

Modal and Structural Analysis of Section E, composed by Buttress blocks, including the Hollow Gravity block of Itaipu Dam

Silva Junior, Edivaldo J¹, Villalba Fiore, Paola M.C.², Juliani, Marco³, Coelho, Dimilson P⁴, Patias, Josiele⁵, Aracayo, Luis A S⁶

¹*Parque Tecnológico Itaipu – Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens
Av. Tancredo Neves, 6731 - Jardim Itaipu, Foz do Iguaçu - PR, 85867-900
edivaldo.junior@pti.org.br, edivaldo.jsj@gmail.com*

²*Central Hidrelétrica Itaipu Binacional
Av. Tancredo Neves, 6702 - Jardim Itaipu, Foz do Iguaçu - PR, 85867-900
paovilla@itaipu.gov.py*

³*IEME BRASIL Engenharia Consultiva
Rua M.M.D.C, 450 - 2º andar - Butantã, São Paulo - SP, 05510-000
mjuliani@iemebrazil.com.br*

⁴*Central Hidrelétrica Itaipu Binacional
Av. Tancredo Neves, 6702 - Jardim Itaipu, Foz do Iguaçu - PR, 85867-900
dimilson@itaipu.gov.br*

⁵*Central Hidrelétrica Itaipu Binacional
Av. Tancredo Neves, 6702 - Jardim Itaipu, Foz do Iguaçu - PR, 85867-900
jpatias@itaipu.gov.br*

⁶*Parque Tecnológico Itaipu – Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens
Av. Tancredo Neves, 6731 - Jardim Itaipu, Foz do Iguaçu - PR, 85867-900
luis.aracayo@pti.org.br*

Resumo. This work presents a numerical computational analysis methodology of dams using experimental dynamic tests and instrumental monitoring data to calibrate and validate the numerical models. A case study was carried out on part of the Itaipu dam, composed by buttress and hollow gravity blocks. The model allows to analyze the influence between blocks, the dynamic properties and the displacements due to the hydrostatic pressure of the reservoir and uplift. Dynamic field tests were performed using accelerometers on each block of the dam to determine the experimental natural frequency and the mode of vibration. These data were used to determine the boundary conditions and to perform the calibration of the numerical model through the dynamic properties. Reservoir level and piezometer data were used to determine loading conditions. Finally, the displacements of the model were compared with the data from the direct pendulum and the joints measure instrument. The results are satisfactory and show the complexity of a model composed of several independent blocks.

Keywords: MEF, Barragem, Análise modal, Contrafortes, Gravidade Aliviada, Itaipu.

1 Introdução

O monitoramento de barragens através de um sistema adequado de instrumentação é fundamental para se avaliar o comportamento dessas estruturas, durante as fases de construção, operação e desativação.

As leituras de vazões, temperaturas, deslocamentos, tensões, subpressão, entre outros fenômenos que se desenvolvem no corpo de uma barragem e no maciço de fundação, permitem realizar a comparação entre os valores reais e os valores previstos em projeto. Dessa forma, pode-se avaliar e estimar as variações que podem ocorrer, como a flutuação do nível do reservatório ou temperatura ambiente, dentro de uma faixa segura de operação.

Um dos maiores interesses dos Engenheiros de Segurança de Barragens está relacionado com os valores limites dos instrumentos de monitoramento, que podem ser estudados através de análises numéricas computacionais. O Método dos Elementos Finitos (MEF) associado com a alta capacidade de processamento computacional se tornou uma ferramenta fundamental para a resolução de problemas de engenharia. Em segurança de barragens, as análises estruturais e de fluxo permitem compreender os fenômenos físicos que ocorrem em seu interior através de campos de tensões, deformações e temperaturas. Esses resultados, baseados nas leis constitutivas que regem o comportamento desses sistemas, permitem estimar e reavaliar os valores limites dos instrumentos de monitoramento.

A utilização de resultados de simulações numéricas para diagnosticar o comportamento de uma estrutura só pode ser feita através da validação desses valores. A validação significa que o modelo representa a realidade dentro de uma faixa, considerada aceitável ou satisfatória. Dessa forma, em análises de barragens, a utilização de dados instrumentais para calibrar os modelos numéricos é importante para aproximar as simulações da realidade, tornando as análises mais assertivas para tomadas de decisões de engenharia.

2 Instrumentação

Neste trabalho foram utilizados os seguintes instrumentos de monitoramento de barragens para se determinar condições de contorno, carregamento e posteriormente, a validação do modelo numérico:

- Acelerômetros;
- Pêndulo direto;
- Base de alongâmetro;
- Piezômetro.

2.1 Ensaios Dinâmicos com Acelerômetros

Os ensaios dinâmicos consistem em uma técnica não-destrutiva que permite avaliar a integridade de uma estrutura, mobilizando suas propriedades físicas e mecânicas. A metodologia se mostra conveniente pelo caráter não-destrutivo, podendo ser repetida ao longo do tempo, utilizando seu histórico para comparações pertinentes [7].

A partir de solicitações dinâmicas determinadas ou aleatórias, é possível obter dados de acelerações através da instalação de acelerômetros em posições estratégicas da estrutura. Através do tratamento desses dados é possível estimar as frequências naturais, modos de vibração e carregamentos dinâmicas da estrutura.

2.2 Pêndulo Direto

O pêndulo direto (PD) é instalado entre a crista e a base da barragem (Figura 1) e tem como finalidade medir os deslocamentos horizontais relativos entre diferentes pontos da mesma estrutura, localizados em diferentes elevações, baseado no princípio do fio de prumo. Esse instrumento permite detectar movimentos pendulares devido à deformação da estrutura e rotação da fundação, porém, não são capazes de detectar movimentos de translação. Há três tipos de deslocamentos da crista da barragem em relação à superfície da fundação, que podem ser medidos pelo pêndulo direto [1]:



Figure 2. Base inferior do pêndulo direto

2.3 Base de Alongâmetro (Medidor de Junta)

Para evitar o surgimento de grandes tensões devido as elevadas variações de temperatura durante a construção e operação, as barragens são divididas, por meio de juntas de contração e dilatação. As juntas também estão presentes entre os blocos, que são independentes entre si, os quais possuem um sistema de vedação para promover a estanqueidade e consequentemente, evitar a percolação de água do reservatório [1].

O monitoramento da superfície das juntas pode ser realizado pela base de alongâmetro, apresentada na Figura 3.



