

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/789

Determinação do Módulo de Deformabilidade por Retroanálise na Fundação Rochosa de Blocos de Contrafortes da Barragem de Itaipu

Adriana Elisabete Limberger

Mestre em Engenharia Civil, Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil, Foz do Iguaçu, Brasil,
adriana.limberger@pti.org.br

Débora de Oliveira Fernandes

Mestre em Geotecnia, Geóloga, Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil, Foz do Iguaçu, Brasil,
deboraof@pti.org.br

Luan Reginato

Mestre em Engenharia Civil (Estruturas), Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil, Foz do Iguaçu, Brasil,
luan.reginato@pti.org.br

Paola Maria Camila Villalba Fiore

Mestre em Engenharia Civil (Estruturas), Engenheira Civil Pleno, Itaipu Binacional, Hernandarias, Paraguai,
paovilla@itaipu.gov.py

Josiele Patias

Doutora em Geotecnia, Engenheira Civil Senior, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, Brasil,
jpatias@itaipu.gov.br

RESUMO: A determinação dos parâmetros de deformação de materiais rochosos desempenha um papel fundamental na engenharia geotécnica aplicada à fundação de barragens. Os parâmetros de deformabilidade, sejam eles determinados por ensaios laboratoriais, ensaios in situ ou métodos teóricos, quando comparados com as deformações obtidas pela instrumentação de campo, oferecem informações úteis para a avaliação contínua da segurança das estruturas. A partir do plano de auscultação em fundações de barragens, é possível potencializar o uso dos dados coletados na determinação dos parâmetros da fundação utilizando-se métodos de retroanálise. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo apresentar os resultados do cálculo do módulo de deformabilidade por retroanálise de uma porção da fundação rochosa dos blocos de contrafortes, localizados no Trecho E da barragem de Itaipu. Os dados de um extensômetro de fundação instalado durante a construção do Trecho E foram utilizados para este cálculo, associados às informações de tensão obtidas por meio de simulação das etapas construtivas do bloco de contrafortes denominado E-6, e de dois blocos adjacentes, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados obtidos permitiram identificar a variação do módulo de deformabilidade durante a construção dos blocos, indicando uma tendência de atenuação dos recalques ao se aproximar da fase final da construção, o que sugere uma relação de causa e efeito com as etapas de fechamento das fraturas e de consolidação da fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de Deformabilidade. Retroanálise. Fundação Rochosa. Barragem de Itaipu. Instrumentação Geotécnica.

ABSTRACT: The determination of the deformation parameters of rock materials plays a fundamental role in geotechnical engineering applied to dam foundations. The deformability parameters, whether determined by laboratory tests, in situ tests, or theoretical methods, when compared with the deformations obtained by field instrumentation, provide useful information for the continuous evaluation of the structures' safety. From the monitoring plan in dam foundations, it is possible to enhance the use of collected data in determining foundation parameters using back-analysis methods. In this sense, this article aims to present the results of the calculation of the deformation modulus by back-analysis of a portion of the rocky foundation of the buttress blocks, located in Section E of the Itaipu dam. The data from a foundation extensometer installed during the construction of Section E were used for this calculation, associated with stress information obtained through simulation of the construction stages of the buttress block called E-6, and two adjacent blocks, using the Finite Element Method (FEM). The results obtained allowed the identification of the variation of the deformation modulus during the construction of the blocks, indicating a tendency for settlement attenuation as it approaches the final phase of construction, which suggests a cause-and-effect relationship with the stages of fracture closure and foundation consolidation.

KEYWORDS: Deformation modulus. Back-analysis. Rock foundation. Itaipu Dam. Geotechnical instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

A deformabilidade das fundações rochosas tem sido objeto de discussão ao longo dos anos no contexto de barragens. Os métodos de determinação desse parâmetro são frequentemente influenciados pelas variações nas definições do conceito de módulo, pela variabilidade nos métodos utilizados para determinação e pelos elementos constituintes do maciço rochoso. Além disso, ao contrário da seleção da resistência ao cisalhamento da rocha, no qual tanto os limites superiores quanto inferiores da resistência são considerados, apenas o limite superior do módulo de deformabilidade pode ser prontamente previsto, o que dificulta a seleção do parâmetro mais apropriado a ser considerado (USACE, 1994).

