

Modelagem Numérica do Comportamento Tensão-Deformação das Barragens de Terra da UHE São Simão Durante a Construção

Publio Reis Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, publiopereira@yahoo.com.br

Gustavo Ferreira Simões

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, gustavo@etg.ufmg.br

RESUMO: O presente trabalho consiste de modelagens numéricas do comportamento tensão-deformação das barragens de solo compactado da UHE São Simão, durante seu período construtivo, utilizando para tanto o modelo constitutivo hiperbólico. As modelagens numéricas foram realizadas por meio do programa SIGMA/W – Versão 2007, o qual baseia-se no método dos elementos finitos. Os deslocamentos verticais obtidos por meio das modelagens numéricas foram, posteriormente, comparados aos resultados da instrumentação de campo com o objetivo de se verificar a adequabilidade do modelo adotado na representação do comportamento dos solos utilizados na construção e fundação da barragem. Para calibração do modelo constitutivo foram utilizados os resultados dos ensaios triaxiais realizados nos solos utilizados na construção da barragem e também de dados obtidos na literatura. Os resultados da modelagem numérica utilizando os parâmetros de calibração obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, foram aceitáveis até meia altura da barragem, entretanto os resultados próximos a crista das barragens foram superiores aos obtidos pela instrumentação. Embora os resultados numéricos não tenham apresentado uma satisfatória correspondência para toda a instrumentação de campo, diversos fatores como uma possível intervenção no processo construtivo, com o objetivo de fazer uma compensação dos recalques, de certa forma, justificam os aspectos que possam ter comprometido os resultados. Portanto, considera-se válido o emprego do modelo hiperbólico em previsões do comportamento tensão-deformação de barragens de terra.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Modelo Hiperbólico, Comportamento Tensão-deformação de solos.

1 INTRODUÇÃO

A parte central da modelagem numérica de um problema real é a descrição de como as grandezas físicas se relacionam, como tensões, deformações e tempo (DESAI; CHRISTIAN, 1977). Essas relações são equacionadas por meio dos modelos constitutivos e, por meio destes, é possível reproduzir, prever e interpretar o comportamento tensão deformação de um dado material.

As curvas tensão-deformação de qualquer tipo de solo dependem de vários fatores incluindo densidade, teor de umidade, estrutura,

condições de drenagem, tipo de deformação (plana, axissimétrica ou triaxial), duração do carregamento, histórico de tensões, tensão de confinamento e tensões cisalhantes (DUNCAN e CHANG, 1970).

O modelo constitutivo elástico linear considera que os materiais possuem módulo de elasticidade constante, independentemente do nível de tensões ao qual está sendo submetido, sendo esses governados pela lei de Hooke, tendo como principais parâmetros o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade ou módulo de Young.

O modelo constitutivo hiperbólico considera

que o solo seja um material elástico e o comportamento desse é dependente do nível de tensão confinante e da tensão desviadora ao qual o solo está submetido.

A não linearidade das curvas tensão deformação pode ser expressa por uma hipérbole, governada pela equação 1 desenvolvida por Duncan e Chang (1970). Em que: E_i é o módulo de Young tangente inicial; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ é a diferença das tensões principais na ruptura.

$$\Delta\sigma = (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad (1)$$

Por meio de estudos experimentais feitos por Janbu *apud* Duncan e Chang (1970), obtem-se a correlação entre o módulo de elasticidade inicial e a tensão de confinamento. Admitindo que seja válido o critério de ruptura de Mohr Coulomb, a equação governante do modelo hiperbólico é apresentado na equação 2, tendo como referência cinco parâmetros de calibração K , n , c , ϕ e R_f , que podem ser obtidos em ensaios triaxiais.

$$\Delta\sigma = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n} + \frac{\varepsilon R_f}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}} \quad (2)$$

As principais limitações modelo constitutivo hiperbólico, segundo Duncan *et al.* (1980) são: não é aplicável para solos que possuem o comportamento de dilatância, ao serem cisalhados; os parâmetros de calibração do modelo não são propriedades fundamentais do solo, sendo dependentes da densidade do solo, teor de umidade, variações de tensões usadas durante os ensaios e das condições de drenagem. Dessa maneira, o solo deve ser submetido a ensaios de laboratório nas mesmas condições em que será submetido em campo.

