



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 2 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n2ID31472>



Análise do estado de tensão na característica de sismos induzidos por reservatório para um estudo de caso da UHE de Irapé em Minas Gerais

Analysis of the state of stress in the characteristic of reservoir-induced earthquakes for a case study of the Irapé HPP in Minas Gerais

Iarly Vanderlei da Silveira¹; Lineu José Pedroso²; Davidson de Oliveira de França Júnior³

¹ Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília/DF, Brasil. Email: iarlysilveira@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3131-9001>

² Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília/DF, Brasil. Email: lineujp@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2734-3260>

³ Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Poços de Caldas/MG, Brasil. Email: davidson.francajunior@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8822-7178>

Resumo: O entendimento do comportamento da avaliação sísmica nas estruturas, em geral, é extremamente importante. Para regiões com sismos com baixas intensidades como o Brasil essa avaliação não é tão difundida, no entanto, existem riscos relacionados aos sismos originados pelo enchimento do reservatório, pouco abordado pelos projetistas, que são desencadeados próximos ao barramento e podem provocar possíveis danos a estrutura. A Usina Hidrelétrica (UHE) de Irapé é a mais alta barragem do país, com 208 metros. Essa barragem foi monitorada pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (OBSIS-UnB) no enchimento do reservatório em 2006. Este trabalho objetiva avaliar a influência do enchimento do reservatório da UHE de Irapé e a sua correlação com os dados sísmicos capturados ao longo desse enchimento. Para isso, avaliou-se por meio do método dos elementos finitos via software ANSYS a região de influência do esforço adicional ao longo da crosta local. Os resultados apresentados constataram que os eventos ocorridos durante o enchimento da barragem estão dentro dos limites de variação do estado de tensão, sendo caracterizados como eventos induzidos pelo reservatório sendo predominantemente rasos, se encontrando em uma região de influência em distâncias menores que 4 km da superfície.

Palavras-chave: Avaliação Sísmica; UHE; Barragem; Sismo Induzido.

Abstract: The understanding of the seismic evaluation behavior in structures, in general, is extremely important. For regions with low-intensity earthquakes such as Brazil, this assessment is not as widespread, however, there are risks related to earthquakes caused by the filling of the reservoir, little addressed by designers, which are triggered close to the dam and can cause possible damage to the structure. The Irapé Hydroelectric Power Plant (HPP) is the highest dam in the country, at 208 meters. This dam was monitored by the Seismological Observatory of the University of Brasília (OBSIS-UnB) during the filling of the reservoir in 2006. This work aims to evaluate the influence of the reservoir filling of the Irapé HPP and its correlation with the seismic data captured during this filling process. For this, the region of influence of the additional effort along the local crust was evaluated by means of the finite element method via ANSYS software. The results presented found that the events that occurred during the filling of the dam are within the limits of variation of the state of tension, being characterized as events induced by the reservoir being predominantly shallow, being in a region of influence at distances smaller than 4 km from the surface.

Keywords: Seismic evaluation; HPP; Dam; Induced Earthquake.

Recebido: 09/02/2023; Aceito: 14/06/2023; Publicado: 13/08/2023.

1. Introdução

A sismicidade induzida é um campo do conhecimento que envolve diferentes áreas e se desencadeia quando ocorre uma variação do estado natural da crosta, influenciada por atividades humanas tais como construção de grandes barragens (Gupta, 1985, 2017; Gupta et al., 1972; Silva, 2014; Silveira, 2018), exploração geotérmica (Evans et al., 2012; Majer et al., 2011), extração de gás e petróleo (Buttinelli et al., 2016; Ruiz-Barajas et al., 2017), explosões nucleares (Arkipova et al., 2012; Balassanian, 2005), injeção de CO₂ (Nicol et al., 2011; Zoback & Gorelick, 2012) e aumento de carga sobre zonas específicas (Henriquet et al., 2019). Também, a sismicidade induzida requer estudos aprimorados aos possíveis riscos naturais que podem acontecer (McClure & Horne, 2014a, 2014b).

A sismicidade desencadeada por reservatório (SDR) é um fenômeno com influência antropogênica registrado concomitantemente e/ou posteriormente ao enchimento de um reservatório (geralmente Usina Hidrelétrica – UHE) e pode ser classificada em dois tipos: sismicidade inicial e sismicidade prolongada. A primeira está associada ao enchimento do reservatório na qual ocorre uma variação da cota de água, resultando em um aumento de carga (ou descarga) e um efeito tardio devido a difusão de pressão do poro (Gupta et al., 1972; Simpson, 1986; Talwani, 1995; Valoroso et al., 2009). Já a sismicidade prolongada é pouco observada e se relaciona com a amplitude e a frequência da oscilação do reservatório e as propriedades poroelásticas das rochas superficiais (Gupta, 2018).

No domínio da engenharia de construção das barragens, o conhecimento preliminar das características geotécnicas do local de instalação da barragem, assim como das informações sobre os esforços, taxa de deformação da crosta e os riscos de sismos são extremamente importantes para o cálculo nos projetos de tais estruturas (Mendes, 2018; Silveira et al., 2021; Silveira & Pedroso, 2018). No entanto, a avaliação dos esforços ao longo da crosta é algo bastante complexo, pois envolve elementos de diferentes características mecânicas e requer tratamento analítico muitas vezes limitados a uma simplificação da realidade. E como forma de contornar tal problema, o emprego do Método dos Elementos Finitos (FEM) se apresenta como uma alternativa viável, pois permite discretizar geometrias complexas e solucionar problemas em meios que envolvem diferentes materiais, não-linearidades, entre outros (Duarte & Kim, 2008).

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma discussão sobre os principais aspectos relacionados a análises da SDR, envolvendo a influência do carregamento adicional provocado pelo enchimento do reservatório ao longo da crosta local avaliando a região de influência desse esforço e a sua correlação com incidência de eventos sísmicos. Para isso, estudou-se um estudo de caso da UHE de Irapé no estado de Minas Gerais, onde durante o enchimento do reservatório foram quantificados os sismos no local, apresentando sua localização e intensidade. Já em relação a modelagem numérica avaliou-se a região de influência ao longo da crosta que esse esforço adicional provoca, possibilitando a delimitação da região que pode acontecer sismos induzidos. Dessa forma, o trabalho se destaca no pioneirismo nos estudos voltados para a sismicidade induzida correlacionada com a modificação do estado de tensões da crosta local com o enchimento do reservatório localizado em território brasileiro.

2. Caracterização da área de estudo – UHE de Irapé – MG

Para a realização do trabalho, foi definida a Usina Hidrelétrica (UHE) Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira, conhecida como UHE Irapé introduzida na Figura 1, como área de estudo. Esta UHE apresenta desnível de 208 metros, comprimento de 551 m e espelho d'água do reservatório com área com 137 km².

O enchimento do reservatório da UHE de Irapé foi iniciado em 2005 e finalizado em 2006, data da inauguração do empreendimento. Neste intervalo de tempo, foi realizado o monitoramento sísmológico, por meio de três estações sísmográficas (Figura 1), cuja finalidade foi analisar a sismicidade induzida por reservatório durante a etapa de enchimento.