A caracterização da deformabilidade dos maciços rochosos, definidos como meios descontínuos formados pela matriz rochosa e pelas descontinuidades que o atravessam, não deve ser realizada somente por ensaios em laboratório. Isso ocorre por não ser viável coletar e ensaiar amostras com dimensões suficientemente grandes para serem representativas do maciço rochoso (Silveira, 2003; Marques e Vargas Jr., 2022). Sendo assim, os ensaios laboratoriais permitem, em regra, caracterizar a deformabilidade da matriz rochosa, ou seja, do material dos blocos de rocha integrantes do maciço, delimitado pelas superfícies de compartimentação (Silveira, 2003).

Uma alternativa à dificuldade de realização de ensaios laboratoriais para a determinação da deformabilidade do maciço rochoso é a realização de testes *in situ*. Dentre esses testes, podem-se citar a aplicação da geofísica, os ensaios de placa, os ensaios utilizando dispositivos dilatométricos, os ensaios de macaco plano, entre outros. Esses experimentos são realizados considerando áreas e profundidades maiores na região de estudo, mas podem ser dispendiosos e não refletir a deformabilidade do maciço, dependendo da situação particular do tipo da rocha, do estado de alteração ou do preenchimento das fissuras. (Azevedo e Marques, 2006).

Em decorrência da variabilidade de determinação do parâmetro de deformabilidade, monitorar o desempenho de estruturas em seu período de construção e operação em termos de deformabilidade se apresenta como uma alternativa confiável. As retroanálises, por meio de dados de instrumentação, por exemplo, podem ser utilizadas para estimar tal parâmetro, possibilitando uma boa avaliação do comportamento do maciço rochoso de fundação no período pós-constutivo. Em meados dos anos 80 e 90, no Brasil, foram aplicados dados de extensômetros múltiplos para esse fim nas barragens de Água Vermelha, Três Irmãos e Itaipu.

Os métodos utilizados para a determinação da deformabilidade com os dados de instrumentação são variados. Analiticamente, Coelho (1982) aplicou um método considerando a transformação das cargas provenientes da concretagem de blocos de contraforte em tensões teóricas na região de instalação de extensômetro no domínio 2D. Silveira (2003) aplicou um método semelhante, entretanto a transformação das cargas em tensões teóricas foi feita no domínio tridimensional. Abrahão et. al (1983) apud Silveira (2003) utilizaram um modelo matemático bidimensional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para obter a evolução da deformabilidade, antes e depois da construção de elementos de reforço na fundação.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivos apresentar uma revisão dos métodos encontrados em literatura para estimação da deformabilidade a partir de dados dos extensômetros, e realizar um estudo de caso aplicado à fundação rochosa basáltica de um bloco de contraforte do Trecho E da Barragem de Itaipu. Para isso, serão utilizados os dados dos extensômetros instalados durante a construção do bloco, os dados de concretagem à época, e simulações numéricas atuais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

2 ESTUDO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DEFORMABILIDADE POR RETROANÁLISE

2.1 Método Analítico de Coelho (1982)

Coelho (1982) calcula o módulo de deformabilidade do maciço usando leituras dos extensômetros de haste durante a concretagem dos blocos de concreto. O autor aplicou essa metodologia para estimar o módulo da fundação de dois blocos de contraforte na barragem de Itaipu, em uma camada de basalto denso.

Para a determinação do módulo de deformabilidade, de acordo com o método, determinam-se as tensões σ_x e σ_y , no ponto P interior a um semiespaço elástico infinito, situado na vertical de uma carga distribuída f , de largura t e infinitamente longa na terceira dimensão (Figura 1.a). Sendo t associada a largura dos blocos e f a elevação do peso do bloco durante a concretagem.

De acordo com Obert e Duvall (1967), as tensões ao longo da profundidade seguem uma senóide, sendo possível traçar as tensões em x e y , conforme a Figura 1.b. Sendo P o ponto da âncora do extensômetro. Ao conhecer a variação de tensão na profundidade y , tem-se a deformação e_y em função de y , considerando o estado plano de deformação (Figura 1.c). Integrando a deformação e_y ao longo de P e P' , encontra-se o deslocamento teórico estimado pelo extensômetro de haste Δy . Isolando o módulo de deformabilidade, tem-se a Eq. 1.

