica para representação explícita da reativação de falhas geológicas. São discutidos os fundamentos teóricos da modelagem dinâmica em elementos finitos, bem como estratégias de definição de condições de contorno, propriedades constitutivas e carregamento hidráulico transiente, com destaque para o uso do software ABAQUS. A sistematização proposta visa fornecer um arcabouço conceitual e metodológico consistente para a investigação dos mecanismos físicos associados à SIR, contribuindo para a interpretação de eventos observados e para o aprimoramento de práticas de monitoramento sísmico e avaliação da segurança de grandes barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Sismicidade Induzida, Modelagem Numérica, Irapé, Enchimento de Reservatórios.

ABSTRACT: Reservoir-induced seismicity (RIS) is a phenomenon resulting from modifications in stress and pore pressure conditions within rock masses caused by the impoundment of large dams. Numerous historical records, both in Brazil and worldwide, demonstrate that abrupt variations in reservoir water levels may act as triggering mechanisms for seismic events. In the Brazilian context, among the 19 documented cases, the November 1973 event stands out, when a magnitude 4.2 earthquake was associated with the neighboring Porto

Colômbia (São Paulo) and Volta Grande (Minas Gerais) reservoirs. At the Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira Hydroelectric Power Plant (UHE Irapé), located on the Jequitinhonha River in northeastern Minas Gerais, Brazil, seismic events associated with reservoir-induced seismicity were likewise recorded during reservoir filling. With a height of 205 m, Irapé is the tallest dam in Brazil and has been in operation since 2006, with an installed capacity of 399 MW. Seismological monitoring at the site was implemented in 2003, and reservoir filling began in December 2005. No seismic events had been recorded prior to that time; however, small earthquakes were detected shortly after the onset of filling, culminating in a magnitude 3.0 event on May 14, 2006, which was felt by residents of the Lelivélia district and by plant workers. Subsequent studies indicate that the undrained response of low-permeability mica-schist rocks led to pore pressure buildup and a poroelastic response of the rock mass, destabilizing pre-existing faults and characterizing the event as RIS. In this context, the present study aims to propose and structure a computational modeling methodology, based on the finite element method, for the analysis of reservoir-induced seismicity associated with reservoir impoundment, conceptually applied to the UHE Irapé case. The methodology is grounded in a systematic technical review of the specialized literature, with emphasis on numerical modeling approaches for the explicit representation of geological fault reactivation. The theoretical foundations of dynamic finite element modeling are discussed, as well as strategies for defining boundary conditions, constitutive properties, and transient hydraulic loading, with particular emphasis on the use of ABAQUS software. The proposed systematization aims to provide a consistent conceptual and methodological framework for investigating the physical mechanisms associated with RIS, contributing to the interpretation of observed events and to the improvement of seismic monitoring practices and safety assessment of large dams.

KEYWORDS: Induced Seismicity, Numerical Modeling, Irapé, Reservoir Impoundment.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Assumpção e Dias Neto (2001), sismos ou terremotos ocorrem quando o limite de resistência das descontinuidades das rochas é ultrapassado em decorrência do acúmulo de tensões geradas pelo movimento lento das placas litosféricas, que se deslocam alguns centímetros por ano. Quando ocorre a ruptura, a energia acumulada é liberada na forma de vibrações, ondas, que se propagam em todas as direções e podem ser captadas por sismógrafos. O plano da ruptura caracteriza-se como uma falha geológica, e os sismos podem se manifestar tanto no contato entre placas, que se trata de uma situação mais frequente, quanto no interior delas, sem que a ruptura necessariamente chegue à superfície.

Os eventos sísmicos podem ocorrer por causas naturais (de origem tectônica ou geológica intrínseca) ou antrópicas. Diferentemente dos eventos sísmicos naturais, os sismos induzidos resultam de alterações nas condições de tensão e pressão dentro da crosta terrestre, provocadas por intervenções antrópicas como o enchimento de reservatórios de barragens, a exploração mineral, fraturamento hidráulico, extração de petróleo e gás, e injeção ou retirada de fluidos do subsolo (Ammon et al., 2021).