Duncan *et al.* (1980) também fizeram um extenso estudo dos parâmetros de calibração do modelo hiperbólico por meio de dados publicados na literatura. A partir desses dados, obtiveram os parâmetros de calibração de, aproximadamente, 80 diferentes tipos de solos, dentre os quais 41 para ensaios drenados e 39

para ensaios não-drenados.

Baseando-se nos resultados encontrados, Duncan *et al.* (1980) concluíram que os fatores mais importantes que afetam as características das curvas tensão-deformação e a resistência de solos ensaiados em condições drenadas são: densidade relativa, distribuição granulométrica, forma dos grãos e composição mineralógica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A UHE São Simão é uma das maiores hidrelétricas da CEMIG, sendo parte integrante do sistema de aproveitamento hidrelétrico do Rio Paranaíba, localizado na fronteira entre os estados de Minas Gerais e Goiás. É composta por barragens de terra nas margens direita e esquerda, uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso no leito do rio, uma barragem de gravidade em concreto, estruturas hidráulicas, ensecadeiras, canal de descarga e canal de desvio e subestação.

A barragem de terra da margem direita possui uma extensão aproximada de 1.260m e uma altura máxima de 71 m. A barragem de terra da margem esquerda possui uma extensão aproximada de 952m e altura máxima de 64m. As cristais de ambas barragens possuem 10 m de largura e foram projetadas com uma sobre-elevação de 0,30 m como uma tentativa de compensar os recalques após a construção.

Os principais materiais utilizados na construção da barragem são: areias argilosas transportadas para a construção do núcleo da barragem e do cascalho de terraço para a construção dos taludes de montante e jusante.

2.1 Seções de Estudo

A seção de estudo da margem esquerda está localizada na estaca 3+300, e da margem direita está localizada na estaca 0+850. Essas seções foram escolhidas por serem seções típicas das barragens, além de possuírem uma seção de instrumentação em suas proximidades. Na seção da margem esquerda, a barragem está assentada em rocha levemente alterada, enquanto a da margem direita está assentada sobre cerca de 12m de solo residual, segundo Viotti (1975).

Na seção de instrumentação da margem esquerda, foram instalados quatro piezômetros do tipo Casagrande, 16 piezômetros do tipo HALL, seis placas de recalque do tipo IPT e dois inclinômetros do tipo Wilson. Na Figura 1 é mostrada a locação das placas de recalque e dos inclinômetros juntamente com a seção de estudo.