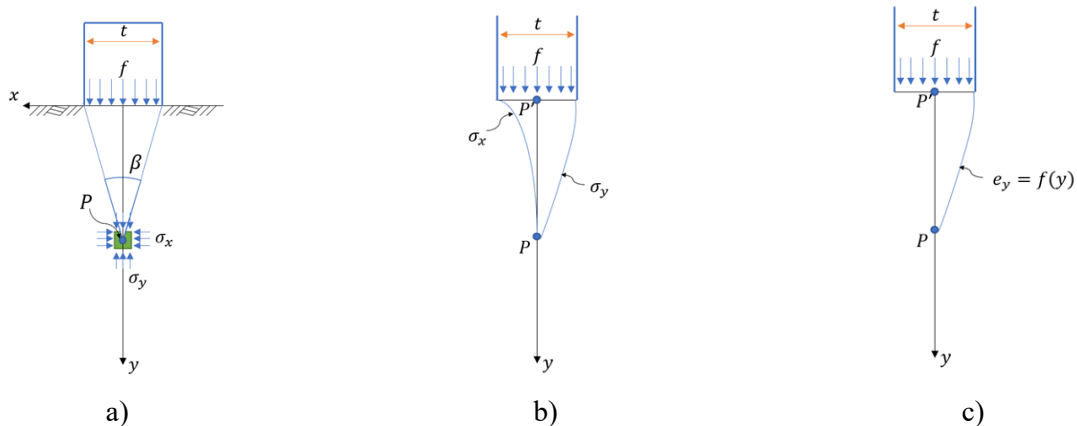


Figura 1. a) Esquema para consideração das tensões no ponto; b) Variação de σ_x e σ_y entre os pontos P' e P ; c) Variação de e_y entre os pontos P' e P .

$$E = \frac{1}{\Delta y} \int_P^P [(1 - \nu^2)\sigma_y - \nu(1 - \nu)\sigma_x] dy \quad \text{Eq. 1}$$

Por integração numérica, a expressão do módulo de elasticidade é apresentada na Eq. 2, sendo ν o coeficiente de Poisson e f a razão entre o peso do bloco e a área da base do bloco.

$$E = \frac{-t(\nu^2 - 1)f}{2\pi\Delta y} \times 4,3378 - \frac{t\nu(1 + \nu)}{2\pi\Delta y} \times 1,7887 \quad \text{Eq. 2}$$

2.2 Método Analítico de Silveira (2003)

O método analítico proposto por Silveira (2003) consiste no cálculo das tensões teóricas axiais resultante do peso das camadas de concretagem lançadas no período. As tensões são calculadas considerando distribuição uniforme da carga vertical do concreto em projeção retangular dos blocos na superfície.

O cálculo das tensões é realizado por meio da fórmula de Holl, extraída do livro de Poulos & Davis (1974), que fornece a tensão sob o vértice de um retângulo carregado com carga uniforme, sobre a superfície de um semiespaço infinito. A Figura 2 ilustra o esquema de carregamento, onde l é a largura entre os blocos, b é a profundidade dos blocos, p é o carregamento correspondente a elevação do concreto no tempo e z é a profundidade que se deseja calcular a tensão (profundidade da haste do extensômetro). As tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} são calculadas através das equações a seguir.

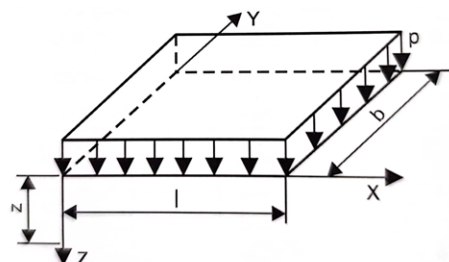


Figura 2. Esquema de carregamento: distribuição uniforme sobre área retangular.