Essas atividades de engenharia podem reduzir as tensões efetivas normais que mantêm as falhas geológicas travadas, facilitando o seu deslizamento e, consequentemente, a ocorrência de abalos sísmicos (Ammon et al., 2021). Conforme Barros et al. (2016), a sismicidade induzida por reservatório (SIR) é o tipo mais comum de sismicidade induzida e ocorre devido ao efeito da massa de água do reservatório que pode vir a causar um aumento significativo nas tensões efetivas que atuam sobre as rochas da fundação do reservatório. Nesse contexto, a sismicidade induzida é um fenômeno dinâmico e complexo. Assumpção et al. (2002) discutem que o efeito do reservatório é relativamente pequeno em comparação às tensões liberadas por alguns dos maiores eventos do tipo e, portanto, essa sismicidade só poderia ocorrer em locais com rochas próximas do estado de tensões tectônicas críticas. No entanto, Barros et al. (2016) argumentam que no Brasil a probabilidade de ocorrência de sismicidade induzida por reservatório torna-se expressiva maior do que 50% de chance ao se tratar de grandes reservatórios, com altura superior a 100 m.

No mundo, 127 eventos sísmicos foram registrados como sismicidade induzida por reservatório e dentre eles, quatro eventos apresentaram magnitude superior a 4.0 (Qiu e Fenton, 2015). O Brasil apresenta 19 casos confirmados de sismicidade induzida por reservatório (França et al., 2008). O primeiro caso ocorreu em 1971, na usina de Capivari-Cachoeira, na região da Serra do Mar, no estado do Paraná, com sismo registrado de 2.8

de magnitude na escala Richter. Dos 19 casos registrados, destaca-se o maior evento de sismicidade induzida por reservatório ocorrido em 1974, com magnitude 4,2 e intensidade MMI VI–VII, na região dos reservatórios vizinhos de Volta Grande, em Minas Gerais, e Porto Colômbia, em São Paulo, cujos enchimentos tiveram início em abril e setembro de 1973, respectivamente (Veloso, 1992).

Conforme Chen & Talwani (2001), a sismicidade inicial corresponde à resposta imediata, ou não drenada, na qual o carregamento hidráulico resulta em variações instantâneas no estado de tensão, bem como em um aumento súbito da poropressão. Essas alterações podem reduzir a resistência efetiva e provocar uma variação instantânea da resistência ao cisalhamento ao longo da falha. O segundo processo é a resposta retardada, associada à dissipação da poropressão no interior do maciço rochoso ao longo do tempo. À medida que a poropressão se propaga pelas fraturas e zonas permeáveis, ocorre uma redução adicional da tensão efetiva normal, contribuindo para uma variação lenta da resistência ao cisalhamento ao longo da falha e possibilitando a ativação sísmica mesmo semanas ou meses após o enchimento inicial.

As barragens de água são essenciais para a geração de energia elétrica e para a segurança hídrica, constituindo obras de grande impacto econômico e social. No entanto, a fase de enchimento, após a construção da estrutura, demanda atenção e monitoramento, tendo em vista que a rápida alteração das condições de pressão e tensão nos maciços rochosos da fundação podem induzir sismos, o que reforça a necessidade de estudos preventivos para garantir a segurança estrutural, ambiental e das populações potencialmente afetadas.

Do ponto de vista acadêmico, a análise e previsão de sismos induzidos contribuem para o avanço do conhecimento em geomecânica e sismologia, permitindo compreender a interação entre estruturas da engenharia e o meio geológico-geotécnico. Já na perspectiva prática, o estudo torna-se fundamental para subsidiar planos de monitoramento sísmico, definição de protocolos de operação segura durante o enchimento do reservatório de grandes barragens e adequação e revisão dos projetos de engenharia de barragens aos padrões de segurança exigidos para a execução e operação desse tipo de obra.

Localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, a Usina de Irapé (Usina Presidente Juscelino Kubitschek) é a barragem mais alta do país, com cerca de 205 m, sendo também a segunda maior da América do Sul (França et al., 2010). A barragem registrou aumento da atividade sísmica logo após o início do enchimento do reservatório e a finalização da estrutura, tendo como maior evento um sismo de magnitude 3.0 na escala Richter, registrado em 14 de maio de 2006, coincidente com o nível máximo de água no reservatório (Raza et al., 2024).

Nesse contexto, coloca-se em discussão de que forma a simulação numérica pode simular a sismicidade induzida por reservatórios com base no processo de reativação de falhas, de modo a contribuir para a compreensão desses fenômenos e para o aprimoramento da previsão desses eventos e mitigação de riscos associados. Sendo assim, o objetivo deste estudo é propor e estruturar uma metodologia de modelagem computacional, para a análise da sismicidade induzida pelo enchimento de reservatórios, apoiada em estudos anteriores, com ênfase em formulações dinâmicas e na representação do processo de reativação de falhas geológicas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se em uma revisão técnica e crítica da literatura especializada, com o propósito de identificar, analisar e sistematizar pesquisas relacionadas à sismicidade induzida por reservatórios, com ênfase em estudos de caso e em abordagens de modelagem numérica voltadas à reativação de falhas geológicas. A revisão abrange trabalhos que utilizam formulações, considerando a interação entre tensões e poropressões, e destaca a aplicação do método dos elementos finitos por meio de ferramentas computacionais, como o *software* ABAQUS.

Com base nessa revisão, é estruturada uma metodologia de modelagem aplicada, em nível conceitual, ao contexto geológico e hidrológico da Usina Hidrelétrica de Irapé, visando representar os mecanismos físicos associados ao enchimento do reservatório e à possível reativação de falhas previamente existentes. Essa análise fornece a base conceitual e metodológica para a proposição do modelo numérico, além de permitir a identificação de parâmetros relevantes, hipóteses adotadas e limitações inerentes às abordagens previamente

empregadas.

Ressalta-se, contudo, que a metodologia proposta é apresentada em caráter conceitual, não contemplando sua implementação por meio de simulações numéricas do estudo de caso abordado, aspecto que representa uma limitação do presente estudo.

2.2 Sismicidade Induzida na Usina Hidrelétrica de Irapé

A Usina Hidrelétrica Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira, conhecida como Usina Hidroelétrica de Irapé ou Barragem Irapé, possui a barragem mais alta do Brasil, com 205 m de altura e 540 m de crista e se encontra localizada no rio Jequitinhonha, região nordeste do estado de Minas Gerais (AIRES, 2006). A estrutura, composta por enrocamento com núcleo argiloso fechando o vale, apresenta túneis de desvio na margem direita, tomada d'água, vertedouro e extravasor na margem esquerda e casa de força à jusante do barramento (CEMIG, 2025).

Com um reservatório de 5,95km³, potência instalada de 399MW e 3 unidades geradoras, as obras de construção da UHE Irapé iniciaram-se em 2002, entrando em operação no ano de 2006 (CEMIG, 2025). Logo em 2003, iniciou-se o monitoramento sismológico na região, com projeto de sistema composto por quatro estações sismográficas (IRP1, IRP2, IRP3 e IRP4), tendo em vista que um dos instrumentos (IRP1) parou de operar em maio de 2005. As distâncias entre as estações operantes e o eixo da barragem variam de 23 a 35 km, sendo a estação IRP2 a mais distante (Silva, 2014).

O enchimento do reservatório da UHE Irapé teve início em dezembro de 2005 e, segundo Chimpliganond et al. (2007), até esse momento não havia registro de eventos sísmicos na região. No entanto, pequenos sismos passaram a ser registrados um dia após o início do enchimento do reservatório. O evento de magnitude máxima ocorreu no dia 14 de maio de 2006 e alcançou 3.0 de magnitude de duração. Esse sismo foi sentido por morados da região de Lelivélia, distrito mais próximo da região do barramento, e por operários da UHE (Silva, 2014).