Figure 3. Foto de bases de alongâmetro instaladas no piso e na parede

Esse instrumento é capaz de medir deslocamentos relativos entre blocos nas três direções ortogonais:

- Recalque: Vertical;
- Deslizamento: Sentido do fluxo;
- Abertura: Sentido normal ao fluxo, conforme esquema apresentado na Figura 4.

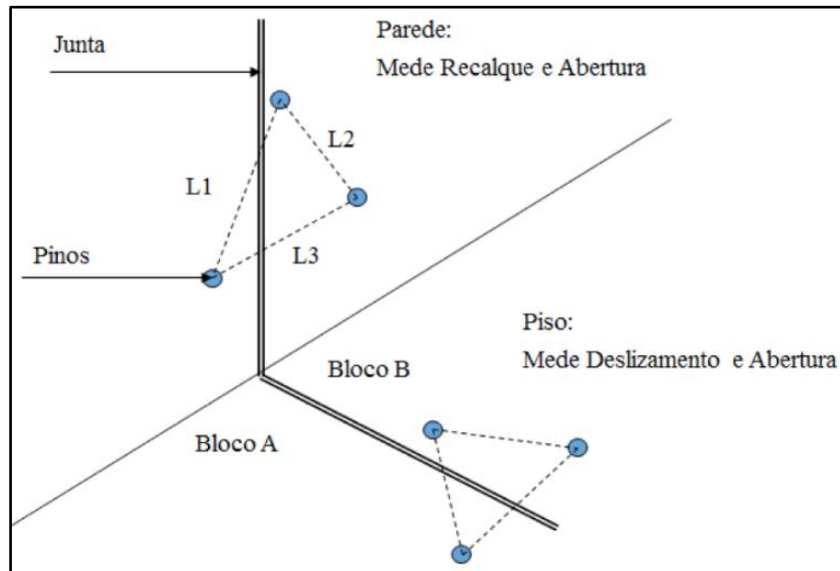


Figure 4. Ilustração do posicionamento dos pinos da base de alongâmetro no piso e na parede

Utilizando uma haste de medição chamada alongâmetro com precisão de 0,001 mm, são realizadas as medições de distanciamento entre os pinos. Através da relação trigonométrica entre esses valores é possível quantificar os deslocamentos ortogonais relativos entre os blocos.

2.4 Piezômetro

Os piezômetros são uns dos instrumentos mais importantes para a auscultação de barragens. Tanto para fundações de todo o tipo de barragem, como nos maciços de terra e enrocamento. Os piezômetros são utilizados para medir a poropressão e subpressão num ponto do aterro ou feição da fundação, com a finalidade de monitorar as subpressões previstas em cálculos de projeto [1].

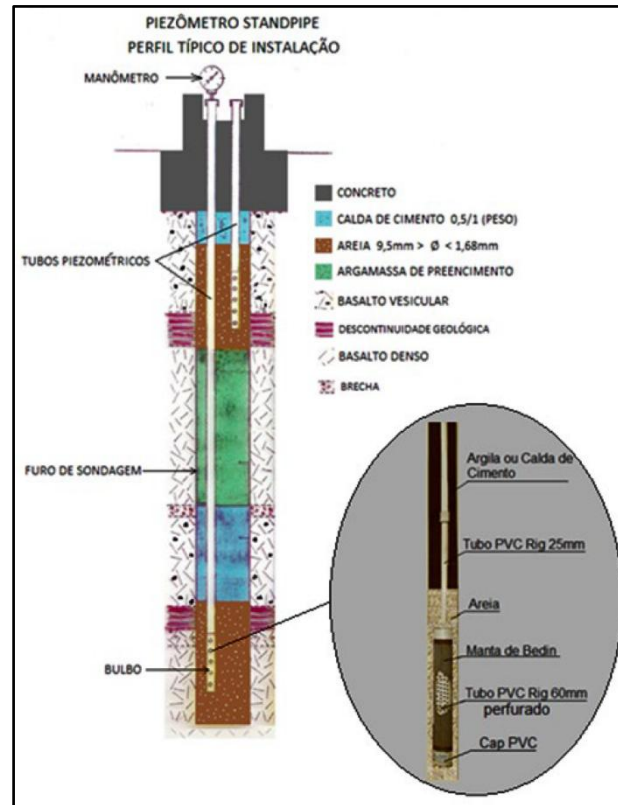


Figure 5. Ilustração do piezômetro tipo standpipe

2.5 Método dos Elementos Finitos

O MEF (Método dos Elementos Finitos) é um método de solução aproximada de equações diferenciais ordinárias ou parciais, muito utilizado na engenharia devido a sua generalidade e a facilidade de se aplicar em domínios geometricamente complicados. Esse método possibilita a simulação de situações reais em um domínio discreto, cujo limite infinitesimal tende ao contínuo [2].

O MEF consiste em dividir o problema real em partes menores de dimensões finitas, de forma que, a soma desses subdomínios gera o domínio original, conforme a Figura 6. Em cada subdomínio são utilizadas funções algébricas que calculam aproximações locais do fenômeno físico. Quanto maior for o número de subdivisões, mais próximo o resultado estará do valor exato. Por tornar o meio contínuo em várias partes discretas finitas, os subdomínios são chamados de elementos finitos. A Figura 6 (c) mostra um exemplos de elementos finitos [2].

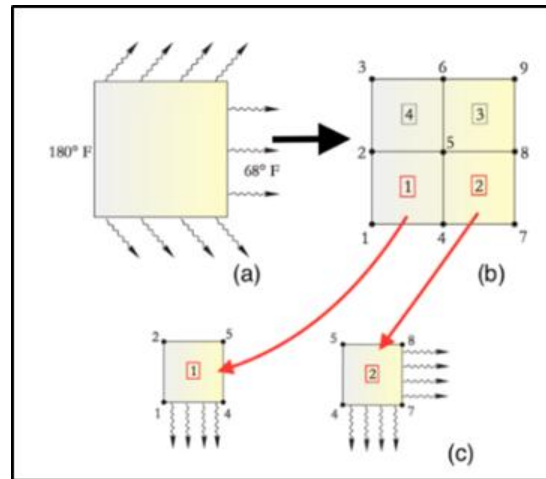


Figure 6. Discretização do domínio

Embora seja muito versátil, a utilização de métodos numéricos na simulação de problemas reais exige um processo de validação para se estimar o quão representativo são os resultados obtidos. Essa validação pode ser feita através do monitoramento de pontos estratégicos da estrutura. Esses mesmos pontos são monitorados no modelo numérico e os resultados são comparados com os dados reais, permitindo quantificar a precisão do modelo.