$$\sigma_z = \frac{P}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{b}{zR_3} + \frac{bz}{R_3} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right] \quad \text{Eq. 3} \quad R_1 = (1^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{b}{zR_3} + \frac{bz}{R_1^2 R_3} \right] \quad \text{Eq. 4} \quad R_2 = (b^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 7}$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{b}{R_2} + \frac{z^2 b}{R_1^2 R_3} \right] \quad \text{Eq. 5} \quad R_3 = (1^2 + b^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 8}$$

Com as equações apresentadas, também é possível calcular as tensões na direção das hastes inclinadas dos extensômetros múltiplos que formam um ângulo θ com a direção vertical z , conforme a Eq. 9 e Eq. 10. Ainda, de acordo com Poulos & Davis (1974), essas equações são aplicáveis para um coeficiente de Poisson de 0,5. Salienta-se que as equações se aplicam para um meio homogêneo, elástico e isotrópico, de forma que os resultados devem ser sempre analisados com cuidado, entretanto, segundo Silveira (2003) são adequados para maciços rochosos pois refletem as características médias das camadas.

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \cos 2\theta + \tau_{xz} \sin 2\theta \quad \text{Eq. 9}$$

$$\tau_\theta = \tau_{xz} \cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\theta \quad \text{Eq. 10}$$

Com isso, a partir das deformações (ε) entre hastes medidas pelos extensômetros múltiplos instalados na fundação das estruturas de concreto, é possível calcular os módulos de deformabilidade do maciço pela Lei de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 11}$$

2.3 Método Numérico por Elementos Finitos

Com o método dos elementos finitos é possível simular a construção da barragem por aplicação de peso próprio e também adicionar à simulação o enchimento do reservatório através da aplicação do empuxo hidrostático, além das subpressões na fundação (Silveira, 2003). Nesse sentido, para calcular o módulo de deformabilidade é necessário a modelagem 2D ou 3D da barragem de estudo e sua fundação, discretizar em malha de elementos finitos, atribuir as condições de contorno e os carregamentos.

A partir dessa construção numérica, dois caminhos são possíveis na determinação do módulo de deformabilidade. Pode-se, inicialmente, produzir um deslocamento relativo que se ajuste com a maior precisão possível ao deslocamento medido no instrumento, a partir do incremento de carga devido ao peso da concretagem. Isso é conseguido através de variações no módulo de deformabilidade do trecho analisado. Obtendo-se a compatibilização entre o deslocamento do modelo e o deslocamento medido, obtém-se o módulo ajustado (Coelho, 1982).

O segundo caminho possível é a determinação do módulo através do levantamento das tensões nos pontos onde estão instalados os instrumentos. A variação dessas tensões é conseguida a partir da variação do carregamento aplicado (peso adicionado devido à concretagem) (Silveira, 2003). De posse das deformações medidas nos instrumentos para a situação real, pode-se construir por correlação um gráfico tensão versus deformação, e obter-se o módulo de deformabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de Estudo

O estudo foi aplicado na fundação rochosa do “Trecho E” da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI), localizada no rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai (Figura 3.a). A barragem de Itaipu está assentada sobre os basaltos pertencentes aos extensos derrames da formação Serra Geral.

3.2 Dados de Instrumentação

Para calcular a estimativa do módulo de deformabilidade, utilizou-se os dados do extensômetro EM-E-001, localizado na fundação do bloco E-06, a montante, inclinado a 60° em relação à vertical (Figura 3.b). O instrumento iniciou sua operação no dia 16/11/1981, antes da finalização da concretagem. O extensômetro atravessa o concreto, o basalto denso do derrame E, a brecha basáltica entre os derrames D/E e o basalto vesicular do derrame D. Além disso, localizada na elevação 134,78, a Junta D também está interceptada. O módulo de deformabilidade estimado será o módulo equivalente dessas camadas interceptadas.