Segundo Raza et al. (2024), estudos analíticos e testes laboratoriais (avaliação da porosidade e permeabilidade dos maciços rochosos da fundação da barragem) sustentam a hipótese que a sismicidade inicial da região da UHE Irapé foi desencadeada por uma resposta não drenada da fundação ao enchimento do reservatório de Irapé, enquadrando o evento como sismicidade induzida por reservatório. A presença de micaxistos de baixa permeabilidade impediu a dissipação significativa da poropressões, levando a alterações no estado de tensões capazes de desestabilizar falhas pré-existentes. Na Figura 1 é apresentada uma descrição esquemática do mecanismo de SIR em UHE Irapé.

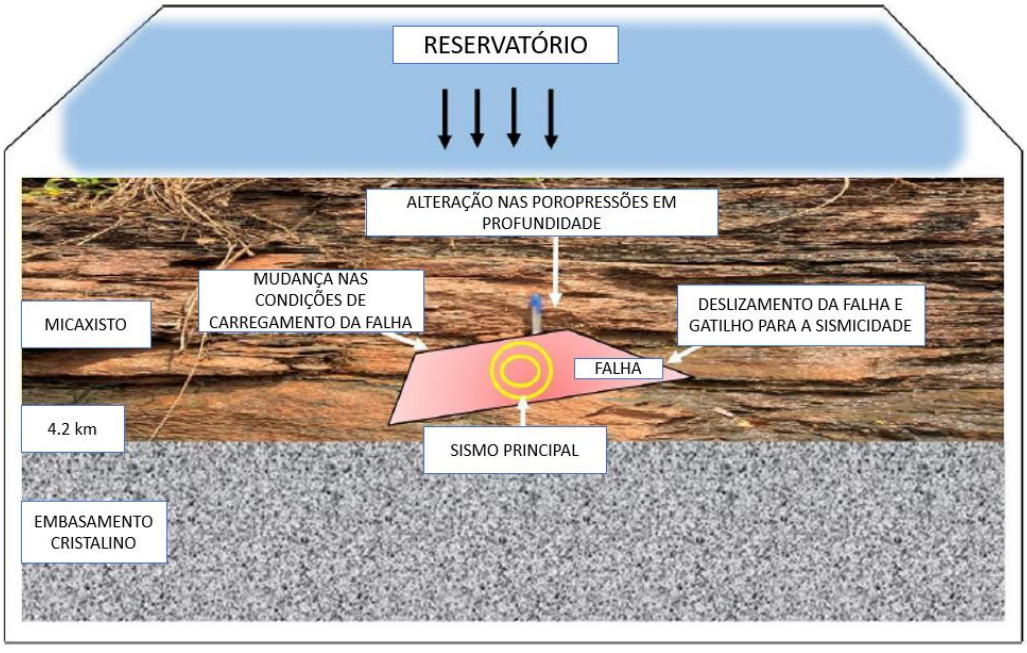


Figura 1. Descrição esquemática do mecanismo de SIR em Irapé. Adaptado de Raza et al. (2024).

Diante do exposto, observa-se que, para o caso da UHE Irapé, dispõe-se de um conjunto de informações relativas à geometria e às características da barragem e do reservatório, ao histórico de enchimento, ao monitoramento sismológico implantado previamente à operação e ao registro do evento máximo de magnitude 3,0, além de evidências geológicas que indicam a presença de micaxistos de baixa permeabilidade e a ocorrência de resposta.

Com base nesses dados, torna-se possível a simulação numérica do carregamento hidráulico decorrente do enchimento do reservatório e de seu potencial efeito na reativação de falhas, por meio de uma formulação dinâmica que permita avaliar a variação das tensões efetivas e dos critérios de ruptura. Essa abordagem possibilitará verificar se o modelo conceitual proposto é capaz de reproduzir, em termos físicos e mecânicos, o comportamento observado no caso de Irapé.