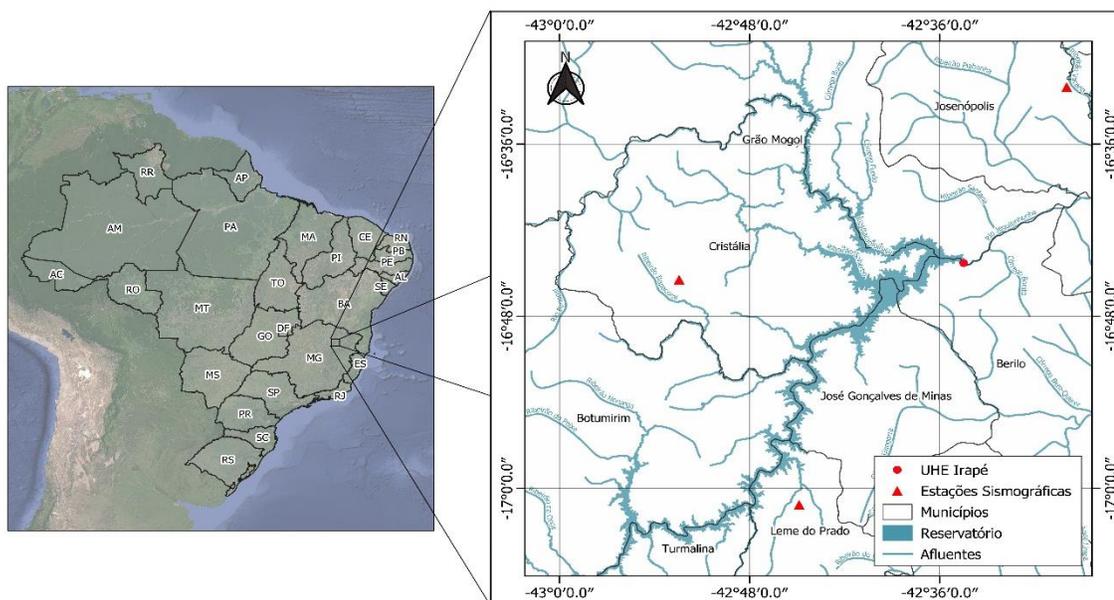


Figura 1 – Localização da UHE de Irapé – MG.

Fonte: Autores (2022).

As análises citadas foram feitas por (Chimpliganond et al., 2007; Silva, 2014). Chimpliganond et al. (2007) que realizaram estudos preliminares sobre a sismicidade induzida pelo reservatório da UHE Irapé e encontraram correlação direta entre os eventos sísmicos e o enchimento do reservatório, apresentado na Figura 2, mostrando que a maior magnitude registrada (3,0 mD) surgiu na fase final do enchimento do reservatório. Já Silva et al. (2014) estudaram a mesma sismicidade, caracterizaram a geologia ao redor da UHE de Irapé e verificaram que a orientação espacial dos eventos sísmicos condiziam com aquelas dos lineamentos de relevo, sugerindo que a direção dos possíveis planos de falhas está correlacionada ao principal direcionamento das estruturas rúpteis na área de estudo.

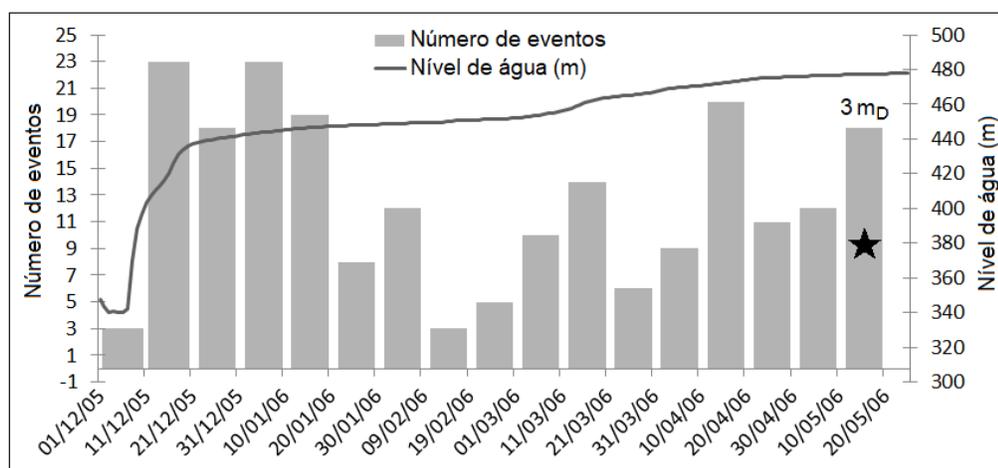


Figura 2 – Histograma de distribuição temporal do registro sísmico associado à variação do nível do reservatório (modificado de Chimpliganond et al., 2007 e Silva et al., 2014). O evento sísmico de maior magnitude (3 mD) está representado por uma estrela.

Fonte: Autores (2022).

A distribuição dos eventos sísmicos com suas respectivas magnitudes registrados durante o enchimento da barragem se apresentam próximos aos elementos estruturais da barragem conforme observado na Figura 3. Pode-se observar que a sismicidade está interligada com o enchimento do reservatório, apresentando maiores magnitudes ao longo do leito da barragem, local em que houve o acréscimo de pressão na crosta.

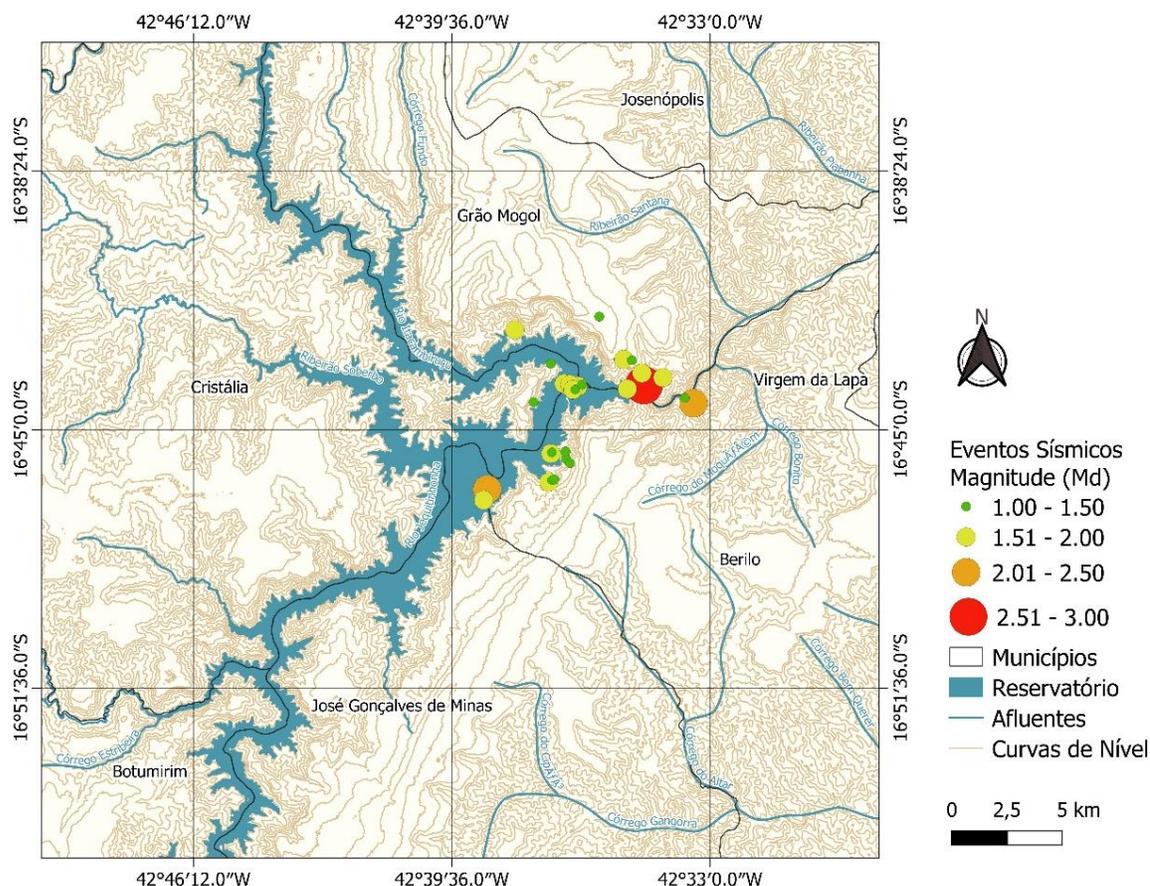


Figura 3 – Distribuição dos eventos sísmicos registrados durante o enchimento da barragem. Fonte: Autores (2022).