3 Análises Dinâmicas Teóricas e Experimentais

3.1 Análise Teórica

Quando um sistema é submetido a forças externas fica sujeito a vibrações forçadas. Em um sistema com n graus de liberdade, as equações de movimento que regem o comportamento do mesmo são estruturadas em um conjunto de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem acopladas. A solução desse sistema se torna cada vez mais difícil de acordo com o aumento do número de graus de liberdade e quando as forças de excitação não são determinísticas. Nesse caso, um dos métodos conhecidos para se resolver esse tipo de problema é o método da análise modal baseado no teorema de expansão, onde os deslocamentos das massas são expressos como uma combinação linear dos modos normais do sistema. Nesse caso, as equações de movimento são desacopladas através de uma transformação linear, gerando um sistema de equações diferenciais de segunda ordem independentes e a solução é equivalente à solução de n sistemas de um grau de liberdade. A equação de movimento de um sistema sob a ação de forças externas, desconsiderando o amortecimento, é apresentada na Eq.(1).

$$[m] \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + [k] \vec{x} = \vec{F} \quad (1)$$

A solução da equação utilizando o teorema da expansão requer inicialmente a solução do problema de autovalor e autovetor da Eq.(2).

$$\omega^2 [m] \vec{x} = [k] \vec{x} \quad (2)$$

A solução da Eq.(2) leva aos valores das frequências naturais $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ e e dos modos de vibrar correspondentes $\vec{x}^1, \vec{x}^2, \dots, \vec{x}^n$. De acordo com o teorema da expansão o vetor solução pode ser expresso por uma combinação linear dos modos normais, conforme a Eq.(3).

$$\vec{x}(t) = q_1(t) \vec{x}^1 + q_2(t) \vec{x}^2 + \dots + q_n(t) \vec{x}^n \quad (3)$$

3.2 Análise Experimental

A análise modal experimental tem-se consolidado como uma ferramenta complementar à análise modal teórica, através da comparação dos resultados. Esse estudo auxilia na determinação das propriedades dos materiais, condições de carregamento e, principalmente nas condições de contorno, devido à dificuldade de estimar tais valores em modelos numéricos de forma confiável.

As características dinâmicas da estrutura são obtidas a partir da função de transferência, que define a relação entre os dados de entrada e saída do sistema. Essa relação pode ser obtida a partir da medição da excitação e das respostas através de um conjunto de pontos de monitoramento da estrutura utilizando acelerômetros. A Eq.(4) apresenta a relação de entrada e saída do sistema no domínio de Laplace.

$$(s^2[M] + s[C] + [K])\{X(s)\} = [Z(s)]\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (4)$$

Na qual $[Z(s)]$ é a matriz de rigidez dinâmica da estrutura.

A resposta do sistema pode ser relacionada com a força excitadora através da matriz $[H(s)]$, denominada matriz de transferência, conforme a Eq.(5)

$$\{X(s)\} = [H(s)]\{F(s)\} \quad (5)$$

Relacionando a Eq.(4) e a Eq.(5), pode-se estabelecer uma relação entre a matriz de transferência e a matriz de rigidez dinâmica, conforme a Eq.(6)

$$[H(s)] = [Z(s)]^{-1} \quad (6)$$

Em termos da inversa da matriz de rigidez dinâmica, tem-se:

$$[H(s)] = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (7)$$

Na Eq.(8) o denominador representa a equação característica do modelo e as raízes do denominador fornecem as frequências naturais amortecidas e as respectivas razões de amortecimento do modelo, conforme a Eq.(8)

$$[H(s)] = \sum \frac{Q_r \psi_r \psi_r^*}{s - \lambda_r} + \frac{Q_r \psi_r \psi_r^*}{s - \lambda_r^*} \quad (8)$$

Na qual * faz referência ao conjugado complexo;

λ_r é a r-ésima raiz da equação característica do sistema;

Q_r é ar-ésimo fator de escala ou resíduo;

$\{\psi\}$ são os modos de vibrar.

Devido à magnitude das barragens de contrafortes e de gravidade aliviada, os ensaios dinâmicos nessas estruturas apresentam vários desafios, sendo um deles a dificuldade de se aplicar uma força conhecida para se obter as frequências naturais através da análise das ressonâncias que surgem nos dados de monitoramento dos acelerômetros de acordo com a frequência da força aplicada. Dessa forma, são utilizados métodos para obtenção de frequências a partir da vibração ambiente da estrutura, que deve ser a mais aleatória quanto for possível.

4 Estudo de Caso: Trecho E incluindo o Bloco F-1/2 da CHI

A Central Hidrelétrica de Itaipu, é uma usina hidrelétrica binacional localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai. A barragem foi construída pelos dois países entre 1975 e 1982. Possui quase 8 km de extensão e é formada por barragens de vários tipos, sendo: de terra, enrocamento, contraforte, gravidade e gravidade aliviada, conforme apresentado na Figura 7 [4].

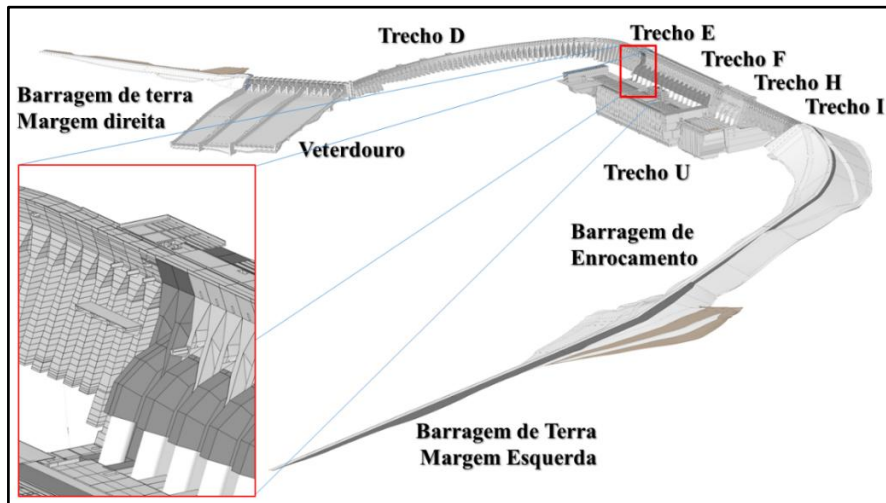


Figure 7. Ilustração 3D da CHI e ampliação da área de interesse (Trecho E e o bloco F-1/2)

A barragem é dividida em: estrutura principal, estrutura de desvio, barragem de terra da margem direita, barragem de enrocamento e barragem de terra da margem esquerda. A barragem de contraforte de ligação direita é denominada Trecho E, localizado na ombreira direita, entre a Barragem Principal (Trecho F) e a Barragem Lateral Direita (Trecho D). É constituída por 6 blocos de contrafortes (do E-01 ao E-06), apoiados em maciço basáltico.