2.3 Modelagem Numérica de Processos de Reativação de Falhas

Dentre os métodos numéricos, destacam-se o método das diferenças finitas (Zhang et al., 2009; Fouladvand et al., 2009), o método dos elementos discretos (Zhang & Sanderson, 1996), o método dos elementos finitos (Vidal-Gilbert, 2009; Zhang et al., 2009; Mendes et al., 2010), bem como estratégias híbridas que combinam diferentes técnicas numéricas, visando capturar de forma mais realista a interação entre processos hidráulicos e mecânicos em meios fraturados (Rutqvist et al., 2007).

O método dos elementos finitos permite a representação consistente de meios contínuos heterogêneos, geometrias complexas e descontinuidades geológicas sob condições fortemente não lineares (Zienkiewicz et al., 2005; Belytschko et al., 2000). Em comparação com métodos de diferenças finitas e discretos, oferece maior flexibilidade na discretização espacial e na definição de leis constitutivas, além de possibilitar a simulação de processos dinâmicos transientes e da propagação de ondas elásticas, aspectos fundamentais na modelagem da reativação de falhas e da geração de sismos (Scholz, 2002; Aki & Richards, 2002).

A versatilidade do método dos elementos finitos possibilita a incorporação de formulações acopladas e não lineares, tornando-o particularmente apropriado para a simulação dos mecanismos físicos que governam a reativação de falhas e a geração de eventos sísmicos induzidos, por exemplo. Nesse contexto, a modelagem numérica da reativação de falhas associada à geração de sismos baseia-se na representação de processos físicos acoplados que atuam em diferentes escalas temporais.

O processo hidráulico controla a evolução espacial e temporal das poropressões no interior do reservatório e nas regiões adjacentes, influenciando diretamente a redução das tensões efetivas normais ao longo de planos de fraqueza preexistentes, conforme o princípio das tensões efetivas (Terzaghi, 1943) e os mecanismos de instabilidade induzida por fluido discutidos por Hubbert e Rubey (1959).

O processo geomecânico, por sua vez, governa a redistribuição do campo de tensões, o desenvolvimento de deformações e a mobilização do cisalhamento ao longo das falhas, podendo levar ao deslizamento instável quando o critério de resistência ao cisalhamento é superado (Jaeger et al., 2007; Scholz, 2002). Esse deslizamento abrupto resulta na liberação súbita de energia elástica acumulada no maciço rochoso, caracterizando a fonte sísmica e dando origem à propagação de ondas sísmicas, conforme descrito na teoria clássica da sismologia (Aki & Richards, 2002; Stein & Wysession, 2003).

A representação integrada desses mecanismos físicos constitui a base das abordagens numéricas empregadas na análise de sismos induzidos, exigindo formulações capazes de capturar simultaneamente a evolução das poropressões, a resposta geomecânica do maciço e a propagação dinâmica das ondas sísmicas.

Para a análise de fenômenos associados à reativação dinâmica de falhas geológicas e à geração de sismos induzidos, o *software* ABAQUS, dentre outros, oferece uma formulação robusta baseada no método dos elementos finitos em regime dinâmico-explícito. O módulo *ABAQUS/Explicit* resolve diretamente as equações do movimento a partir da integração explícita no tempo, fundamentada no método das diferenças centrais, dispensando a solução de sistemas globais de equações e evitando problemas de convergência típicos de formulações implícitas em cenários altamente não lineares (Dassault Systèmes, 2014).