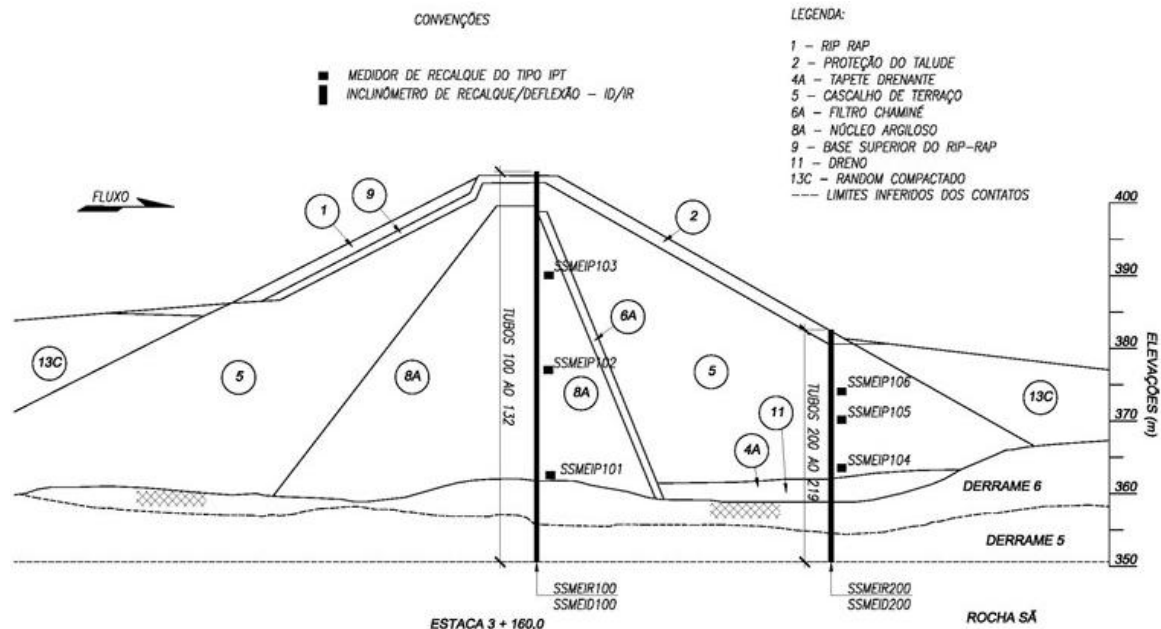


Figura 1. Seção de estudo e instrumentada da margem esquerda

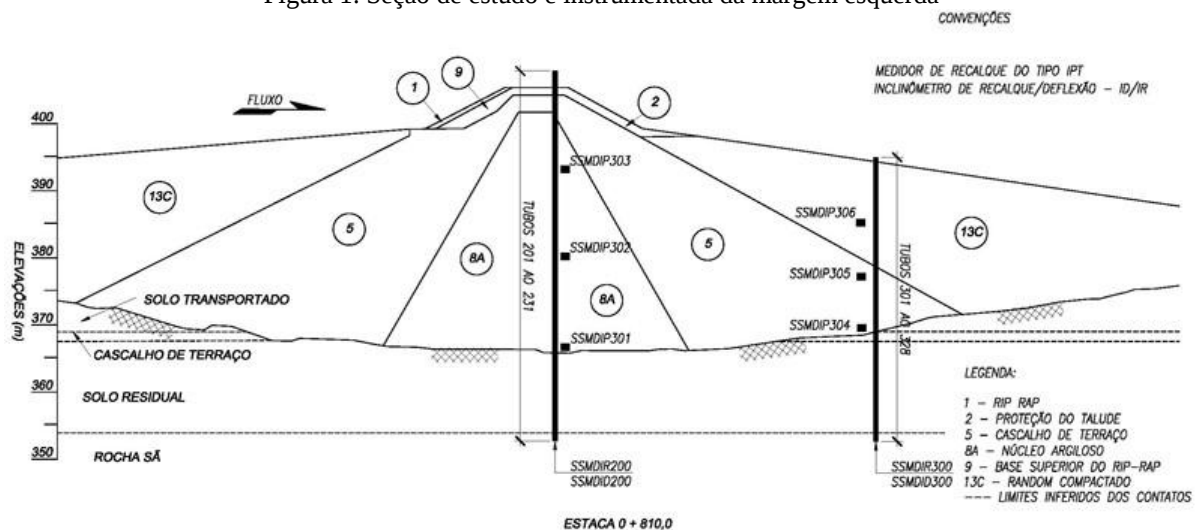


Figura 2. Seção de estudo e instrumentada da margem direita

2.2 Modelagem Numérica

As seções típicas (Figuras 1 e 2) das barragens de terra da UHE São Simão foram modeladas no programa computacional SIGMA/W versão 2007, sendo esse um programa que utiliza o método dos elementos finitos para a análise do comportamento tensão-deformação de obras

Na seção de instrumentação da margem direita foram instalados três piezômetros do tipo Casagrande, 16 piezômetros do tipo HALL, seis placas de recalque do tipo IPT e dois inclinômetros do tipo Wilson. Na Figura 2 é mostrada a locação das placas de recalque e dos inclinômetros juntamente com a seção de estudo.

geotécnicas.