Para monitorar o comportamento estrutural da barragem completa, esta possui mais de 2.792 instrumentos de monitoramento. O bloco E-06 é o mais instrumentado e por isso, considerado um bloco chave de monitoramento. Possui quase todos os instrumentos, entre eles: o pêndulo direto, termômetros, piezômetros, tensômetros, entre outros. O pêndulo tem como finalidade permitir o monitoramento do deslocamento absoluto do bloco no sentido do fluxo e normal a ele. Na Figura 8 é apresentada a vista isométrica do modelo tridimensional do Trecho E incluindo o bloco F-1/2 da CHI.

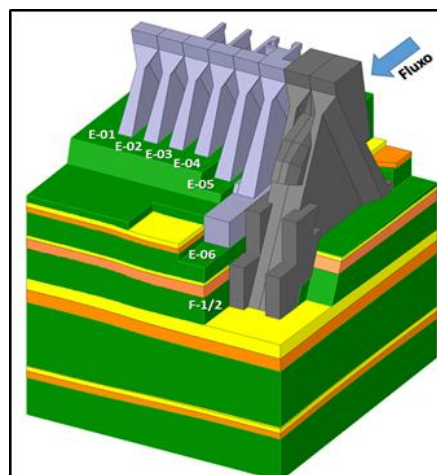


Figure 8. Modelo Geométrico do Trecho E incluindo o bloco F-1/2

4.1 Modelo Matemático

As propriedades do concreto e do maciço da fundação foram adotadas segundo os relatórios de ensaios obtidos do Sistema de Arquivo Técnico da Itaipu.

Malha

As camadas rochosas da fundação, com exceção da camada 1, foram discretizadas utilizando elementos hexaédricos. Os blocos de concreto (E-01, E-02, E-03, E-04, E-05, E-06 e F-1/2), bem como a primeira camada rochosa de fundação foram discretizados com elementos tetraédricos, para melhor acomodação dos elementos nessas regiões. Ao todo, a malha possui 630.920 nós e 229.412 elementos, conforme a Figura 9.

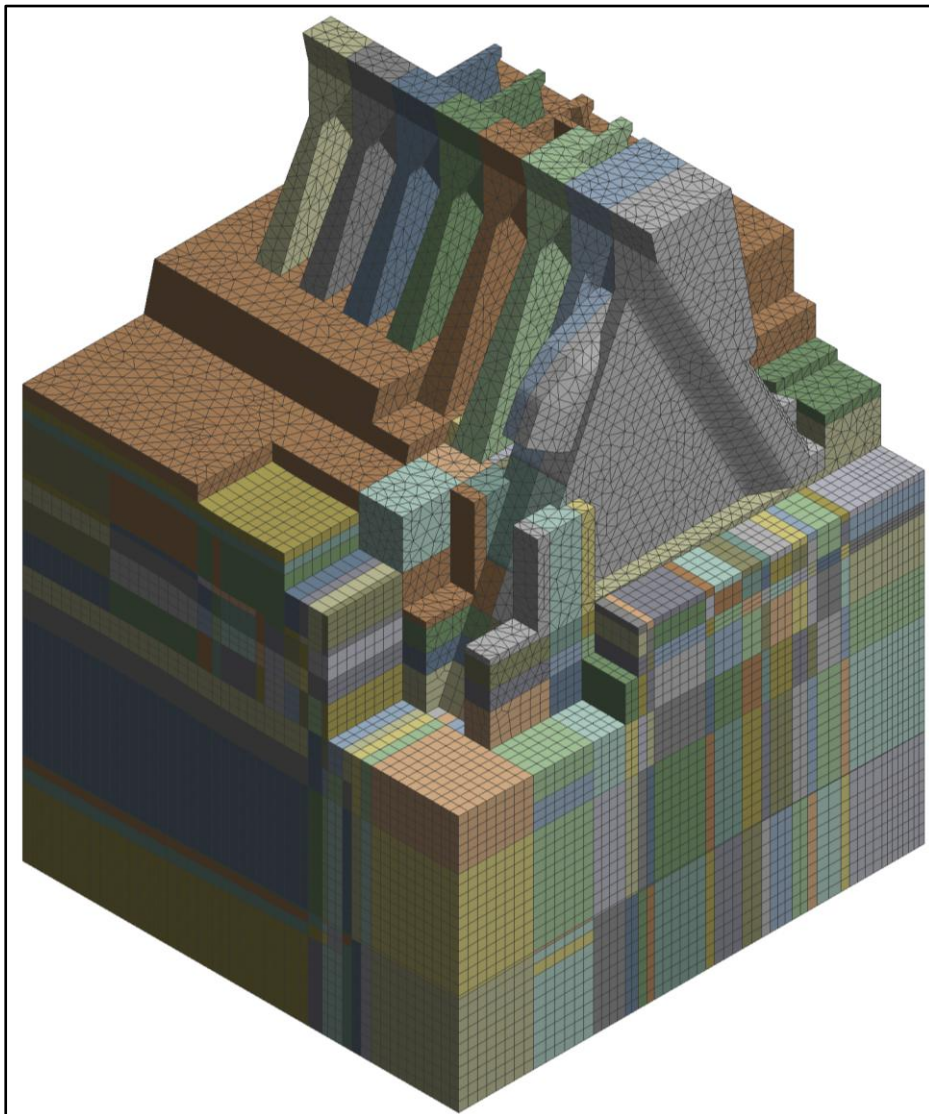


Figure 9. Modelo Geométrico do Trecho E incluindo o bloco F-1/2

Condições de contorno

Foram utilizadas as condições de contorno que apresentaram melhores resultados na análise modal, sendo estas:

- Base inferior do modelo engastada;
- Restrições de movimento perpendicular ao plano nas paredes da fundação;
- Condição de apoio sem atrito nas paredes dos blocos das extremidades (E-01 e F-1/2).