Do ponto de vista teórico, a formulação explícita permite capturar a propagação de ondas mecânicas, a liberação abrupta de energia elástica e os efeitos inerciais associados ao deslizamento instável em planos de falha, sendo amplamente empregada em problemas de dinâmica estrutural e geomecânica (Belytschko et al., 2000; Zienkiewicz et al., 2005). No ABAQUS, falhas geológicas podem ser representadas por meio de

superfícies de contato com comportamento friccional dependente de tensão normal efetiva, utilizando leis constitutivas do tipo Coulomb ou formulações mais gerais de plasticidade, permitindo simular tanto o início quanto a evolução do deslizamento ao longo da descontinuidade (Dassault Systèmes, 2016).

Além disso, o códigodo *software* citado possibilita a extração direta de grandezas dinâmicas relevantes, como velocidades de partícula, acelerações, deslocamentos relativos e energia dissipada durante o processo de ruptura, tornando viável a correlação entre o comportamento numérico da falha e parâmetros observáveis em registros sismológicos. Dessa forma, a modelagem dinâmico-explícita no ABAQUS constitui uma ferramenta adequada para investigar os mecanismos físicos associados à reativação de falhas induzida por variações de tensão e poropressão em maciços rochosos, fornecendo suporte teórico e numérico para a interpretação de eventos de sismicidade induzida por reservatórios.

Como exemplo de aplicação de modelagem numérica voltada à análise de sismicidade induzida, destaca-se o trabalho de Rutqvist et al. (2016), no qual foi empregada uma abordagem hidromecânica acoplada para simular a reativação de falhas decorrente da injeção de CO_2 em reservatórios geológicos profundos. Os autores utilizaram o simulador TOUGH-FLAC, que integra a modelagem de fluxo multifásico em meios porosos com análises geomecânicas, permitindo representar a evolução das poropressões, a redistribuição de tensões e os mecanismos de ruptura associados à reativação de descontinuidades geológicas.

A reativação da falha foi simulada por meio do aumento gradual da poropressão associado à injeção de CO_2, combinado a um modelo constitutivo de enfraquecimento por cisalhamento (*slip-weakening*), permitindo reproduzir a perda de resistência da descontinuidade e a consequente ruptura sísmica.

Embora o mecanismo de indução analisado seja distinto daquele associado à SIR, os resultados apresentados por Rutqvist et al. (2016) demonstram a capacidade da modelagem numérica em reproduzir o processo de reativação de falhas geológicas, de forma a obsevar a propagação de ondas, velocidades de partícula e acelerações na superfície do terreno (ver Figura 2).

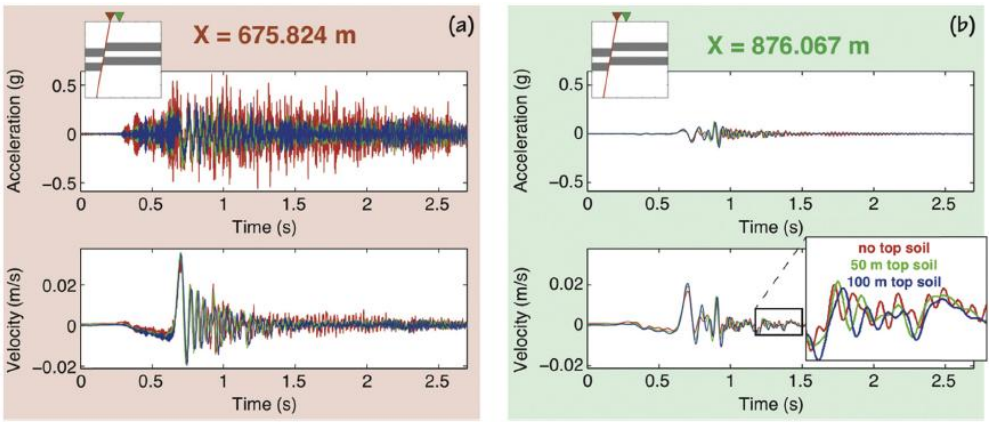


Figura 2. Componentes simuladas de aceleração e velocidade horizontais em (a) X = 676 m (sobre o topo da falha) e (b) X = 876 m (a 200 m da falha), considerando cenários com e sem uma camada superficial de solo mais deformável (mais macia) (resultados de Rutqvist et al., 2014). Adaptado de Rutqvist et al. (2016).