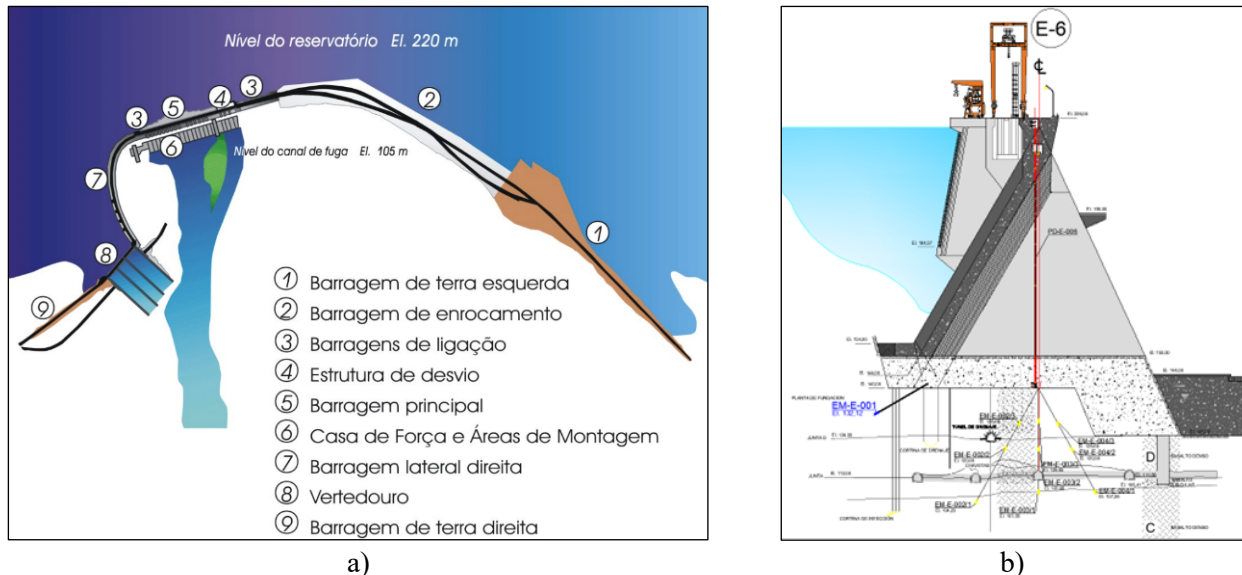


Figura 3. a) Esquema da Usina Hidrelétrica de Itaipu; b) Localização do extensômetro na seção do Bloco E6. Fonte: Itaipu Binacional (2024).

3.3 Modelagem das Elevações do Concreto no Tempo para os Blocos E5, E6 e F-1/2

Para simular o comportamento da elevação do concreto no tempo, foram modeladas as geometrias dos blocos E-05, E-06 e F-1/2. Foram considerados os três blocos na análise, pois, de acordo com Silveira (2003), é necessário levar em consideração pelo menos os dois blocos adjacentes ao bloco analisado. As geometrias foram subdivididas em camadas conforme os períodos de concretagem, determinados a partir das fichas da época da construção. A Figura 4 ilustra as geometrias que representam a elevação do concreto para 30/11/1981, corresponde à primeira medição do extensômetro, para uma data intermediária, e para a finalização da concretagem dos blocos, ocorrida em 17/06/1982.

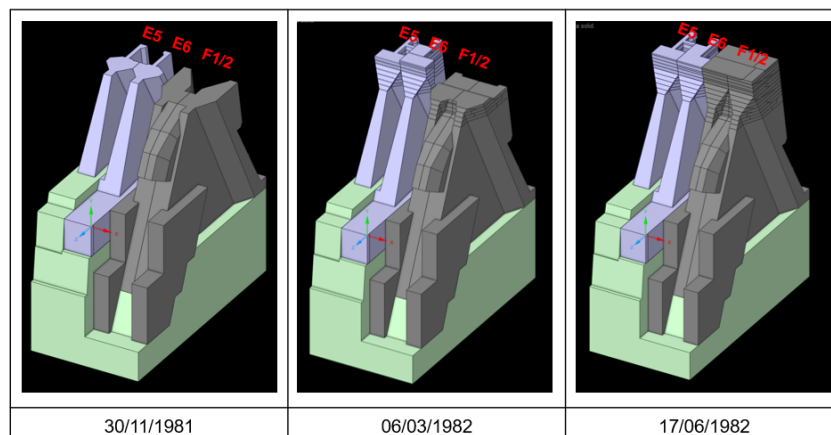


Figura 4. Modelagem das elevações do concreto no tempo para os blocos E-05, E-06 e F-1/2.