O SIGMA/W baseia-se na teoria das pequenas deformações e realiza análises bidimensionais, considerando a hipótese do estado plano de deformações ou de problemas axissimétricos. Sendo assim, tem aplicabilidade para obras em que a seção transversal se repita continuamente ao longo do comprimento.

De certo, empregar análises do tipo estado plano de deformação em toda a barragem da UHE de São Simão não é válido. Entretanto, considerando que o eixo longitudinal das barragens de terra da margem esquerda e da margem direita não apresenta curvatura no sentido longitudinal, que a seção transversal da barragem permanece a mesma em quase toda a sua extensão, e também que as seções de estudo estão locadas aproximadamente no meio da barragens, o estado plano de deformação tornar-se aplicável.

Como premissa, a modelagem numérica deve ser capaz de gerar resultados compatíveis com os registros de instrumentação, fazendo com que os dados de entrada do modelo (parâmetros de calibração) exerçam papel fundamental na

qualidade dos resultados. Os referidos parâmetros de calibração, foram obtidos a partir dos resultados de ensaios de laboratório e dados obtidos da literatura especializada.

Posteriormente, esses parâmetros foram aferidos tendo como base os registros da instrumentação de campo, a fim de que as respostas do modelo se aproximem aos registros obtidos com instrumentação.

O número de etapas adotado para as modelagens numéricas foi de 15 etapas para a seção da margem direita e de 14 etapas para a seção da margem esquerda. Nas Figuras 3 e 4 são mostradas as seções implementadas juntamente com a malha de elementos finitos utilizada