3. Análise da variação de estado de esforço e deformação

O enchimento do reservatório provocou a variação de estado de esforço e deformação na crosta local da UHE estudada, acarretando o surgimento dos sismos como observado na Figura 3. Com o intuito de verificar a influência do incremento de carregamento por meio desse enchimento usou-se um perfil ao longo do reservatório passando pelo sismo de maior intensidade, como visto na Figura 4, e observando a alteração de tensões na crosta ao longo da profundidade.

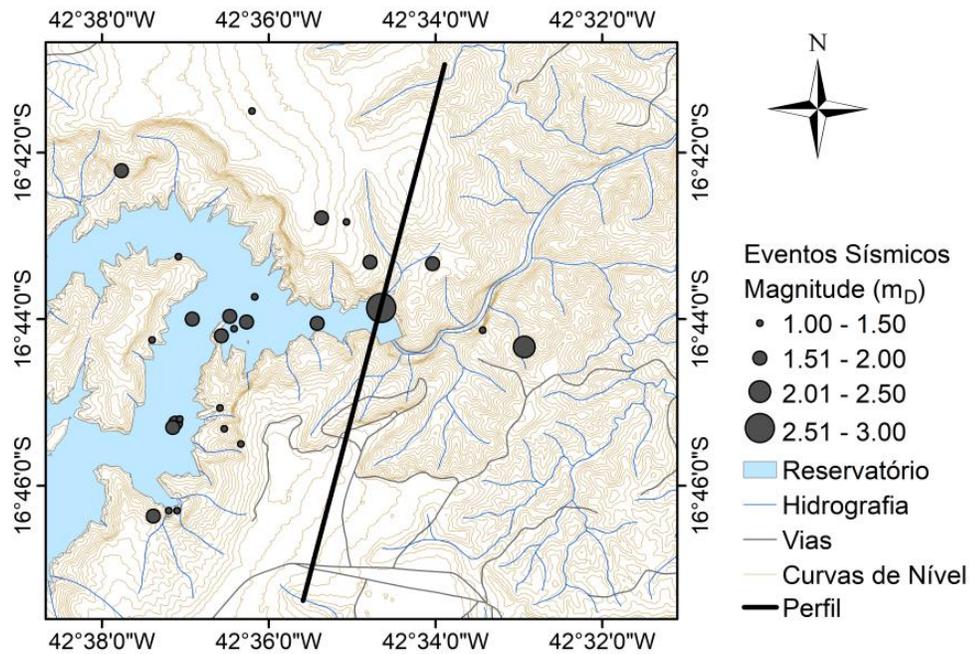


Figura 4 – Perfil e distribuição dos eventos sísmicos registrados durante o enchimento da barragem.
Fonte: Aurores (2022).

Para isso, foram utilizados dois perfis para caracterização dos esforços ao longo da crosta. O primeiro é apresentado na Figura 5, mostrando a geometria e o posicionamento do carregamento para o modelo de validação. Assim, assumiu-se as propriedades físicas da crosta considerando-a homogênea em uma seção retangular, com objetivo de avaliar a convergência do elemento finito utilizado na modelagem. Adotou-se um perfil com uma carga constante ao longo da superfície de 1000 m de comprimento. A força adicionada se refere ao peso da água em sua cota máxima de 180 m, aplicada ao longo da superfície. Efetuou-se o estudo de convergência ao longo da Reta $Y_0 - Y_{4000}$ m em termos de tensões e deslocamentos. Deve-se ressaltar que em ambos os casos de estudo adotou-se as condições de contorno referente a deslocamentos nulos verticais na base, e horizontais nas laterais.

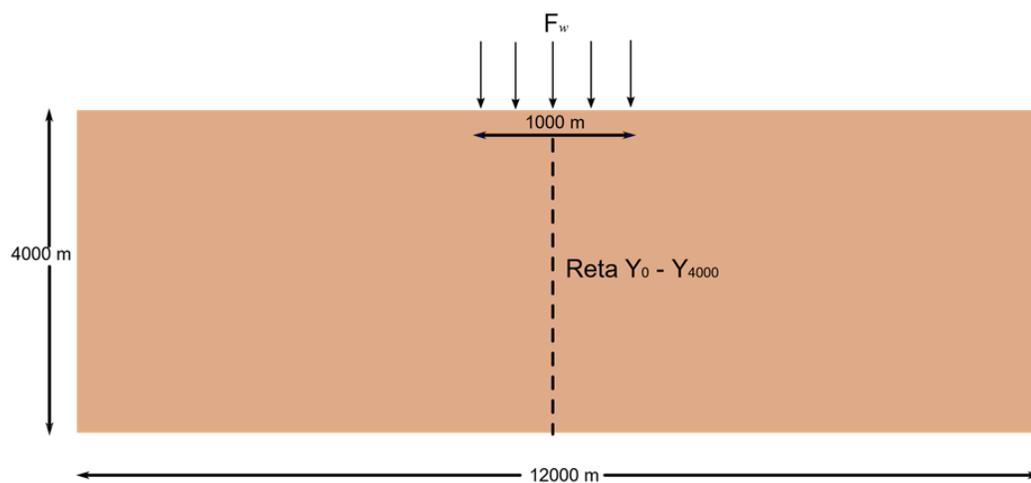


Figura 5 – Perfil homogêneo para a validação do modelo
Fonte: Autores (2022).

Já o segundo foi considerado um perfil próximo aos elementos estruturais da UHE de Irapé apresentado na Figura 6, passando pelo maior evento sísmico registrado e considerando maior comprimento de lâmina de água e maior profundidade do reservatório

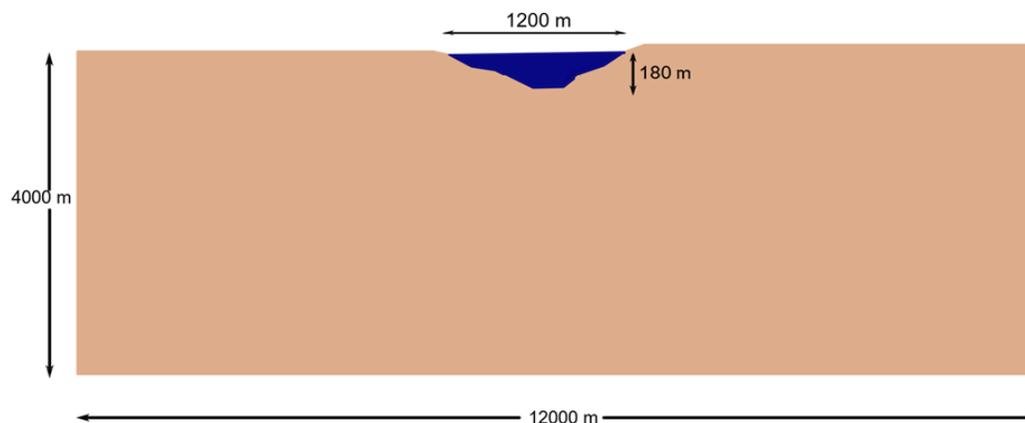


Figura 6 – Perfil de estudo da região da UHE Irapé.
Fonte: Autores (2022).

Para esse modelo bidimensional referente ao perfil da UHE de Irapé compreendeu uma seção crustal de 12 km de comprimento e 4 km de profundidade com comportamento mecânico elástico. Já a região do reservatório (Figura 6) compreende um trecho de 1200 m de comprimento com profundidade variando ao longo da seção, sendo máxima a 180 m.

Ademais, adotou-se propriedade elástica média para a crosta continental utilizando módulo de Young 70000 MPa, coeficiente de Poisson de 0,25 e densidade média da crosta de 2670 kg/m³. Para o cálculo da magnitude do esforço referente ao peso da água usou-se a Equação 1. As propriedades adotadas se basearam no estudo de Silva et al., 2014 que avaliaram a geologia local da UHE de Irapé como rochas supracrustais.