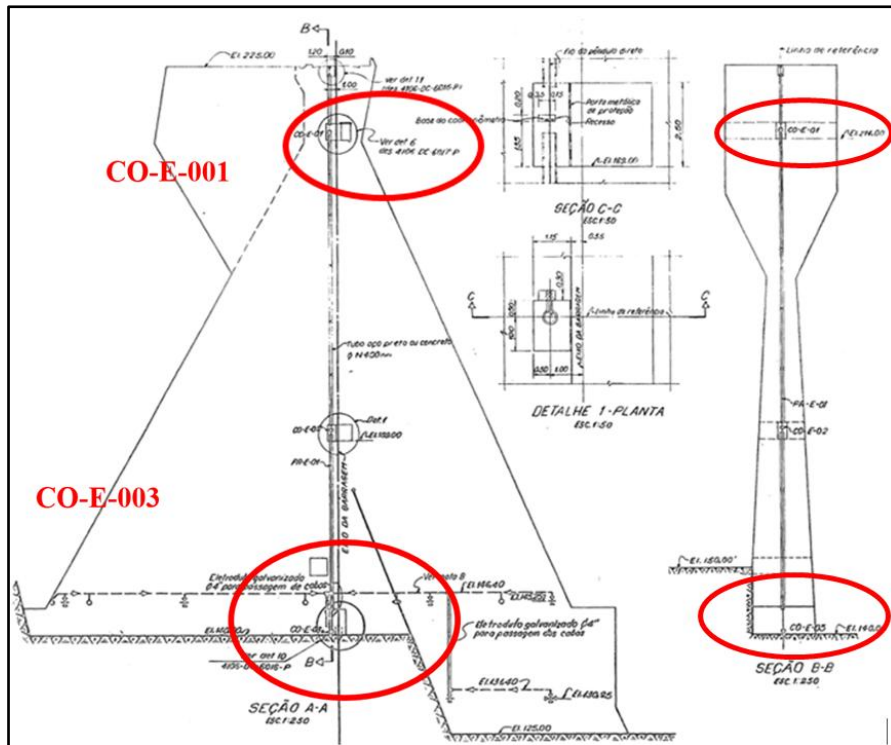


Figure 10. Localização dos pontos de leitura do pêndulo do bloco E-06 (PD-E-006).

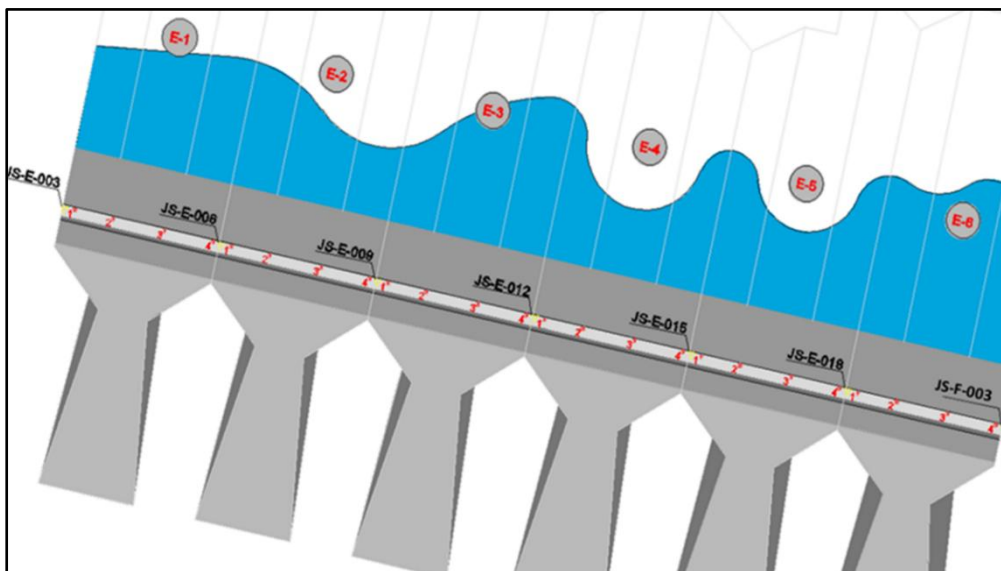


Figura 11. Localização dos medidores de juntas entre os blocos do Trecho E e do Bloco F- 1/2

As bases de alongâmetro, instaladas no piso da galeria da El. 214.00, medem os deslocamentos relativos entre os blocos em relação ao deslizamento e abertura. Na Figura 12 é ilustrado o deslocamento no sentido montante/jusante.

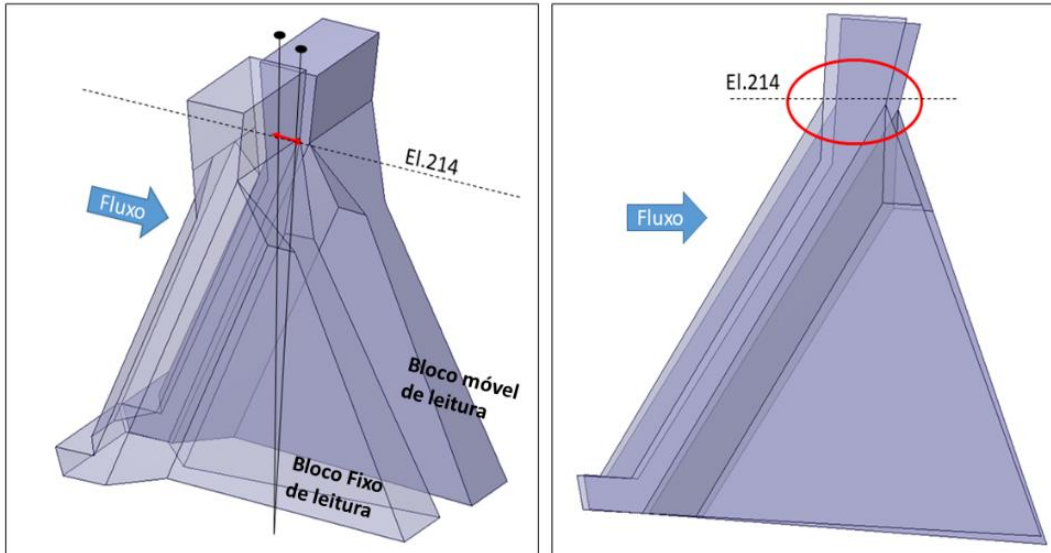


Figura 12. Representação gráfica do deslocamento relativo entre dois blocos medido pela Base de Alongâmetro na El.214

A metodologia para obtenção dos deslocamentos individuais de cada bloco no sentido montante-jusante consiste, inicialmente, na relação geométrica entre a elevação de medição do cordinômetro CO-E-001 (El.215,39) e a elevação dos medidores de juntas entre os blocos E-05/E-06 e E-06/F-1/2, conforme é apresentada na Figura 13.