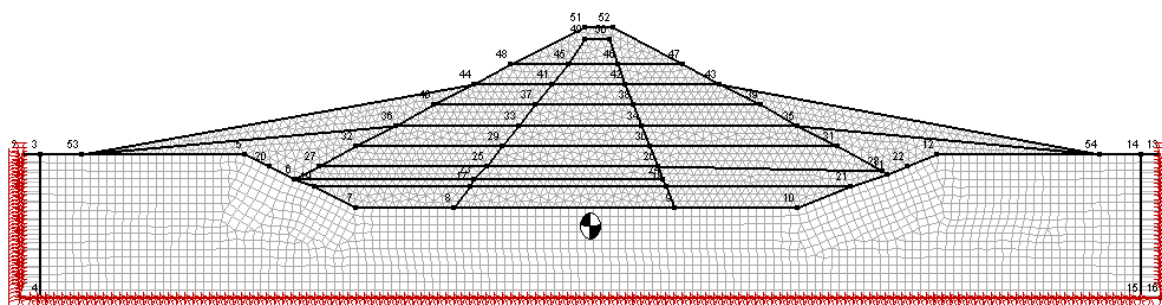


Figura 3. Malha de elementos finitos da margem direita

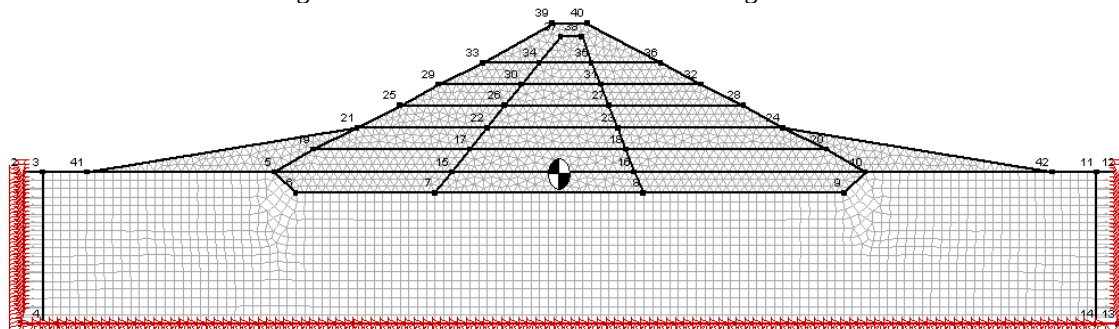


Figura 4. Malha de elementos finitos da margem direita

3 RESULTADOS

Foram analisados os resultados para três diferentes conjuntos de parâmetros de calibração, sendo o primeiro obtido a partir dos resultados dos ensaios triaxiais do tipo CU, realizados durante o projeto de construção da barragem para os solos do tipo areia argilosa e do tipo cascalho de terraço, e para o solo de fundação foram utilizados os valores sugeridos por IESA (1980). Para o segundo conjunto de parâmetros, variaram-se os parâmetros de

resistência do solo da fundação e o terceiro conjunto de parâmetros, foram utilizados os parâmetros sugeridos por Duncan *et al.* (1980). Devido a impossibilidade de obter os parâmetros de resistência para o solo do tipo randon compactado através de ensaios triaxiais, foram utilizados para todas as análises os parâmetros sugeridos por Duncan *et al.* (1980).

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros utilizados na calibração do modelo hipertólico, utilizando os ensaios triaxiais do tipo CU para os solos do tipo areia argilosa e cascalho de

terraço. Por se tratarem de ensaios triaxiais do tipo CU, em que não há variação de volume, o coeficiente de Poisson torna-se igual ao valor de 0,49, sendo que o peso específico de ambos os materiais foi considerado de 20 kN/m³, conforme sugerido por IESA (1980).

Com relação aos parâmetros para o solo de fundação, os valores sugeridos por IESA (1980), foram de: módulo de elasticidade de 5.000 MPa, e o peso específico é de 22kN/m³. Destaca-se que o módulo sugerido por IESA(1980) corresponde a um material muito rígido, indeformável, o que gera uma possível incompatibilidade com o tipo de solo da fundação da barragem.

Tabela 1. Parâmetros de calibração do modelo hiperbólico, utilizando ensaios triaxiais do tipo CU

Solo	K	n	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	R _f	ν
Areia Argilosa	52 0	0,2 8	226	22	20	0,8 4	0,4 9
Cascalho de Terraço	81	1,1	11	26	20	0,8 9	0,4 9
Randon Compactado	15 0	0,2 5	0	30	20	0,7 0	0,4 9

Na comparação entre os recalques obtidos pelo modelo teórico e os dados dos inclinômetros, os resultados do modelo teórico não foram satisfatórios em nenhum instrumento. Já com relação à fundação, na data de conclusão da barragem (agosto/1977), a barragem da margem esquerda havia recalcado 7,4cm para o instrumento SSMEIR100 e 3,8 cm para o instrumento SSMEIR200, enquanto a barragem da margem direita havia recalcado 14,1cm para o instrumento SSMDIR200 e 4,7 cm para o instrumento SSMDIR300, enquanto que, nos modelos teóricos, essas deformações foram praticamente nulas, sugerindo, dessa maneira, que o módulo de elasticidade para o solo de fundação adotado, conforme sugerido por IESA (1980), estaria muito alto.

Visando obter resultados mais coerentes com os dados da instrumentação, foram modificados os parâmetros de deformabilidade do solo de fundação e do randon compactado, conforme pode ser observado na Tabela 2. Considerando,

que a barragem da margem esquerda encontra-se assentada sobre os derrames de basalto, enquanto que a barragem da margem direita, assenta-se em solo residual, tal fato faz com que os parâmetros do solo de fundação da barragem da margem esquerda sejam diferentes do solo da margem direita. Para a areia argilosa e para o cascalho de terraço foram mantidos os mesmos parâmetros utilizados mostrados na Tabela 1.