Esse procedimento foi realizado para ser possível simular a tensão provocada pela elevação do concreto dos blocos na fundação de forma sequencial e automática, ou seja, o valor da tensão no ponto de interesse foi extraído, na região do instrumento, a cada data em que havia uma medição correspondente do extensômetro.

3.4 Obtenção das Tensões Calculadas pelo Método dos Elementos Finitos

As simulações realizadas permitiram determinar as tensões no ponto médio da haste do instrumento a cada elevação de concreto no tempo. Para isso, foi utilizado no software Ansys o recurso de exibição de resultados de tensões normais axiais ao longo de uma linha auxiliar (*path*), coincidente com a posição e direção de instalação do extensômetro. O modelo utilizado para a barragem e para a fundação foi homogêneo, linear, elástico e isotrópico, aplicando-se a Lei de Hooke. A densidade adotada para o concreto foi de 2600 kg/m^3 , o módulo de elasticidade foi de 30 GPa e o coeficiente de Poisson foi de 0,16, segundo relatório 4124-50-15205 da Itaipu Binacional.

Para os blocos, as condições de contorno adotadas foram de restrição perpendicular ao movimento. Entre os blocos, foram consideradas condições de contato do tipo *Frictionless*, que permitem totalmente o deslocamento tangencial entre os blocos, mas não permitem o deslocamento longitudinal. No contato concreto-rocha foram considerados os contatos do tipo colado.

As condições de contorno utilizadas para a fundação foram de apoio fixo na base e restrição de movimento perpendicular nas laterais direita e esquerda do modelo, bem como a montante e a jusante. A densidade foi considerada como sendo nula, e foi utilizado um módulo de elasticidade inicial equivalente (32 GPa) e coeficiente de Poisson de 0,28.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após realizadas as simulações para todas as medições registradas no extensômetro durante o período de concretagem, foi possível relacionar as tensões calculadas com as deformações registradas no instrumento. O período considerado foi entre a primeira medição do EM-E-001 até a finalização da concretagem do bloco F-1/2. É importante salientar que de acordo com as fichas de concretagem, os blocos E-05 e E-06 foram finalizados em data anterior ao F-1/2. Ao se construir então o gráfico de tensão versus deformação, notou-se que no trecho final do gráfico, correspondente à elevação apenas do bloco F-1/2, houve baixa correlação entre o acréscimo de tensão e a deformação medida (da ordem de $R^2 \cong 0,6$), havendo, inclusive, uma tendência à estabilização do deslocamento medido no extensômetro, conforme é observado na Figura 5. Pode-se supor, então, que a elevação isolada do bloco F-1/2 não afeta significativamente o comportamento do instrumento.

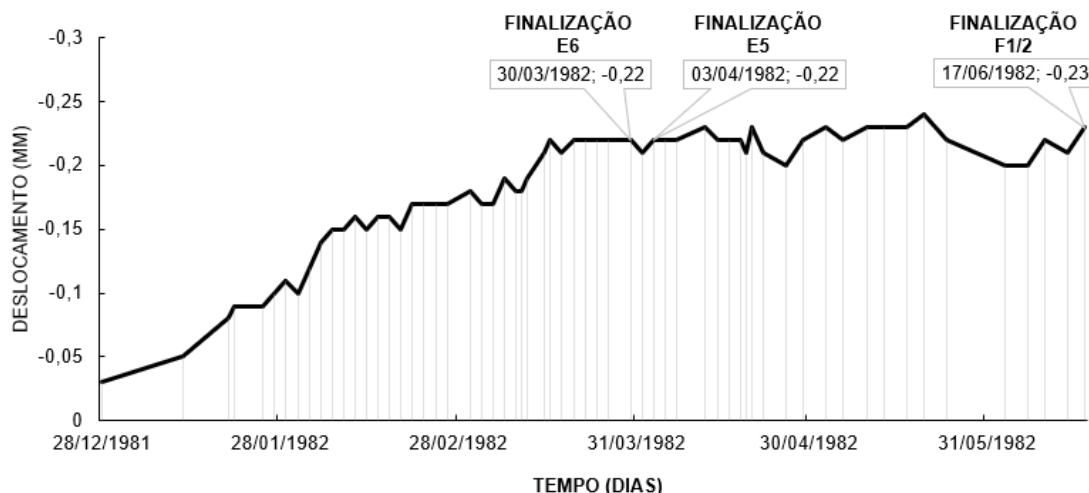


Figura 5. Deslocamento medido no EM-E-01 durante o período de concretagem dos blocos.

