

Estudo Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento

Marínis Almeida

NUGEO - UFOP, Belo Horizonte, Brasil, marinis.almeida@hotmail.com

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil, saulogft@hotmail.com

RESUMO: A grande maioria das obras mais recentes de barragens tem sido bem instrumentada. Os instrumentos mais comuns instalados são piezômetros, inclinômetros, medidores de recalques e placas de tensão. A leitura e interpretação destes instrumentos trazem informações preciosas para avaliação das predições comportamentais da obra em sua fase construtiva e de operação. Obras reais e bem instrumentadas traduzem-se em grandes oportunidades para que os modelos constitutivos possam ser avaliados tanto em sua proposta comportamental quanto em relação aos parâmetros e as condições de contorno. O estudo em questão foi desenvolvido com base nos dados quantificados para o período construtivo da barragem de terra e enrocamento de Irapé – Cemig/MG, inaugurada em 2006. Tomando-se como base os resultados dos ensaios triaxiais desenvolvidos com material que compõe o núcleo argiloso da barragem, os parâmetros do modelo hiperbólico foram calculados para este material. Os demais parâmetros da barragem foram obtidos de trabalho antecessor (Aires, 2006) e que compõe esta linha de pesquisa do Núcleo de Geotecnia da UFOP. Assim, por meio do sistema computacional GeoStudio 2007, módulo Sigma, um estudo tensão deformação do período construtivo da barragem de Irapé foi desenvolvido para seção de maior altura, localizada próxima ao eixo longitudinal da barragem. Os resultados do estudo numérico foram então comparados com os dados coletados pelos instrumentos instalados no núcleo da barragem, mais especificamente: inclinômetro, células de pressão vertical e horizontal, caixas suecas, medidores de recalques elétricos e magnéticos. Os resultados numéricos mostraram boa predição das tensões e valores superiores para predição dos recalques na modelagem, hiperbólica.

PALAVRAS-CHAVE: barragem, tensão-deformação, elementos-finitos.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta os estudos desenvolvidos na dissertação de mestrado do NUGEO intitulada Estudo Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento, Almeida 2010. O qual estudou o comportamento tensão versus deformação de uma barragem, durante sua construção via métodos numéricos. O sistema computacional adotado foi o GeoStudio 2007, módulo Sigma (Geo-Slope International Ltd.). Para utilizar esse programa, é necessária a escolha do modelo constitutivo que represente as características do solo a ser estudado, os modelos utilizados foram o elasto-plástico e o

hiperbólico, este, especificamente para o material composto do núcleo denominado “cascalho”.

Os parâmetros do modelo hiperbólico utilizados no programa Sigma foram determinados através de ensaios de laboratório de compressão triaxial drenados e não drenados, pela aplicação da metodologia desenvolvida por Duncan e Chang (1970).

Alguns instrumentos de auscultação da barragem de Irapé foram selecionados para avaliar os resultados da simulação numérica desenvolvida pelo programa Sigma. Assim, foi possível avaliar o comportamento da modelagem das tensões totais horizontais e

verticais desenvolvidas no maciço do núcleo da barragem e dos recalques sofridos durante a execução dos alteamentos, período construtivo.

2 ESTUDO TENSÃO DEFORMAÇÃO

Uma vez que, estudos de estabilidade comprovem satisfatoriamente que um solo não romperá, deve-se estimar o grau de deformação que se produzirá ao aplicar cargas e se essa deformação é admissível. Por isso é importante obter a relação tensão-deformação de um solo.

Os solos que compõem o maciço compactado de uma barragem, os enrocamentos e os materiais de fundação sofrem deformações em função das tensões aplicadas seguindo leis próprias e particulares, para explicar esse comportamento faz-se uso aproximado das teorias da elasticidade e plasticidade e aos modelos reológicos.

A mobilização da resistência, a possível geração de pressões neutras, a ocorrência de trincas e a potencialidade à formação de planos causadores de ruptura hidráulica dependem fundamentalmente das variações volumétricas que ocorrem e, portanto, o interesse de definir deslocamentos admissíveis é muito mais abrangente do que os convencionais cálculos de estabilidade por equilíbrio limite. Assim, os estudos de tensões e deformações são importantes.