3 DISCUSSÕES FINAIS

A análise desenvolvida evidencia que a modelagem da sismicidade induzida associada à Usina Hidrelétrica de Irapé deve fundamentar-se em uma análise capaz de representar de forma integrada a evolução das poropressões e a redistribuição do campo de tensões no maciço rochoso da fundação e no entorno do reservatório. A representação explícita de descontinuidades estruturais, especialmente de uma falha potencialmente reativável, é essencial para capturar os mecanismos físicos envolvidos, devendo essa descontinuidade ser modelada por elementos de interface ou superfícies de contato com comportamento friccional dependente da tensão normal efetiva. A caracterização constitutiva dos materiais deve basear-se em parâmetros obtidos por ensaios laboratoriais, investigações geológico-geotécnicas e valores de referência da literatura, enquanto o estado inicial de tensões deve incorporar a contribuição tectônica regional combinada às tensões gravitacionais.

O enchimento do reservatório deve ser simulado como um carregamento hidráulico transiente, permitindo reproduzir tanto a resposta não drenada inicial quanto a dissipação das poropressões ao longo de fraturas e zonas mais permeáveis. Esse processo é reconhecido como fator determinante na redução das tensões efetivas normais e na aproximação do sistema ao limiar de ruptura, podendo concentrar deformações cisalhantes de forma localizada e favorecer a nucleação de instabilidades. Nesse contexto, a retroanálise dos registros sísmicos observados durante o enchimento constitui ferramenta relevante para a calibração do modelo, ajustando parâmetros de resistência e permeabilidade de modo a compatibilizar a resposta numérica com a evolução temporal da atividade sísmica registrada na área.

Ao analisar a literatura especializada, observa-se que a reprodução numérica da sismicidade induzida normalmente envolve modelos hidromecânicos acoplados e leis constitutivas capazes de representar a redução progressiva da resistência ao cisalhamento da descontinuidade geológica durante o processo de deslizamento, permitindo simular desde o gatilho da ruptura até a propagação das ondas sísmicas e, consequentemente, a ocorrência de eventos sísmicos.

Com base nesse encadeamento conceitual, propõe-se a organização das etapas de simulação em um fluxo metodológico estruturado, conforme apresentado na Figura 3, que integra a caracterização geológica e geomecânica, a definição do modelo numérico em elementos finitos, a aplicação do carregamento hidráulico transiente, a verificação das condições de ruptura e a análise dinâmica explícita da reativação da falha.