Equação 1 Pressão da água numa cota h:

$$P = \rho gh = \gamma h \quad (1)$$

Onde ρ representa a massa específica da água; g o valor de gravidade, γ o peso específico e h a cota d'água.

Na modelagem do esforço/deformação, para um meio viscoelástico homogêneo, isotrópico e linear para a crosta local adotou-se o elemento finito de Biblioteca do ANSS, PLANE 183, para o estado plano de deformação. Este elemento é definido por 8 ou 6 nós com dois graus de liberdade em cada nó: translação nodal nas direções x e y (Figura 7-a), podendo ser um elemento plano ou assimétrico.

Para a modelização da falha deve-se utilizar elementos de contato que simule a descontinuidade em uma determinado local. Para isso, adotou-se dois elementos: Conta 172 (Figura 7-b) e Target 169 (Figura 7-c) que representam, respectivamente, o contato e o deslizamento entre áreas “alvo” e áreas deformáveis.

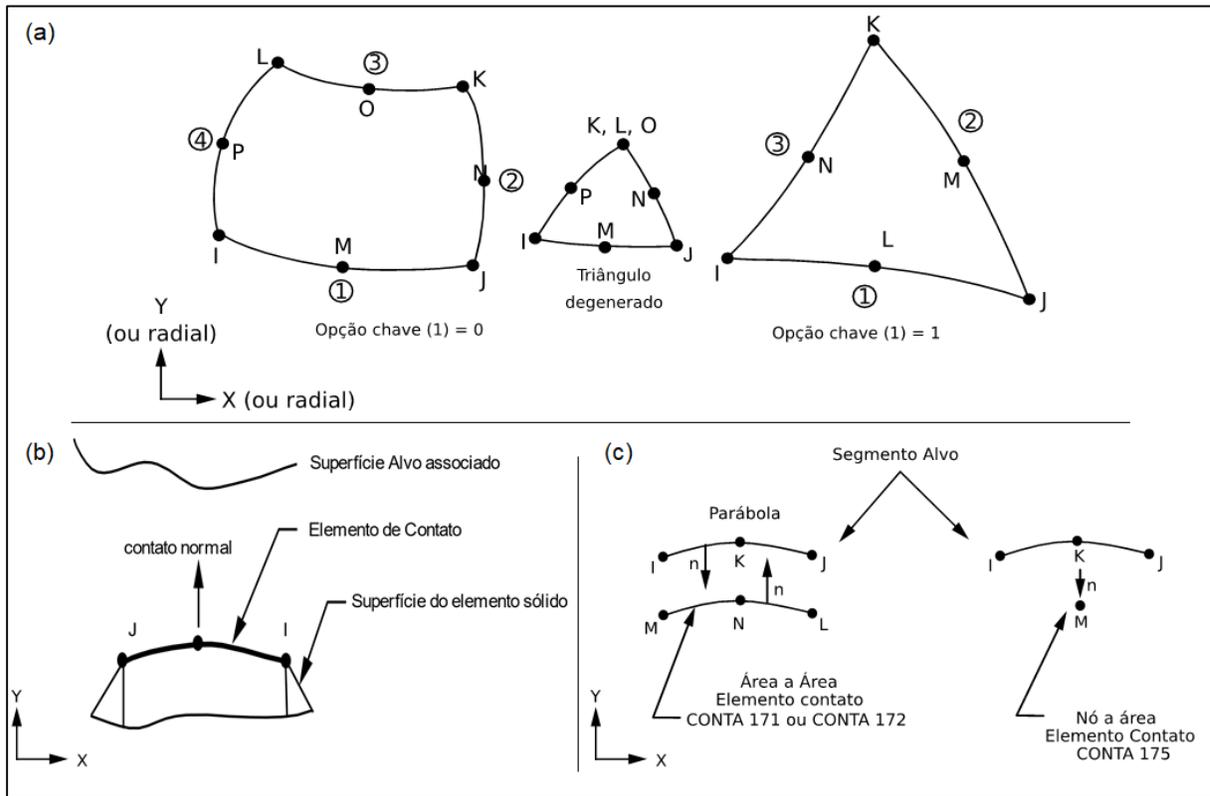


Figura 7 – Elementos Plane 183 (a); Conta 172 (b) e Targe 169 (c)
 Fonte: (ANSYS® Multiphysics v.14.5. Ansys Inc., n.d.).

Em relação a modelização do sistema, usou-se um modelo que possui 2595 elementos e 8119 nós, com geometria variável e com condições de contorno apresentando deslocamento vertical nulo na base e o movimento horizontal nas laterais também nulos. Já para as cargas do modelo adotou-se a pressão expressa pela equação 1. Esse modelo está apresentado na Figura 8.

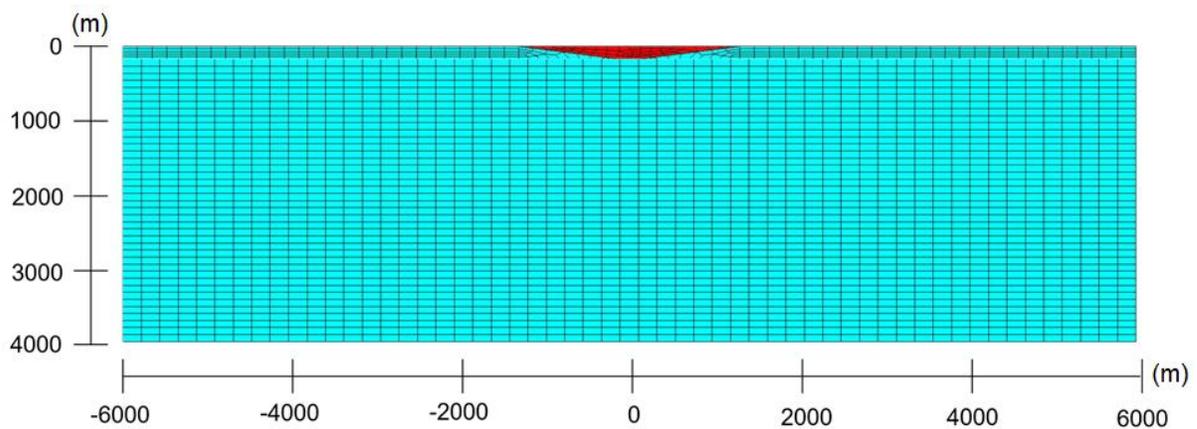


Figura 8 – Malha do perfil da crosta da barragem da UHE Irapé.
 Fonte: Autores (2022).