Tabela 2. Parâmetros para o solo de fundação e randon compactado, utilizados no segundo conjunto de análises

S	K	n	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	R _f	ν	E (kPa)
F. M. D.	-	-	-	-	20	-	0,4 5	35.00 0
F. M. E.	-	-	-	-	22	-	0,4 9	50.00 0
R. M. D.	15 0	0,2 5	0	3 0	19	0,7 0	0,4 9	19
R. M. E.	20 0	0,6 0	0	3 3	19	0,7 0	0,4 9	18

M. D. = margem direita, M. E. = margem esquerda, F= solo de fundação, R = solo randon compactado, S = solo

Assim, os resultados do modelo teórico, do segundo conjunto de análises, foram mais coerentes com os dados da instrumentação. Referente a margem esquerda, com relação ao instrumento SSMEIR100, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória da EL. 350,000 à EL. 380,00, e, na etapa 14, o modelo teve como recalque, na EL.380,00, um valor de 20,2cm, contra um valor de 23,3cm para a instrumentação em agosto/1977. Com relação ao instrumento SSMEIR200, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória da EL. 350,000 à EL. 375,00, sendo que, na etapa 14, o modelo teve como recalque, na EL.375,00, um valor de 2,5cm, contra um valor de 1,4cm para a instrumentação em agosto/1977. Com relação placas de recalque do tipo IPT, aos resultados obtidos na última etapa do modelo foram coerentes para com os

instrumentos MEIP101, MEIP102, MEIP104 e MEIP106, e, para com os demais instrumentos, esses não foram coerentes.

Com relação à margem direita, no instrumento SSMDIR200, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória entre as elevações EL. 365,00 a EL. 383,00, mostrando que de fato o solo de fundação dessa seção da barragem possui um módulo de elasticidade menor que o da margem esquerda. Entretanto, houve uma maior discrepância entre os resultados obtidos com relação das placas placas de recalque do tipo IPT.

No terceiro conjunto de análises, com relação à areia argilosa e ao cascalho de terraço, optou-se por utilizar os parâmetros sugeridos por Duncan *et al.* (1980), conforme pode ser observado na Tabela 3, sendo que esses foram escolhidos por meio de retroanálises, tendo como objetivo aproximar o máximo possível os resultados do modelo como os dados da instrumentação.

Com relação ao solo de fundação e o solo do tipo randon compactado, foram mantidos os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 2, uma vez que, os deslocamentos obtidos para a fundação foram coerentes com os dados fornecidos pela a instrumentação.

Com relação à margem esquerda, no instrumento SSMEIR100, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória da EL. 350,000 à EL. 380,00. Já na etapa 14, o modelo teve como recalque, na EL.380,00, um valor de 23,3cm igual ao obtido pela a instrumentação em agosto/1977. Entretanto, os recalques no topo do maciço da barragem, apresentados pelo modelo teórico, continuaram superiores aos valores do instrumento SSMEIR100. As três justificativas possíveis para esse fato são: o solo nessa região encontra-se mais rígido que o esperado; uma possível intervenção no processo construtivo, com o objetivo de fazer uma compensação dos recalques; e, por fim, que os deslocamentos mensurados pela instrumentação são correspondentes, na realidade, somente após o período de instalação desse, o que faz com que os recalques anteriores sejam desprezados.

Tabela 3. Parâmetros para a areia argilosa e cascalho de terraço, utilizados no terceiro conjunto de análises

Solo	K	n	R_f	ν	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m³)
Areia Argilosa M.D.	200	0,6 0	0,7 0	0,4 9	150	33	20
Cascalho de Terraço M.D.	300	0,4 0	0,7 0	0,4 9	0	36	20
Areia Argilosa M.E.	200	0,6 0	0,7 0	0,4 9	150	33	20
Cascalho de Terraço M.E.	450	0,4 0	0,7 0	0,4 9	0	39	20