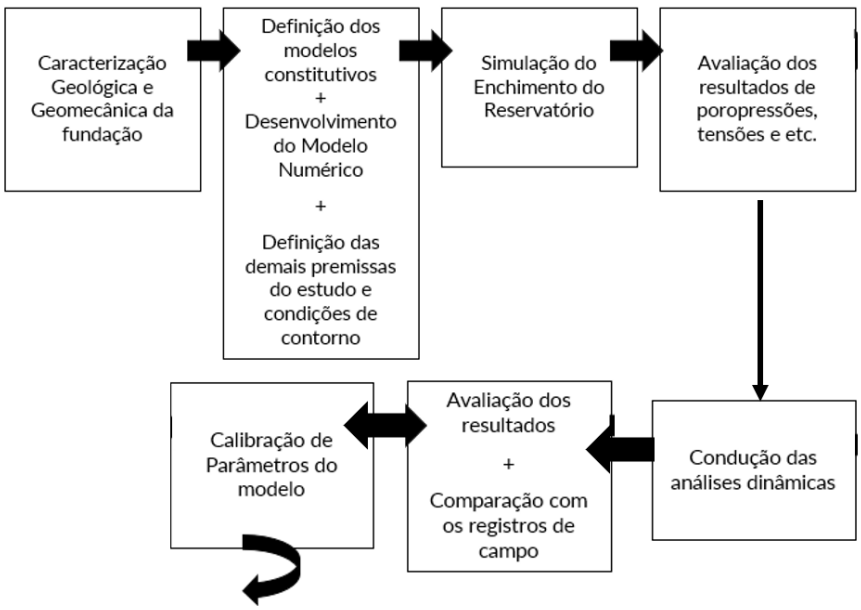


Figura 3. Fluxograma metodológico proposto para a modelagem numérica da sismicidade induzida por reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília e à Petrobrás pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKI, K.; RICHARDS, P. G. Quantitative seismology. 2. ed. Sausalito: University Science Books, 2002.

BELYTSCHKO, T.; LIU, W. K.; MORAN, B. Nonlinear finite elements for continua and structures. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

COSTA, A. M. Estudo do acoplamento hidromecânico em reservatórios fraturados. 1984. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

DASSAULT SYSTÈMES. ABAQUS Analysis User's Manual. Providence: Dassault Systèmes, 2014.

DASSAULT SYSTÈMES. ABAQUS Theory Manual. Providence: Dassault Systèmes, 2016.

HUBBERT, M. K.; RUBEY, W. W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. Geological Society of America Bulletin, v. 70, n. 2, p. 115–166, 1959.

KIM, J.; TCHELEPI, H. A.; JUANES, R. Stability, accuracy, and efficiency of sequential methods for coupled flow and geomechanics. SPE Journal, v. 16, n. 2, p. 249–262, 2011.

MENDES, R. M.; ROEHL, D.; COSTA, A. M. Hydromechanical modeling of fault reactivation in fractured reservoirs. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 47, n. 7, p. 1110–1122, 2010.

PEREIRA, J. P.; ROEHL, D.; COSTA, A. M. Avaliação numérica de limites de pressão de injeção considerando acoplamento hidromecânico. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 34, n. 2, p. 45–58, 2014.

RUEDA, J. A. Modelagem numérica do acoplamento hidromecânico em reservatórios geotérmicos. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

RUTQVIST, Jonny; RINALDI, Antonio P.; CAPPA, Frédéric; JEANNE, Pierre; MAZZOLDI, Alberto; URPI, Luca; GUGLIELMI, Yves; VILARRASA, Victor. Fault activation and induced seismicity in geological carbon storage: lessons learned from recent modeling studies. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 8, n. 6, p. 789–804, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.09.001.

SCHOLZ, C. H. The mechanics of earthquakes and faulting. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

SETTARI, A.; WALTERS, D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling. SPE Journal, v. 6, n. 3, p. 334–342, 2001.

STEIN, S.; WYSESSION, M. An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.

VIDAL-GILBERT, S. Hydromechanical modeling of fault reactivation in reservoir systems. 2009. PhD Thesis – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2009.

ZHANG, X.; SANDERSON, D. J. Numerical modeling of fault reactivation. Journal of Structural Geology, v. 18, n. 1, p. 117–126, 1996.

ZHANG, X.; WONG, L. N. Y.; LI, G. Finite difference modeling of fault slip induced by fluid injection. Journal of Geophysical Research, v. 114, p. 1–15, 2009.

BOSTRØM, B.; SKOMEDAL, E. Reservoir aeromechanics with ABAQUS. In: ABAQUS Users' Conference, p. 117-131, 2004.

CASTAÑO, M. A. R. Modelagens 2D e 3D para avaliação de reativação de falhas geológicas em reservatórios de petróleo. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CORDERO, J. A. R. Reativação de falhas geológicas com modelos numéricos discretos e distribuído. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FOULADVAND, A. et al. Geomechanical modeling integrating subseismic faults. In: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineering, 2009.

HERGERT, T. et al. Modelling production-induced dynamic rupture of intra-graben faults and related earthquakes in the north german basin. Geomechanics for Energy and the Environment, v. 31, 100342, 2022.