4. Resultados e discussão

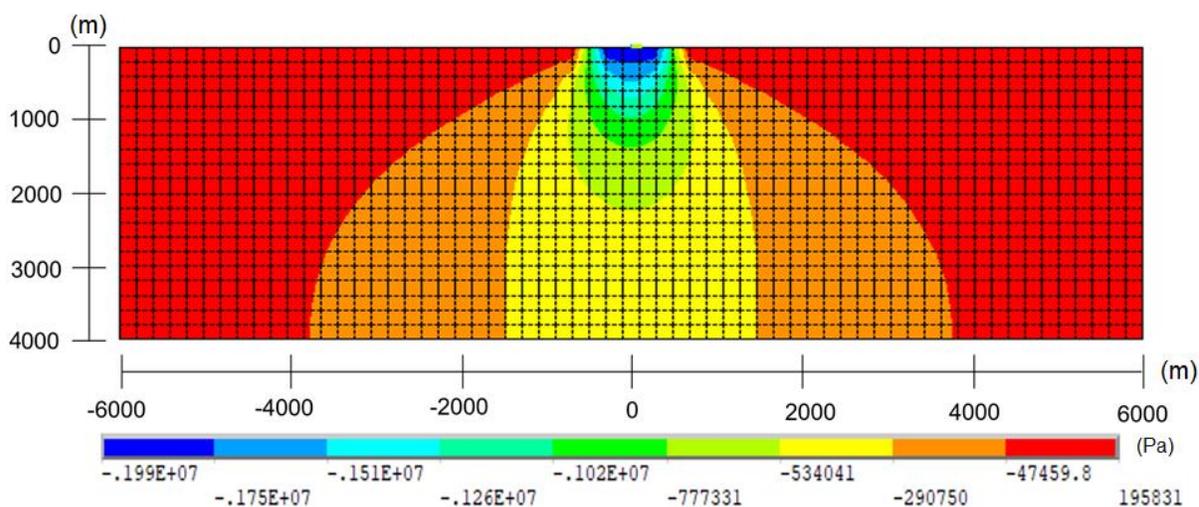
A análise dos resultados correspondeu inicialmente a verificação do estudo de convergência, uma vez que se trata de um estudo numérico; e ao se passar por etapas preliminares, e verificar os modelos simplificados, se adquire confiança necessária para análises mais complexas. Na sequência foram avaliados o estudo de caso considerando a região local de Irapé, onde analisou-se a correlação dos resultados numéricos com a quantificação da sismicidade durante o enchimento do reservatório.

4.1. Análise de convergência

A definição da malha é muito importante para análises através do Método dos Elementos Finitos, pois se a malha for constituída por elementos maiores que o necessário, acarretará erros grandes. Em situação inversa, apresenta desperdício de tempo e energia empregados na discretização do problema. Estudos numéricos para carregamentos estáticos e dinâmicos em problemas geológicos e geotécnicos devem ser validados com exemplos simplificados em função do maior controle na resposta comparativa com estudos analíticos (Alves do Nascimento Júnior, 2016; Genikomsou & Polak, 2015; Mikelić et al., 2014; Oliveira França Júnior, 2022)

Para a análise de convergência usou-se o modelo apresentado na Figura 5, adotando-se uma reta de controle $Y_0 - Y_{4000}$, na qual verificou-se a magnitude das tensões e o deslocamento ao longo do perfil em relação a dois tipos de malha: 1200 (média) e 4800 (fina) elementos.

O resultado mostra que para uma malha com 1200 elementos quadrilaterais, com um tamanho médio de 200×200 m (Figura 9), já se tem resultados satisfatórios quando comparado com o resultado com 4800 elementos de tamanho 100×100 m (Figura 10). Isso acontece pelo fato de utilizamos um elemento rico com 8 graus de liberdade (ANSYS® *Multiphysics v.14.5. Ansys Inc.*, n.d.), possibilitando uma convergência mais rápida (Mendes, 2018).



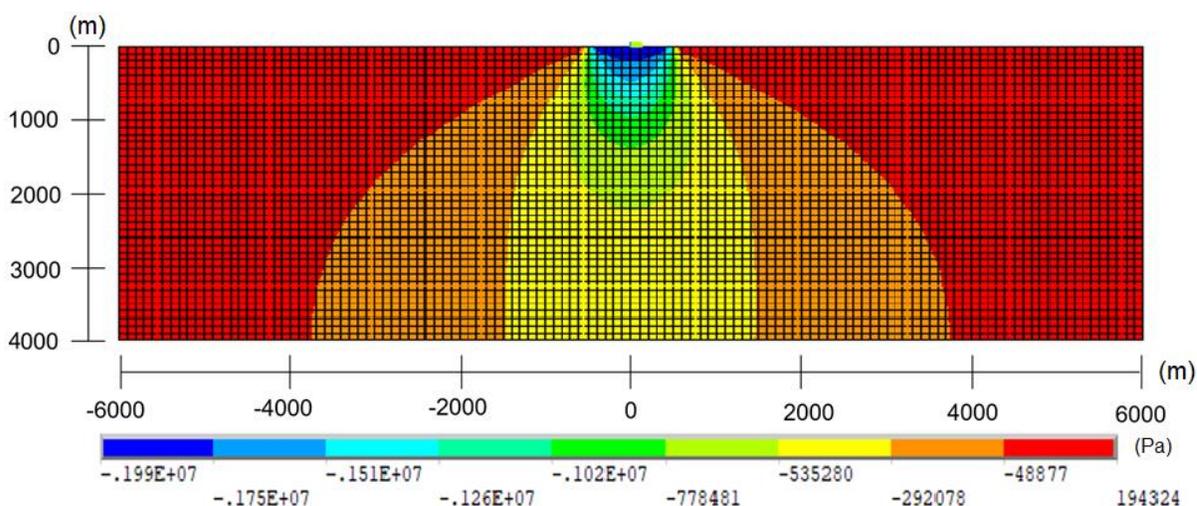


Figura 10 – Tensões verticais no perfil para uma malha mais refinada.
 Fonte: Autores (2022).

Ao se observar as distribuições de tensões provocados pela carga d’água para os dois casos comparados da Figura 11 pode-se constatar uma boa convergência, sendo que já no primeiro nível de refinamento os valores das tensões são satisfatórios. O nível de refinamento intermediário para o nível de refinamento avançado apresentaram diferenças pouco significativas, tendo o primeiro exemplo um tempo de processamento menor, sendo assim mais vantajoso para análise.

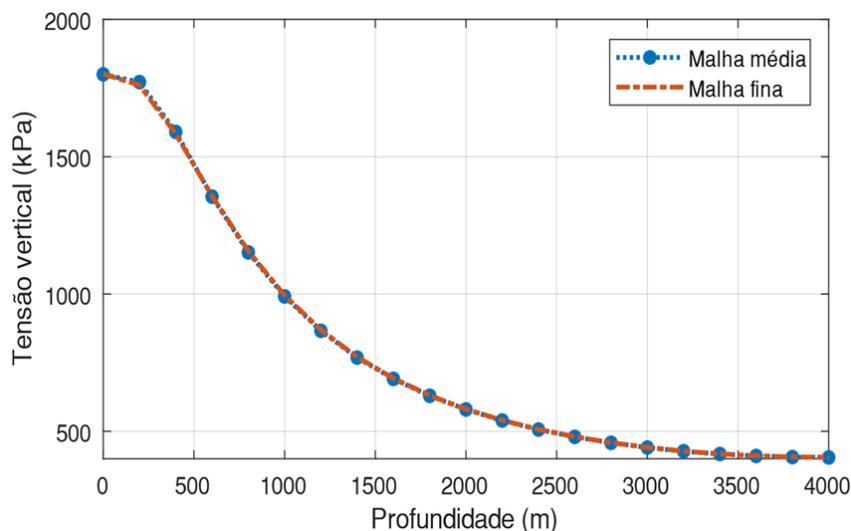


Figura 11 – Tensões verticais ao longo da reta de controle Y0 – Y4000 devido a carga d’água.
 Fonte: Autores (2022).

As tensões em função da carga d’água ao longo da reta de controle tem um perfil semi-parabólico, possuindo o máximo esforço na parte superficial da crosta e gradativamente diminuindo ao longo da profundidade. Em termos numéricos, teve um esforço máximo de 1800 KPa na cota zero e esforços acima de 500 KPa até 2500 m de profundidade. Isso já mostra como que ocorre os esforços ao longo da crosta que possibilitam modificações do estado natural do ambiente local com o acréscimo de carregamento d’água no reservatório.

De maneira similar ao estudo das tensões, observou-se características semelhantes para a análise dos deslocamentos ao longo da reta de controle. Percebeu-se que o acréscimo de tensões provocados pela inserção do

carregamento adicional produz um deslocamento no sentido do carregamento maior na parte superficial e reduzindo-se ao longo da profundidade, como apresentado na Figura 12.

Se esclarece que o nível de tensão mostrado corresponde verticalmente a carga adicional introduzida pela água no reservatório, e não está incluído a carga do solo nos pontos considerados.