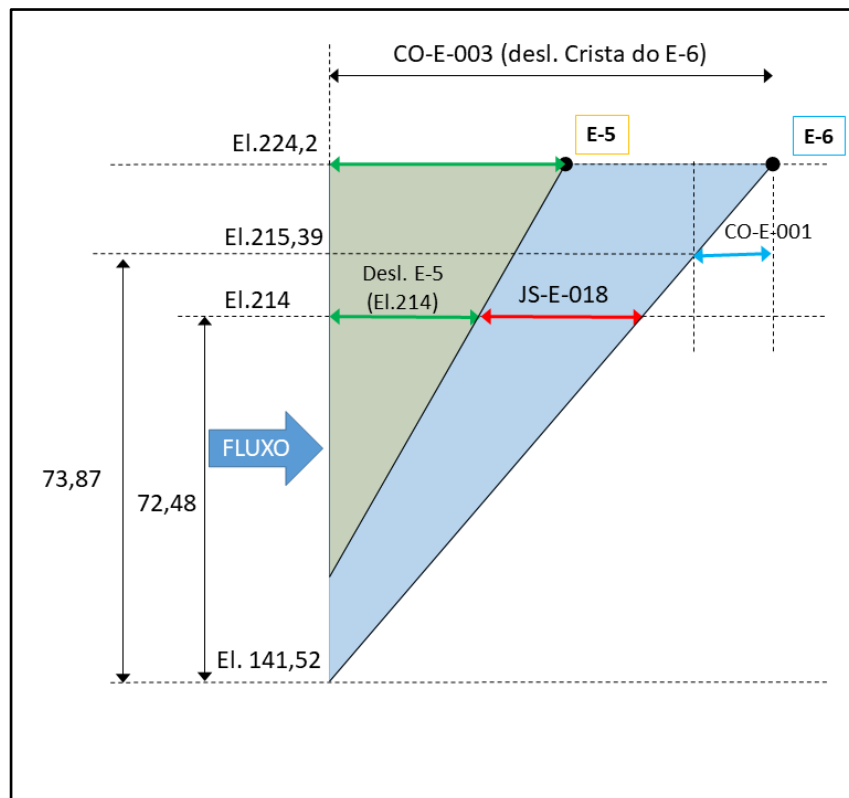


Figura 13. Relação geométrica para obtenção do deslocamento no sentido Montante/Jusante do bloco E-06 na El. 214 a partir da leitura do cordinômetro

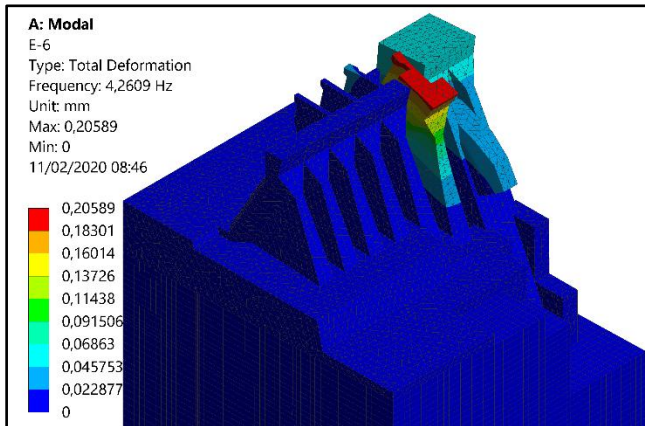


Figura 15. Frequência Natural do Bloco E-06:4,26 Hz

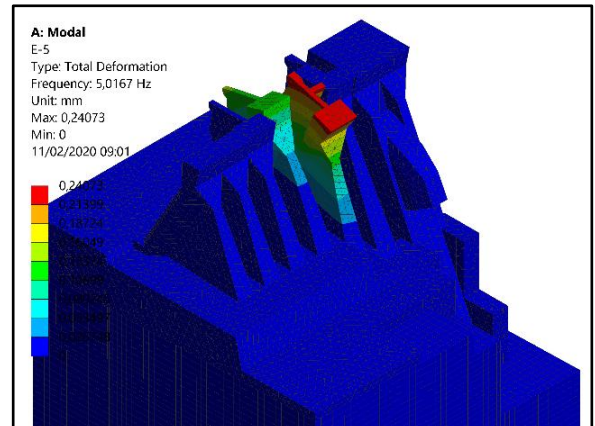


Figura 16. Frequência Natural dos Bloco E-05: 5,0 Hz

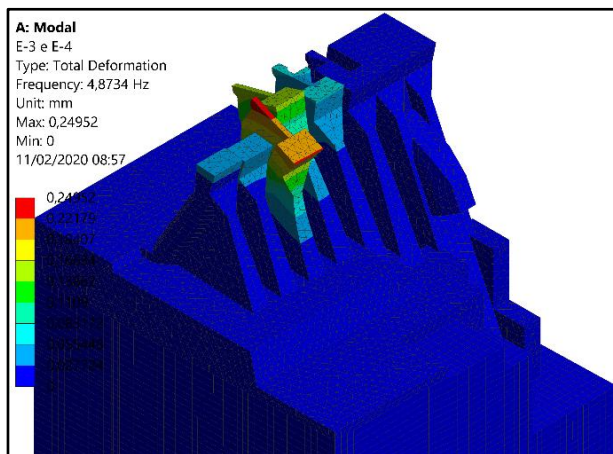


Figura 17. Frequência Natural dos Bloco E-03 e 4: 4,8 Hz

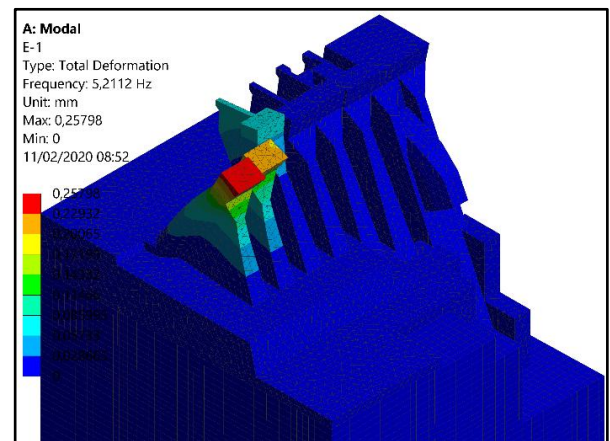


Figura 18. Frequência Natural dos Bloco E-01 e 02: 5,21 Hz

Na tabela 1 é apresentada a comparação entre as frequências naturais numéricas e as experimentais.