2.1 Módulos de Deformabilidade

Segundo Lambe e Whitman (1970) o módulo de deformabilidade não é um valor constante de um solo, pois descreve aproximadamente o comportamento de um solo para uma combinação particular de tensões.

Ao falar de módulo de deformabilidade deve-se definir o que se entende por tal. O módulo tangente é a inclinação de uma reta traçada tangente à curva tensão-deformação em um ponto particular (Figura 1), que varia de acordo com o ponto escolhido. O módulo secante é a inclinação de uma reta que une dois pontos diferentes da curva. Este varia de acordo com a localização dos pontos escolhidos.

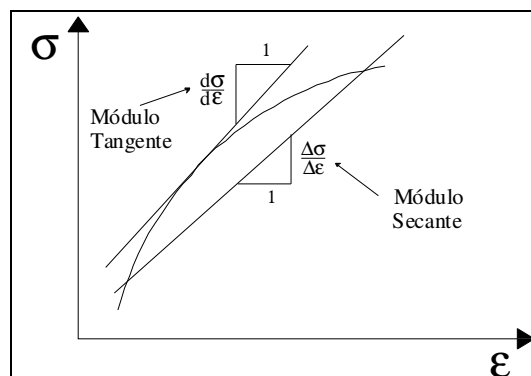


Figura 1. Determinação dos módulos tangente e secante.

Os parâmetros de compressibilidade dos solos são obtidos a partir de ensaios de laboratório, tais como compressão uniaxial, compressão isotrópica, compressão oedométrica e compressão triaxial.

2.2 Recalque

À medida que se constrói uma barragem de terra e enrocamento os recalques vão se desenvolvendo, recalque da fundação, recalque do maciço e recalques diferenciais entre as seções transversais da barragem. Os recalques devem ser previstos na fase de projeto e minimizados de acordo com as características do aterro e dos procedimentos construtivos para que seus efeitos não comprometam o comportamento da barragem e nem sua segurança.

Os recalques da fundação e do aterro compactado terão seu reflexo na sobrelevação da crista da barragem, enquanto que os recalques diferenciais poderão implicar trincas pelo corpo da barragem. Em vales estreitos trincas poderão se desenvolver devido à tendência do núcleo arquear entre as duas paredes do cânion de acordo com Silveira (2006).

Assim, as medições de recalque em barragens de terra e enrocamento devem ser incluídas no plano de instrumentação, com enfoque no período construtivo para supervisionar as condições de segurança.

De acordo com a literatura sabe-se que o máximo deslocamento ocorre próximo à meia altura da barragem, devido a uma combinação favorável entre a camada subjacente e a pressão devida ao aterro sobrejacente. As camadas

inferiores são de menor espessura e recalcam menos embora sujeitas a elevadas pressões verticais. Já no trecho superior as pressões são pequenas, apesar da grande espessura acumulada, e os recalques são também menores.

Segundo Cruz (1996) os recalques de fundações de barragens calculados pela clássica teoria do adensamento são muito superiores (de duas a seis vezes maiores) aos recalques efetivamente observados nas barragens (por exemplo, Ilha Solteira e Itumbiara). Dessa forma só devem ser considerados como indicativos de tendências de deslocamento. Concluindo que cálculos por métodos numéricos podem ser mais precisos, dependendo dos parâmetros de entrada e da qualidade da informação disponível.

2.3 Modelo Hiperbólico

Modelos constitutivos são formulações matemáticas que objetivam modelar o comportamento reológico dos materiais. A precisão com que determinado modelo constitutivo se assemelha ao comportamento do material depende do número de parâmetros que se introduz na sua equação constitutiva, buscando-se um equilíbrio entre o número de parâmetros e a precisão desejada.

O modelo hiperbólico é originalmente atribuído a Kondner (1963), mais tarde foi muito estudado e modificado por Duncan e Chang (1970) através da publicação intitulada “Nonlinear analysis of stress and strain in soil”. Devido a isso o modelo hiperbólico também é conhecido como modelo Duncan e Chang.