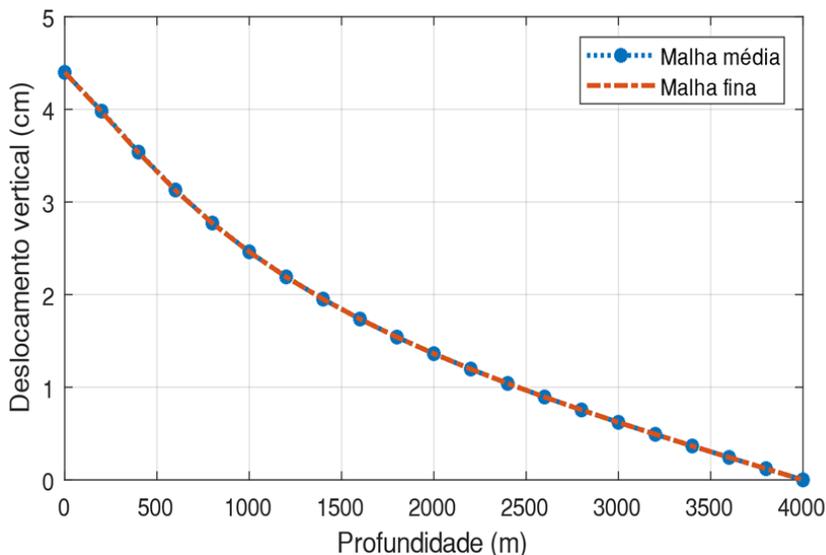


Figura 12 – Deslocamentos verticais ao longo da reta de controle Y0 – Y4000.

Fonte: Autores (2022).

A partir dos estudos preliminares obtido pela validação do modelo já se pode constatar que os sismos desencadeados pelo reservatório se encontram em locais com pequenas profundidades, para o qual observou-se que as maiores magnitudes tanto para deslocamentos quanto para tensões ocorreram para profundidades menores que 2000 m. Além disso, deve-se ressaltar que as tensões verticais são preponderantes para as tensões principais máximas em virtude das mesmas possuírem magnitudes bem maiores que as outras componentes horizontais e cisalhantes (Alves do Nascimento Júnior, 2016).

4.2. Estudo de caso: Perfil da UHE de Irapé

Após o estudo de validação e convergência da malha iniciou-se o estudo da influência do esforço adicional no perfil próximo da barragem (Figura 6), observando a potencialidade para o surgimento da sismicidade desencadeada por reservatório (SDR).

Para o estudo do perfil local de Irapé observaram-se resultados similares ao encontrado no estudo de convergência, apresentando uma diminuição gradativa ao longo do perfil das tensões e deslocamentos, assim como as maiores magnitudes próximas a superfície. Isso está diretamente interligado ao fenômeno da SDR, ainda que seja pouco compreendido, uma vez que essa problemática pode ser encarado como uma resposta da crosta rasa às mudanças no campo de tensão em que se encontra submetida. Os eventos de SDR podem apresentar variação de intensidade, frequências e distribuição dos tremores de acordo com o terreno no qual o reservatório se desenvolveu. Apesar disso, a ocorrência não pode ser prevista, embora esteja associada preferencialmente aos grandes reservatórios (Bell & Nur, 1978). Diante disso, é relevante estimar a capacidade da potencialidade desse fenômeno, bem como suas áreas mais susceptíveis antes da construção, no intuito de reforçar a estrutura já construída (Silveira, 2018)

A Figura 13 ilustra ainda que em função da carga d'água não ser mais constante como apresentado no item avaliado no estudo de convergência, agora esta carga é maior no centro e diminui nas bordas (há também uma diminuição da área de contribuição). Ademais, pode-se aferir que essa variação do estado de tensões é restrita a uma determinada região, podendo relacionar onde e quais são os sismos relacionados àqueles desencadeados pelo reservatório. A Figura 14 mostra os deslocamentos ao longo do perfil estudado e nota-se, também, que eles estão restritos a essa determinada região de influência, apresentando magnitude máxima de 3,11 cm abaixo do reservatório.

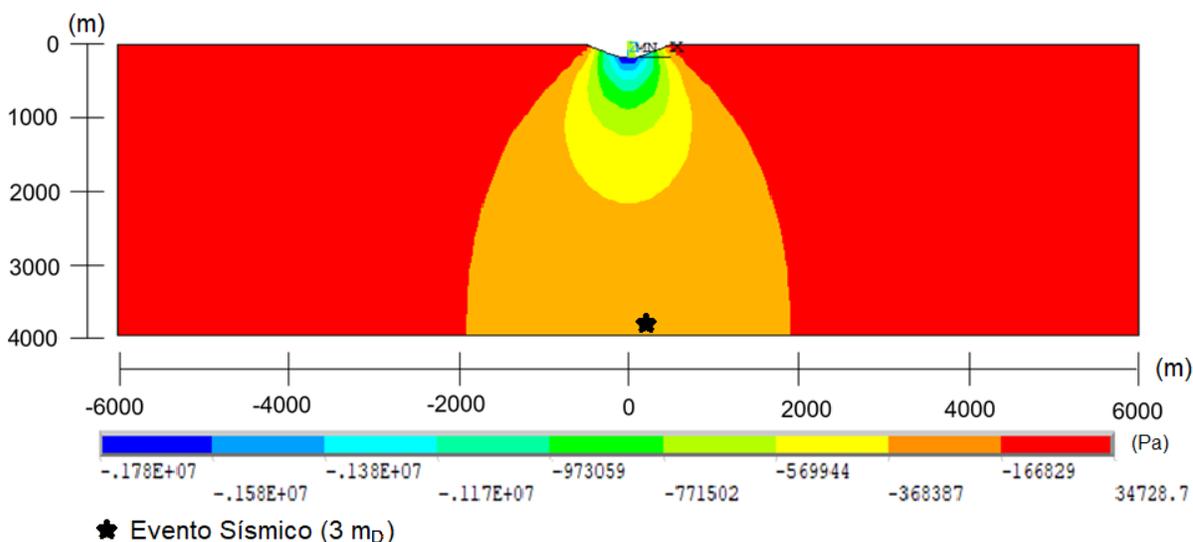


Figura 13 – Distribuição das tensões verticais ao longo do perfil homogêneo de Irapé.

Fonte: Autores (2022).

Deve-se ressaltar que os sismos induzidos apresentam, normalmente, magnitudes pequenas, mas, pelo fato de serem próximo da barragem não sofrem tanta atenuação em seu sinal até atingir a estrutura.

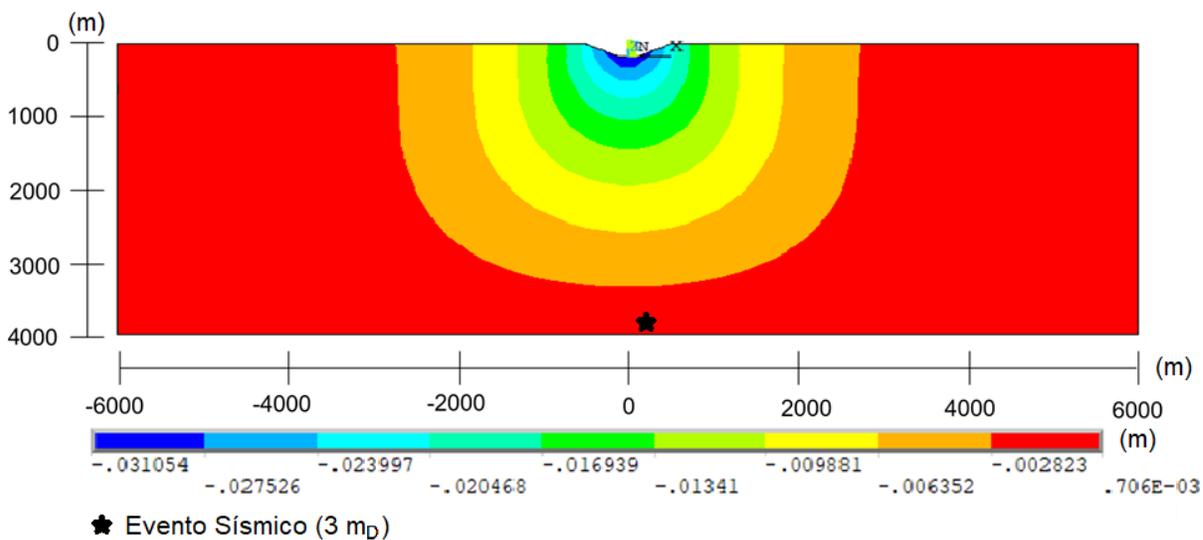


Figura 14 – Distribuição dos deslocamentos verticais ao longo do perfil homogêneo de Irapé.