Construiu-se, então, o gráfico de tensão versus deformação para o período que compreendeu o início da medição do EM-E-001 (30/11/1981) e a finalização da concretagem dos blocos E-05 (30/03/1982) e E-06 (03/04/1982) com $R^2 \cong 0,96$. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

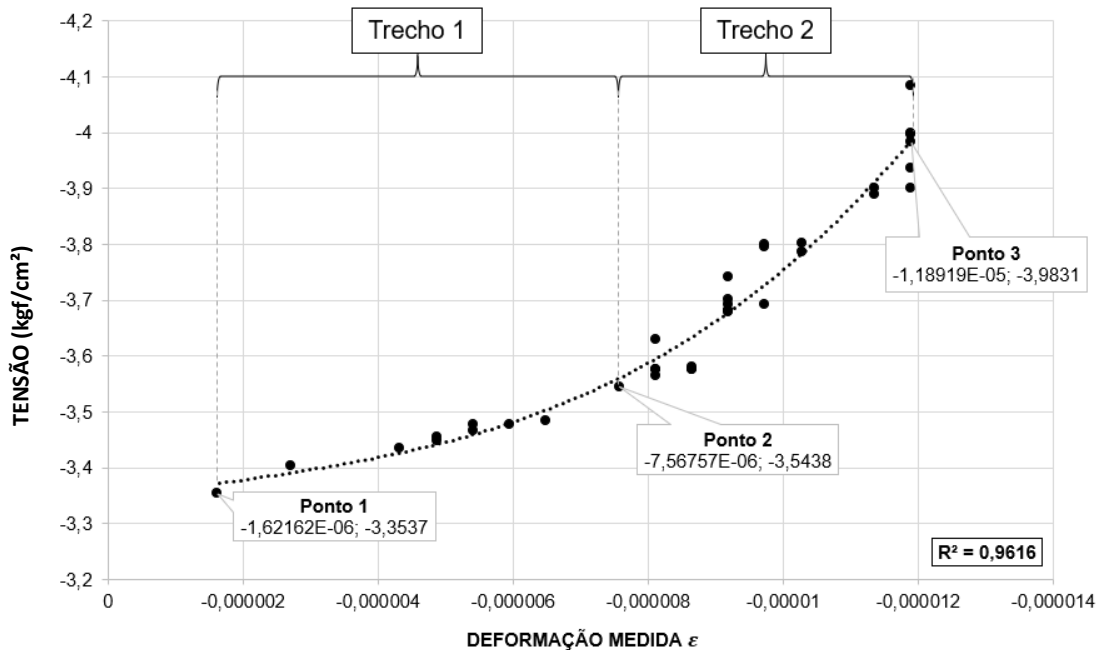


Figura 6. Gráfico da tensão versus deformação utilizando a simulação da elevação do concreto no tempo dos blocos E-05, E-06 e F-1/2 e os dados do EM-E-001.

Observa-se no gráfico da Figura 6 que foram identificados três pontos de interesse. Entende-se como hipótese que os pontos 1 e 2 formariam um primeiro trecho (Trecho 1), com o valor do módulo de deformabilidade inicial correspondente ao fechamento das fraturas. Entre os pontos 2 e 3, que caracterizam um segundo trecho (Trecho 2), o módulo de deformabilidade poderia representar o início da consolidação do maciço. Os valores de deformação desses pontos foram inseridos como dados de entrada na equação da curva de correlação, e foram obtidos os respectivos resultados de tensão, que estão apresentados na Tabela 1.

Com a diferença de deformação e tensão entre os pontos, é possível calcular o módulo de deformabilidade pela Lei de Hooke. Com isso, para o primeiro trecho, o módulo de deformabilidade estimado foi de 3,006 GPa e para o segundo trecho, de 9,485 GPa.