Com relação ao instrumento SSMEIR200, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória em toda a seção da barragem, até a etapa 8, sendo que os recalques fornecidos pelo modelo, para as EL. 360,00 e 370,00, foram respectivamente de 5,3cm e 3,19cm, valores esses praticamente iguais aos dados da instrumentação. Entretanto, a partir da etapa 9, o modelo apresentou resultados incoerentes, quando comparado com os dados da instrumentação, sendo que os recalques da etapa 14 foram menores que os da etapa 8, caracterizando um processo de soerguimento a partir da etapa 9. Esse fato pode ser explicado pela dificuldade de obter parâmetros característicos do solo do tipo 13C (random compactado), uma vez que esse solo possui uma grande heterogeneidade.

Comparando os resultados referentes às placas de recalque do tipo IPT, os resultados obtidos na última etapa do modelo foram coerentes para com os instrumentos MEIP101, MEIP102, MEIP104 e MEIP105 e, para com os demais instrumentos, esses não estão coerentes.

Com relação à margem direita, no instrumento SSMDIR200, o modelo teórico foi capaz de reproduzir os dados da instrumentação de maneira bastante satisfatória até a elevação EL. 383,00, sendo que nessa elevação o modelo teórico obteve um valor de 23,9cm, contra um valor de 23cm para a instrumentação em agosto/1977. Entretanto, os resultados do

modelo teórico continuam não satisfatórios para o interior da barragem para o instrumento SSMDIR300, fato esse que, pode ser explicado pela grande dificuldade de obter parâmetros característicos do solo do tipo randon compactado.

Referente as placas de recalque do tipo IPT, os resultados obtidos na última etapa do modelo foram coerentes para com os instrumentos MDIP101 e MDIP102, para com os demais instrumentos, esses não estão coerentes.

Na Tabela 4 é mostrado, resumidamente, o comparativo entre os resultados das modelagens numéricas, para os diferentes conjuntos de calibração e os dados da instrumentação, considerando para tanto a última etapa de construção. Pereira (2014) apresenta a evolução dos recalques com os acréscimos de tensões e é feita a comparação dos resultados considerando também o modelo constitutivo linear elástico.

Tabela 4. Comparativo dos recalques teóricos e os dados da instrumentação (última etapa de construção)

Instrumento	Cota	Recalques (cm)			
		Instrumentação	Modelo teórico		
			Conj. Par. 1	Conj. Par. 2	Conj. Par. 3
SSMEIR100	360	7,4	0,0	9,0	8,0
	370	17,7	1,1	15,8	15,1
	380	23,3	7,5	20,2	23,3
	402	2,0	14,1	15,5	9,8
SSMEIR200	360	3,8	0,0	2,5	2,2
	370	5,3	0,5	5,2	3,9
	380	2,5	-4,2	-3,8	2,4
SSMDIR200	360	14,1	0,0	18,0	17,0
	370	19,9	2,1	20,2	22,3
	380	23,4	7,9	25,0	25,1
	400	3,4	15,0	19,0	17,5
SSMDIR300	360	4,7	0,0	8,2	8,5
	370	13,8	1,8	14,2	14,0
	380	17,4	1,0	14,0	11,8
	392	8,6	0,8	6,0	7,9
MEIP101	362	11,3	ND	12,0	11,3
MEIP102	377	23,1	ND	18,0	18,7
MEIP103	390	6,1	ND	24,1	20,0
MDIP301	366	16,5	ND	18,2	17,1
MDIP302	380	22,3	ND	21,2	22,3
MDIP303	393	9,2	ND	27,0	25,6

ND = dados não disponibilizados devido a discrepância dos resultados

4 CONCLUSÕES

Durante a fase de projeto de uma barragem, é importante avaliar o comportamento geotécnico dos diferentes tipos de solos que serão utilizados em sua construção e da fundação, bem como o modelo constitutivo que melhor represente as características principais desses

solos. A partir dessa avaliação, devem ser especificados os ensaios geotécnicos e sobre que condições de drenagem e de tensão confinante esses devem ser realizados, afim de se permitir a obtenção de todos os parâmetros de calibração necessários para a implementação do modelo constitutivo adotado. Isso é particularmente importante no caso de materiais

não convencionais, como o “cascalho de terraço”, utilizado nas barragens de terra da UHE São Simão.