Tabela 1. Frequências Naturais numéricas e experimentais (Hz)

Bloco	Numérico (Hz)	Experimental (Hz)	Diferença (%)
E-01	5,21	5,40	3,52
E-02	5,21	5,33	2,25
E-03	4,8	5,31	9,60
E-04	4,8	5,33	9,94
E-05	5,0	5,32	6,02
E-06	4,24	4,40	3,64
F-1/2	3,93	4,24	7,31

5.2 Análise Estrutural

Na análise estrutural considerou-se o nível do reservatório na elevação 219,75, nível normal de operação durante o período de enchimento do reservatório. O maior deslocamento apresentado foi do bloco E-06, de aproximadamente 4,5 mm, na crista (Figura 19). Na Tabela 2 são apresentados os deslocamentos horizontais dos blocos do modelo numérico e dos instrumentos de monitoramento na EI.214. O valor positivo indica que o deslocamento ocorre sentido jusante.

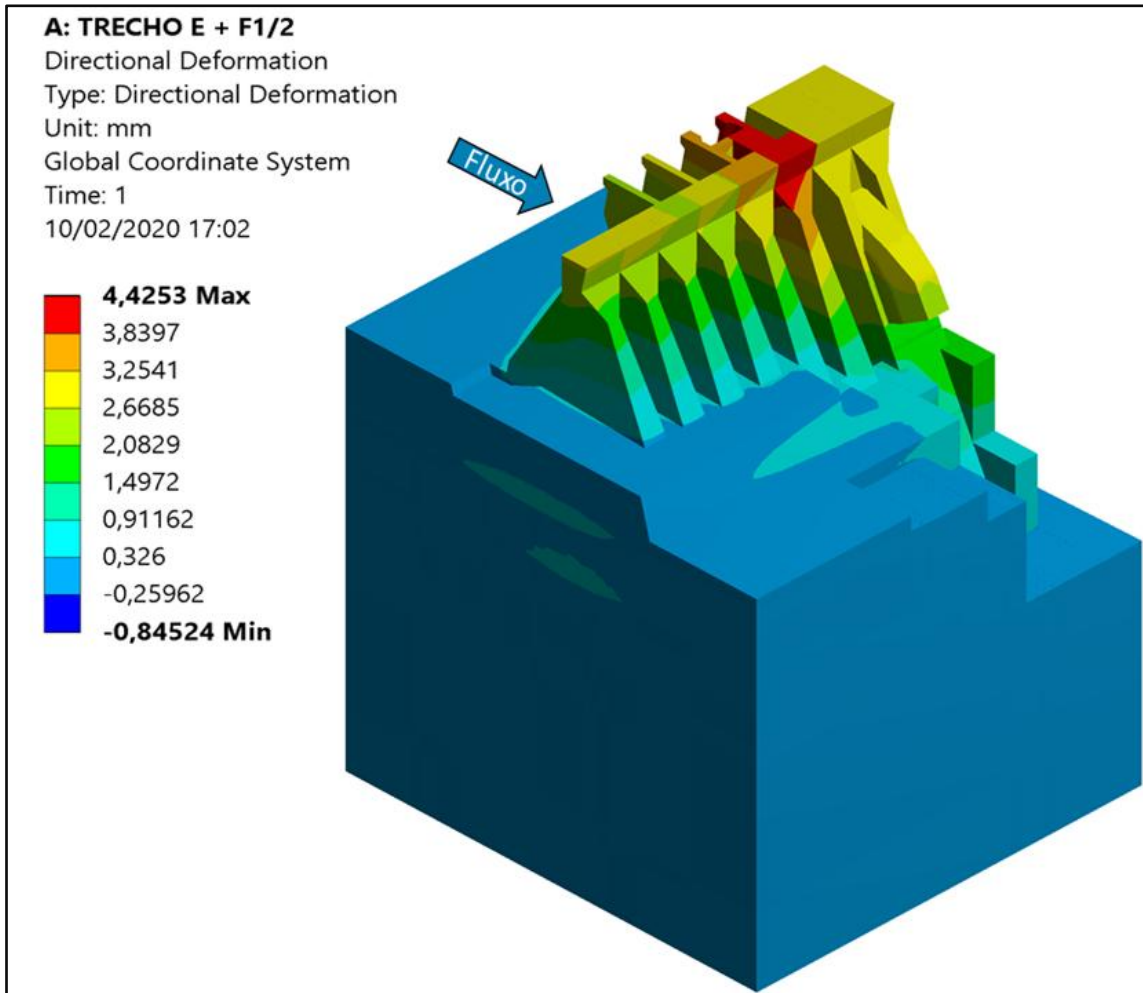


Figura19. Campo de deslocamento a jusante

Tabela 2.Deslocamento real e numérico de cada bloco na El.214

Blocos	Desl. Médio MJ El.214 Numérico (mm)	Desl. Médio MJ El.214 Instrumentos (mm)	Diferença (%)
E-01	2,48	2,61	4,98
E-02	2,72	2,80	2,86
E-03	2,57	3,10	17,10
E-04	2,78	3,44	19,19
E-05	3,35	3,42	2,05
E-06	4,15	3,56	16,57
F-1/2	3,28	3,08	6,49

Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os campos de tensões principais mínimas e máximas, respectivamente.