Tabela 1. Ajuste das tensões calculadas com base nas deformações medidas utilizando a curva de regressão

Ponto	Deformação (10^{-6})	Tensão (kgf/cm ²)
1	-1,62162	-3,370956
2	-7,56757	-3,553261
3	-11,8919	-3,971525

Os valores encontrados estão coerentes com a magnitude dos valores medidos por Abraão (1983) apud Silveira (2003), para o Trecho F da Barragem de Itaipu, sendo 5,5 GPa da camada superficial até 10 m e 7,0 GPa para o Basalto Vesicular ou Brecha Basáltica. Os valores estão também na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados em estudos feitos em 2012, no qual sugerem módulos de 10 e 8 GPa para Brecha Basáltica e Basalto Amigdaloidal, respectivamente.

Em laboratório, os valores médios desses parâmetros resultaram em 15,3 GPa para o Basalto Vesicular do derrame E, 33,4 GPa para a brecha basáltica D/E e 61,5 GPa para o basalto denso do derrame E (Itaipu Binacional, 2012). Por serem resultados obtidos para a rocha intacta, e, portanto, não levarem em consideração

as fraturas e as descontinuidades, nota-se que os valores são superiores aos obtidos no presente estudo para a porção superior do maciço, evidenciando a importância de se analisar o parâmetro do maciço com cautela.

5 CONCLUSÕES

O cálculo do módulo de deformabilidade utilizando o MEF apresentou-se como uma alternativa satisfatória de retroanálise utilizando dados do extensômetro EM-E-01. Os valores médios calculados, que abrangem a camada de concreto, de Basalto Denso do derrame E e da Brecha Basáltica D/E, são coerentes com os valores determinados por Abraão (1983) apud Silveira (2003), para o Trecho F da Barragem de Itaipu. E também para os valores encontrados em estudos feitos em 2012, especialmente quando se trata das camadas de brecha e basalto vesicular-amigdalóide.

Para a aplicação do método, foi considerado um modelo homogêneo, linear, elástico e isotrópico. Na análise dos resultados das simulações, foi utilizado no Ansys o recurso de exibição de tensões ao longo de uma geometria auxiliar (*path*), coincidente com a posição do ponto médio do extensômetro.

Por fim, entende-se que a metodologia pode ser aplicada a outros extensômetros da Barragem de Itaipu, considerando como dados de entrada o carregamento proveniente da elevação do concreto ou do enchimento do reservatório. Especificamente para o Trecho E, o único extensômetro que foi instalado antes da finalização da concretagem dos blocos foi o utilizado na presente análise. Os outros extensômetros, então, somente poderiam ser avaliados considerando o carregamento advindo do enchimento do reservatório, o que poderia ser objeto de trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Itaipu Binacional pela liberação dos dados e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil pelo suporte na realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraão, R. A.; Silveira, J. F. A.; Paes de Barros, F. (1983) “Itaipu Main Dam Foundations: Design and Performance During Construction and Preliminary Filling of the Reservoir”. In: 5th Congresso Internacional de Mecânica das Rochas. Melbourne (Austrália).
- Azevedo, I. C. D., Marques, E. A. G. (2006) *Introdução à Mecânica das Rochas*, UFV, Viçosa.
- Coelho (1982) - Disponível no Relatório 4096-10-5002-P-R0A interno da Itaipu Binacional.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics Second Edition*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 576p.
- Itaipu Binacional (2017). *Itaipu Binacional: barragem*. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/barragem>>. Acesso em 13/03/2024.
- Itaipu Binacional (2012). Central Hidrelétrica de Itaipu. Blocos do Trecho E. Novo Modelo Geomecânico.
- Marques, E. A. G., Vargas Jr. E. A. (2022). *Mecânica das Rochas*, first ed. São Paulo, Oficina dos Textos, 176 p.
- Obert, L., Duvall, W. I. (1967). *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. New York, John Wiley, 650 p.
- Poulos, H. G. Davis, E.H. (1974). *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*. New York, John Wiley & Sons, 243 p.
- Silveira, J. F. A. (2003). *Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto*. São Paulo, Oficina de Textos, 320 p.
- USACE (1994). *Rock Foundations*. US Army Corps of Engineers. 120 p.