Com relação aos resultados utilizando-se os parâmetros de calibração obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, esses foram aceitáveis até meia altura da barragem, entretanto os resultados próximos a crista das barragens foram superiores aos obtidos pela instrumentação. As três justificativas possíveis para esse fato são: o solo nessa região encontra-se mais rígido que o esperado; uma possível intervenção no processo construtivo, com o objetivo de fazer uma compensação dos recalques; e, por fim, que os deslocamentos mensurados pela instrumentação correspondem, na realidade, somente ao período após a instalação desse, o que faz com que os recalques anteriores sejam desprezados.

Os resultados obtidos por meio dos parâmetros sugeridos por Duncan *et al.* (1980), foram mais coerentes com os dados da instrumentação, uma vez que por meio de tentativas, escolheu-se conjuntos de parâmetros cujos resultados foram mais satisfatórios, mostrando assim a aplicabilidade do modelo hiperbólico. Entretanto ressalta-se, que os parâmetros obtidos na literatura devem ser utilizados apenas na fase de estudo e pré-dimensionamento do projeto, uma vez que para o projeto executivo deve-se trabalhar com os parâmetros obtidos em ensaios geotécnicos realizados nos diferentes tipos de solo que serão utilizados na barragem, bem como o solo de fundação. Porém, mesmo para as análises em que foram utilizados os parâmetros sugeridos por Duncan *et al.* (1980), os recalques na crista da barragem continuaram superiores aos dados da instrumentação.

Com relação ao solo de fundação, esse apresentou-se bem menos rígido que o sugerido por IESA (1980), mostrando claramente, que em análises de tensão-deformação, deve-se evitar a consideração de que solo de fundação das barragens sejam indeformáveis.

Com relação à utilização dos ensaios triaxiais do tipo CU, o tempo despendido na construção da barragem foi de aproximadamente de dois anos, fazendo com que a instantaneidade dos acréscimos de tensões

verticais seja questionável. Outro fato questionável, é a condição de saturação do solo/barragem durante o período construtivo dessa. Caso o solo da barragem não esteja saturado, o valor do coeficiente de Poisson será diferente de 0,49 e haverá variação de volume.

Finalmente, embora os resultados numéricos não tenham apresentado uma correspondência satisfatória para toda a instrumentação instalada nas seções estudadas da UHE de São Simão, os fatores levantados de certa forma justificam os aspectos que possam ter comprometido os resultados, validando assim, a metodologia utilizada na modelagem numérica.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à CAPES (Coordenação para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior); à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo contínuo apoio financeiro, e à CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) pela cessão dos dados aqui publicados.

REFERÊNCIAS

- DESAI, C. S.; CHRISTIAN, John T. (1977). Numerical methods in geotechnical engineering. New York, (USA): McGraw-Hill.
- DUNCAN, J. M.; CHANG, C.Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1629-1653.
- DUNCAN, J. M., et. al. (1980). Strength, stress-strain, and bulk modulus parameters for finite element analyses of stress and movements in soil masses. Report No. UCB/GT/80-01, University of California, College of Engineering, Berkeley, California.
- IESA (1980). Relatório Final do Projeto São Simão. Estruturas de Terra e Enrocamento. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Relatório SS-RC-097, Volume 1.
- PEREIRA, Publio Reis (2014). Modelagem numérica do comportamento tensão-deformação de barragens de terra : estudo de caso da UHE de São Simão. 2014. xviii, 113 f., enc. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- VIOTTI, Cássio Baumgratz (1975). Instrumentação das fundações em São Simão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, X, Curitiba.