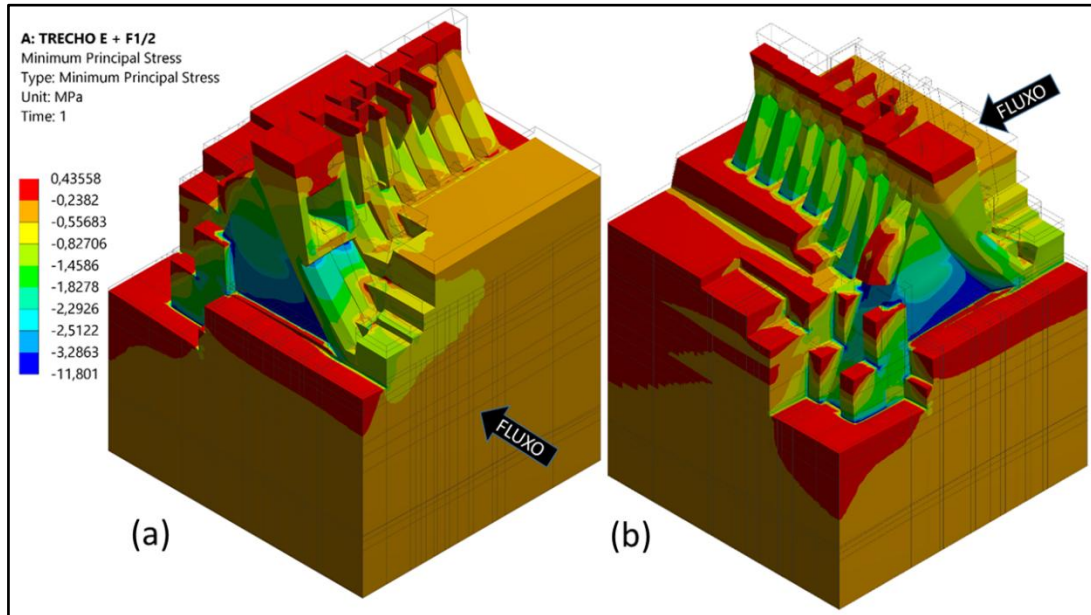


Figura 20. Campo de tensões principais mínimas do modelo

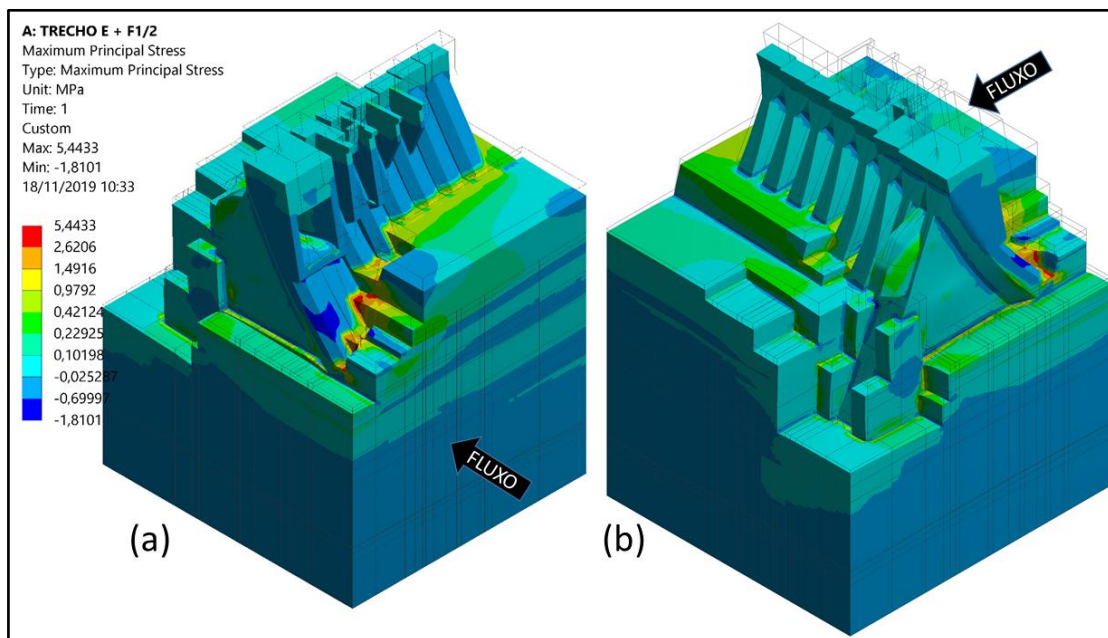


Figura 21. Campo de tensões principais máximas do modelo

Os campos de tensões, resultado da pressão hidrostática do reservatório e da subpressão no contato concreto-rocha de cada bloco, apresentam tensões máximas de compressão de 11 Mpa. Em relação às tensões de tração, regiões de contato entre os blocos e a fundação no pé de montante apresentaram valores de até 5,4 Mpa. Embora esse valor seja superior à resistência de tração do concreto, trata-se de uma região de junta. Numericamente os nós da malha nessa região estão conectados e por isso, o modelo apresenta altos valores de tensão de tração. Dessa forma, para uma melhor representação da realidade, deve-se considerar propriedades de aderência e coesão entre os materiais nessa região.

6 Conclusão

Comparando as frequências naturais do modelo numérico e as experimentais, observa-se que o resultado que mais se afasta do valor experimental apresenta uma diferença abaixo do 10%, e o que mais se aproxima 2,25%. Considerando a complexidade do modelo, os resultados são considerados satisfatórios. A análise estrutural foi realizada considerando os carregamentos obtidos através dos instrumentos de monitoramento, como o nível do reservatório e a subpressão, através do medidor de nível e dos piezômetros, respectivamente. Os resultados de deslocamento foram comparados com os dados do pêndulo e das bases de alongômetros dos blocos. O bloco cujo deslocamento obtido numericamente apresenta maior diferença quando comparado aos dados dos instrumentos, está abaixo de 20%, e o bloco que mais se aproxima, apresenta uma diferença de 2,05%. Durante o período de enchimento do reservatório, além dos deslocamentos elásticos devido a pressão hidrostática, ocorreram acomodações da fundação devido o carregamento. Por se tratar de um modelo numérico elástico linear, esses fenômenos não foram simulados, o que pode justificar essa diferença entre os deslocamentos numéricos e os registrados nos instrumentos, em alguns blocos. Para melhorar os resultados, nos próximos trabalhos serão considerados os possíveis comportamentos não lineares, como o de acomodação da estrutura na fundação devido ao acréscimo da pressão hidrostática.

Agradecimentos. Agradecemos à Centra Hidrelétrica Itaipu e ao Parque Tecnológico Itaipu, pelos recursos tecnológicos, documentos técnicos e dados de monitoramento disponibilizados para a elaboração deste trabalho.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que eles são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material que foi incluído aqui como parte deste artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

Referências

- [1] Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens. Curso de Instrumentação e Auscultação de Barragens. Material de Apoio. Parque Tecnológico Itaipu. 2017.
- [2] JAIME G. & MOLINA P. Fundamentos del Método de Elemento Finito. Primera Edición. Ingeniería Mecánica Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). 2010.
- [3] Itaipu Binacional. SAT-Sistema de Arquivo Técnico 2017.
- [4] Itaipu Binacional. Usina Hidrelétrica de Itaipu – Aspectos de Engenharia. Diretoria Técnica. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009.
- [5] ASGHAR, B. M. Fundamental Finite Element Analysis and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons. 2005.
- [6] R. Brincker, L. Zhang and P. Andersen: Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, 2000.
- [7] Prazzo, Carlos Eduardo. Análise Modal de uma Estrutura do Tipo Viga Utilizando Materiais Piezelétricos (PVDF) como Sensores. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. 2011.