Este modelo simula a não-linearidade do comportamento tensão-deformação do solo e a sua dependência do nível de tensões. Nas condições comportamentais do material de campo em que o modelo hiperbólico se adéqua, pode-se dizer que é vantajoso usar este modelo, seja por sua simplicidade, seja pelo fato da obtenção dos parâmetros serem por meio de ensaio triaxial.

3 A BARRAGEM DE IRAPÉ

O aproveitamento hidrelétrico de Irapé (UHE

Irapé) encontra-se situado no norte de Minas Gerais, na região do Rio Jequitinhonha. Esta é uma barragem zonada com seção em enrocamento e núcleo argiloso.

A construção da Barragem de Irapé começou no ano de 2002. O enchimento do reservatório foi iniciado em 2005. Irapé é a maior barragem em altura do Brasil e a segunda da América do Sul, com 208 metros de altura e 551 metros de comprimento total. O reservatório apresenta o nível de água mínimo normal na elevação 470,8m; o nível de água máximo normal na elevação 510,0m; e o nível de água máximo maximorum na cota 512,20m.

A seção modelada é uma simplificação da seção real da barragem sem perder a representatividade de cada material, pois muitos materiais apresentam características geotécnicas semelhantes. Os sete materiais constituintes do modelo numérico estão indicados na Tabela 1. Os filtros e as transições foram representados apenas por um material; os enrocamentos de proteção, de revestimento e lançado foram excluídos e representados por um único enrocamento (6). Finalizando, o núcleo central foi representado por dois materiais o chamado “cascalho” (3B) e o solo argilo-arenoso (J1).

A Figura 2 apresenta a seção transversal simplificada da barragem de Irapé.

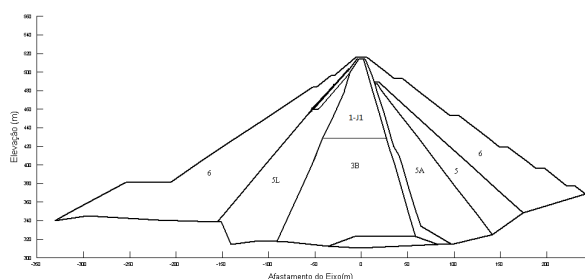


Figura 2. Seção transversal modelada numericamente.

Tabela 1. Materiais constituintes da modelagem.

Sigla do Material	Descrição
1-J1	Solo argilo-arenoso proveniente da jazida 1
2	Filtros e Transições
3 B	“Cascalho”
5	Enrocamento de Rocha pouco a medianamente decomposta
5 A	Enrocamento de Rocha medianamente a muito decomposta
5 L	“Random”
6	Enrocamento de Rocha pouco decomposta a sã

O material denominado “cascalho” juntamente com duas outras argilas, constituem o núcleo da barragem de Irapé. Segundo Furnas (2004), o cascalho é uma mistura entre um solo areno-argiloso (J2) com um cascalho.

O principal objetivo de se utilizar a mistura de argila e cascalho no núcleo é empregar um material mais rígido nas porções mais inferiores do núcleo, de forma a gerar menores recalques e ao mesmo tempo apresentar características de baixa permeabilidade. A Figura 3 apresenta a faixa de distribuição granulométrica do material cascalho (3B).

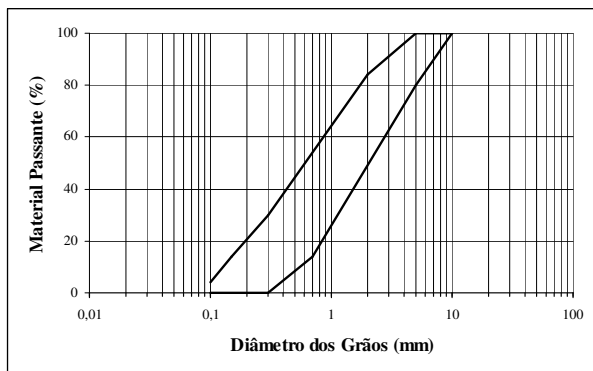


Figura 3. Distribuição granulométrica para o material “cascalho” (3B).