Fonte: Autores (2022).

Para essa região de Irapé observa-se que a localização do sismo de maior intensidade foi próximo a barramento, assim como os demais epicentros dos sismos; mostrando efetivamente a correlação do aumento de carga d'água com os pequenos tremores locais.

Visto que o sismo de maior magnitude de 3,0 mD foi capturado pelas três estações sismográficas ativadas próximas ao corpo da barragem, tendo uma outra estação desativada. A Figura 15 apresenta os sinais obtidos para cada estação.

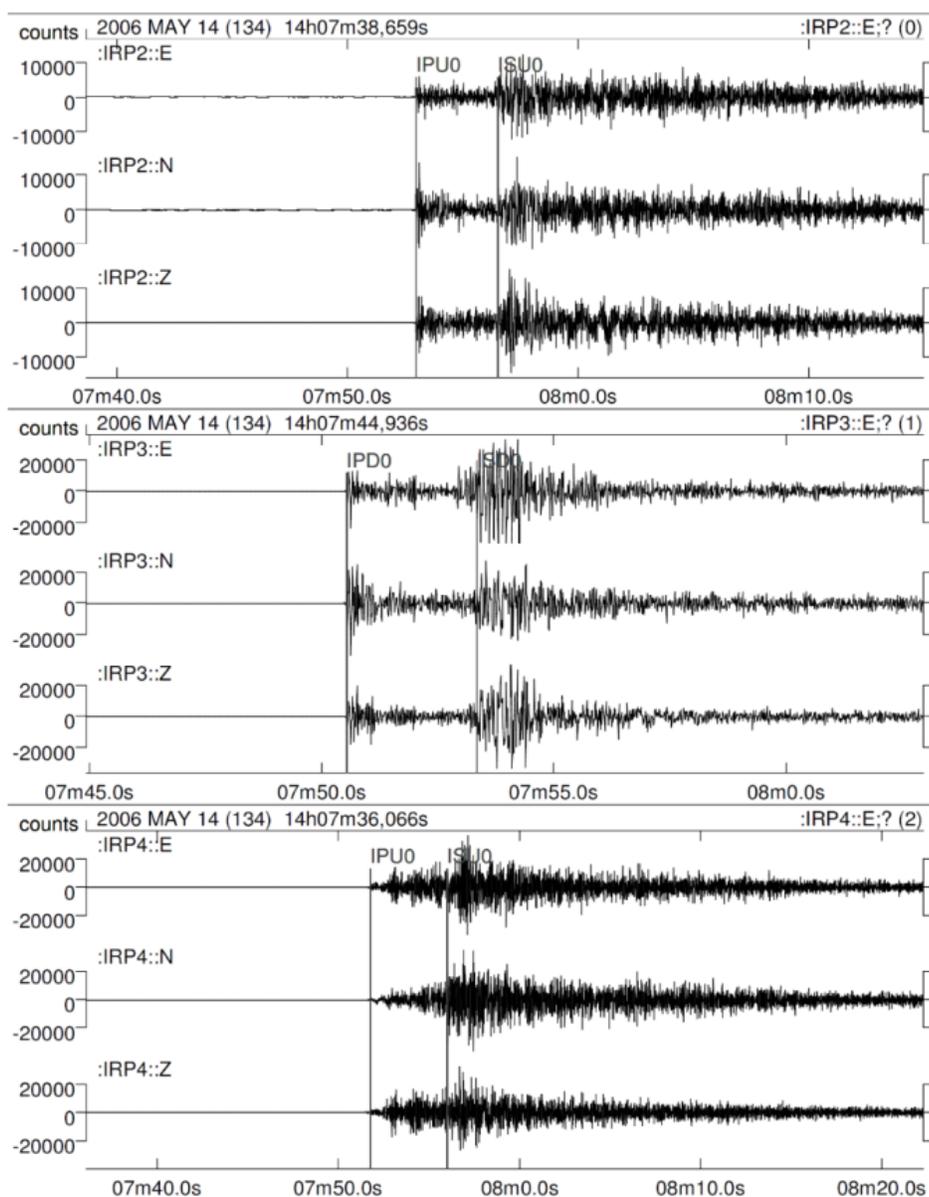


Figura 15 – Registro das formas de onda de um evento de SIR com a marcação da chegada das ondas P e S nas três componentes.

Fonte: Silva, 2014.

O registro identifica que, para diferentes pontos de captação do sinal, ocorre diferenciação entre as formas de onda, a estação IRP3 se encontra mais próxima do epicentro, seguida de IRP4 e IRP2, em razão da chegada da onda P ser primeira nessa estação. Esses dados mostram que existe uma atenuação na magnitude do sinal com o aumento da distância entre o epicentro e o ponto de captação, como constatado a partir dos dados apresentados na estação IRP2, que se encontra mais distante e com pouca diferenciação entre as amplitudes.

Sobre o evento sísmico de 3mD, identificado no perfil analisado (Figuras 13 e 14), observa-se que sua ocorrência se deu dentro da região de variação de estado de tensão, entre 268 kPa e 167 kPa (Figura 13). Porém, é possível verificar que a ocorrência do mesmo sismo se deu em região com deslocamento mínimo, entre 3 mm e 0 mm. Neste caso, apesar do

deslocamento, considera-se a possibilidade de ativação de zonas de cisalhamento, não mapeadas, abaixo da barragem e dentro da região cuja variação de estado de tensão foi identificada.

De acordo com a análise acima, a distribuição do campo de tensão e deslocamentos estão relacionados a magnitude do esforço, profundidade e o tipo rochoso (Cheng et al., 2012). Na parte superficial as resistências rochosas são baixas, o esforço devido à carga de água é possivelmente maior do que a resistência da rocha que pode levar ao microterremoto superficial. Isso provoca um aumento da difusão da água para o local mais profundo e conseqüentemente amolecimento da rocha. Já a massa da água do reservatório representa um esforço adicional, que causa um aumento nas tensões verticais no local, além da água exercer uma pressão hidrostática nos poros. A combinação desses efeitos podem desencadear sismos locais que atingirão o corpo da barragem.

Especialmente, o primeiro princípio de tensão na crosta local é de tração, que acarreta a expansão dos planos divisionais e os planos de falha. Quando o nível da água sobe, a água se difunde ao longo das superfícies de ruptura, que não pode neutralizar a tensão de cisalhamento total que inclui o estresse crustal adicionando carga de água, então as falhas começam a deslizar e conseqüentemente ocorrem terremotos. Dessa maneira, observa-se um sismo local da região de Irapé em uma profundidade baixa e oriunda a partir do enchimento do reservatório. Exemplos similares ao processo ocasionado em Irapé também foi diagnostico em outros locais (Cheng et al., 2012; Gupta, 2002; Tuan et al., 2017), mostrando toda a importância sobre o debate do tema.

5. Considerações finais

A partir dos resultados apresentados pode-se verificar que a variação do estado de tensões avaliada pelo enchimento do reservatório se encontra delimitada em uma determinada região, na qual se pode relacionar os sismos que são desencadeados pelo esforço adicional da carga d'água.

Além disso, os eventos ocorridos durante o enchimento da UHE de Irapé, dentro dos limites de variação do estado de tensão, podem ser caracterizados como eventos induzidos pelo reservatório.

Ainda que o nível de tensão obtido nas análises não apresentem valores consideravelmente altos, servem para assimilar, que nas zonas de influência desses acréscimos de tensões, correspondem as mesmas áreas onde foram observados os sismos induzidos maiores.

Por fim, os autores recomendam que para um estudo de avaliação estrutural em barragens se avaliem a influência do peso do reservatório na região de instalação da estrutura, considerando todos os parâmetros geomecânicos e geológicos da crosta que podem influenciar no surgimento de sismos locais. Pelo fato desses eventos sismológicos estarem próximos aos elementos estruturais e do corpo da barragem a atenuação do movimento sísmico é muito baixa, fazendo que aconteça movimentos na estrutura que podem acarretar possíveis problemas de danos que eventualmente afetem a segurança.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Universidade de Brasília, ao Observatório Sismológico da Universidade Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, PECC, pelo apoio recebido.

Referências

Alves do Nascimento Júnior, C. (2016). *UM ESTUDO COMPARATIVO ANALÍTICO-NUMÉRICO DE TENSÕES LOCAIS E GLOBAIS EM BARRAGENS GRAVIDADE DE CONCRETO*. Universidade de Brasília.

ANSYS® *Multiphysics v.14.5*. Ansys Inc. (n.d.).

Arkhipova, E. v., Zhigalin, A. D., Morozova, L. I., & Nikolaev, A. v. (2012). The van earthquake on October 23, 2011: Natural and technogenic causes. *Doklady Earth Sciences*, 446(2), 1176–1179. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12100029>

Balassanian, S. Y. (2005). Earthquakes induced by deep penetrating bombing? *Acta Seismologica Sinica*, 27(6), 691–695. <https://doi.org/10.1007/s11589-005-0102-0>

- Bell, M. L., & Nur, A. (1978). Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses and application to Lake Oroville. *Journal of Geophysical Research*, 83(B9), 4469. <https://doi.org/10.1029/JB083iB09p04469>
- Buttinelli, M., Improta, L., Bagh, S., & Chiarabba, C. (2016). Inversion of inherited thrusts by wastewater injection induced seismicity at the Val d'Agri oilfield (Italy). *Scientific Reports*, 6(1), 37165. <https://doi.org/10.1038/srep37165>
- Cheng, H., Zhang, H., Zhu, B., Sun, Y., Zheng, L., Yang, S., & Shi, Y. (2012). Finite element investigation of the poroelastic effect on the Xinfengjiang Reservoir-triggered earthquake. *Science China Earth Sciences*, 55(12), 1942–1952. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4470-8>
- Chimpliganond, C. N., França, G. S., Bandeira, A. E., & Bevilaqua, A. L. (2007). Reservoir-Triggered Seismicity at the Highest Brazilian Dam. *AGU - Meeting of Americas*.
- Duarte, C. A., & Kim, D.-J. (2008). Analysis and applications of a generalized finite element method with global–local enrichment functions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(6–8), 487–504. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.08.017>
- Evans, K. F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., & Moia, F. (2012). A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41, 30–54. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.002>
- Genikomsou, A. S., & Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering Structures*, 98, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.016>
- Gupta, H. K. (1985). The present status of reservoir induced seismicity investigations with special emphasis on Koyna earthquakes. *Tectonophysics*, 118(3–4), 257–279. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90125-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(85)90125-8)
- Gupta, H. K. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, 58(3–4), 279–310. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00063-6)
- Gupta, H. K. (2017). Koyna, India, an ideal site for near field earthquake observations. *Journal of the Geological Society of India*, 90(6), 645–652. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0771-z>
- Gupta, H. K. (2018). Review: Reservoir triggered seismicity (RTS) at Koyna, India, over the past 50 yrs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5), 2907–2918. <https://doi.org/10.1785/0120180019>
- Gupta, H. K., Rastogi, B. K., & Narain, H. (1972). Some Discriminatory Characteristics of Earthquakes Near. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(2), 493–507.
- Henriquet, M., Avouac, J.-P., & Bills, B. G. (2019). Crustal rheology of southern Tibet constrained from lake-induced viscoelastic deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.014>
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., & Wong, I. (2011). Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems. In *DoE* (Issue January). <https://doi.org/DOE/EE-0662>
- McClure, M. W., & Horne, R. N. (2014a). Correlations between formation properties and induced seismicity during high pressure injection into granitic rock. *Engineering Geology*, 175, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.015>
- McClure, M. W., & Horne, R. N. (2014b). An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 242–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.011>
- Mendes, N. B. (2018). *Um estudo de propagação de ondas e lançamento do sismo na análise dinâmica acoplada barragem em arco - reservatório - fundação*. Universidade de Brasília.

- Mikelić, A., Wang, B., & Wheeler, M. F. (2014). Numerical convergence study of iterative coupling for coupled flow and geomechanics. *Computational Geosciences*, 18(3–4), 325–341. <https://doi.org/10.1007/s10596-013-9393-8>
- Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M., & Christophersen, A. (2011). Induced seismicity and its implications for CO₂ storage risk. *Energy Procedia*, 4, 3699–3706. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.302>
- Oliveira França Júnior, D. (2022). *ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE PROBLEMAS DE INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO-ESTRUTURA COM APLICAÇÃO A BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO*. Universidade de Brasília.
- Ruiz-Barajas, S., Sharma, N., Convertito, V., Zollo, A., & Benito, B. (2017). Temporal evolution of a seismic sequence induced by a gas injection in the Eastern coast of Spain. *Scientific Reports*, 7(1), 2901. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02773-2>
- Silva, G. F. da. (2014). *Interpretação geológica e geofísica da área de influência da usina hidrelétrica de Irapé, MG* [Universidade de Brasília]. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/11693>
- Silva, G. F. da, Araújo Filho, J. O. de, Huelsen, M. G. von, Chimpliganond, C. N., & França, G. S. (2014). Influência de estruturas brasileiras na sismicidade desencadeada por reservatório na Usina Hidrelétrica de Irapé, Minas Gerais, Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3), 375–386. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030004>
- Silveira, I. V. da. (2018). *Estudo da influência da crosta local no comportamento sísmico do sistema barragem gravidade-reservatório-fundação*. Universidade de Brasília.
- Silveira, I. V. da, & Pedroso, L. J. (2018). Analysis of natural frequencies and modes of vibration involving interaction dam-reservoir-foundation for concrete gravity dams. *Third International Dam World Conference*, 11.
- Silveira, I. V. da, Pedroso, L. J., & Marotta, G. S. (2021). Study of the influence of the foundation and the reservoir on the dynamic response in a concrete gravity dam profile. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(4). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000400003>
- Simpson, D. W. (1986). Triggered Earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1), 21–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.14.050186.000321>
- Talwani, P. (1995). Speculation on the causes of continuing seismicity near Koyna reservoir, India. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 145(1), 167–174. <https://doi.org/10.1007/BF00879492>
- Tuan, T. A., Purnachandra Rao, N., Gahalaut, K., Trong, C. D., Van Dung, L., Chien, C., & Mallika, K. (2017). Evidence that earthquakes have been triggered by reservoir in the Song Tranh 2 region, Vietnam. *Journal of Seismology*, 21(5), 1131–1143. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9656-2>
- Valoroso, L., Improta, L., Chiaraluce, L., di Stefano, R., Ferranti, L., Govoni, A., & Chiarabba, C. (2009). Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*, 178(1), 488–502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04166.x>
- Zoback, M. D., & Gorelick, S. M. (2012). Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26), 10164–10168. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202473109>