A Figura 4 representa a curva tensão deformação do ensaio triaxial adensado não drenado para o material cascalho da barragem de Irapé. As confinantes do ensaio são 100, 300, 600, 900 e 1200 kPa. A Figura 5 mostra o digrama p' versus q para o ensaio mencionado.

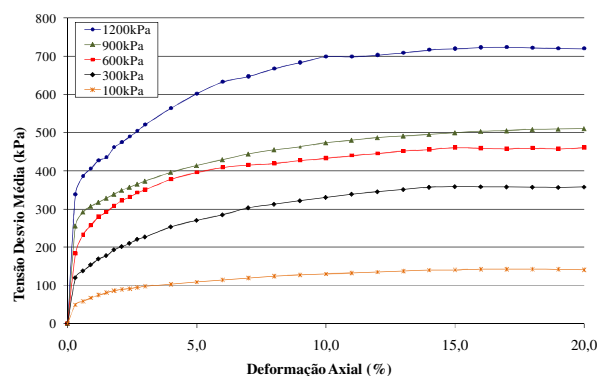
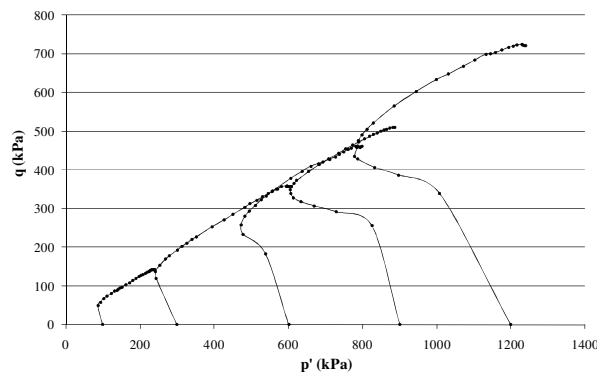


Figura 4. Curvas tensão deformação para o cascalho.

Figura 5. Diagrama p' versus q do cascalho.

Os parâmetros hiperbólicos do cascalho foram obtidos seguindo a metodologia de Duncan e Chang (1970), por meio do ensaio de compressão triaxial adensado não drenado, representado pelas Figuras 4 a 6. Os valores dos parâmetros hiperbólicos obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros hiperbólicos para o “cascalho”.

c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	k	n	$R_f^{(*)}$	K_0
10	35	21,5	163	0,87	1,0	0,5

Os parâmetros geotécnicos para os solos constituintes da modelagem numérica da barragem de Irapé são apresentados na Tabela 3. Esses parâmetros estão aqui reproduzidos com base em Aires (2004) e foram baseados em ensaios triaxiais e na bibliografia especializada.

Tabela 3 - Parâmetros geotécnicos para os materiais.

Material	E (MPa)	n	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1-J1	35	0,30	20,0	10	34
Cascalho	Variável	0,33	21,5	10	35
Filtros	110	0,30	19,0	0	45
5	75	0,25	21,5	0	40
5A	90	0,25	22,5	0	39
5L	90	0,25	21,0	0	35
6	75	0,25	22,0	0	45

A Figura 6 apresenta a função empregada para o módulo de deformabilidade do cascalho.

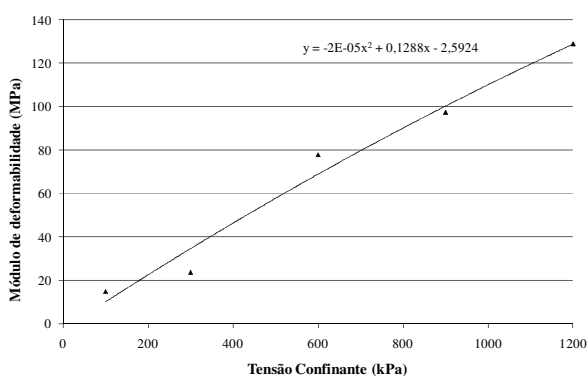


Figura 6. Função para o E_{50} do solo cascalho.

4 SIMULAÇÕES PARA O FINAL DE CONSTRUÇÃO

Este item apresenta simulações para o final da construção da barragem com o emprego dos modelos constitutivos linear-elástico, elasto-plástico e hiperbólico. Os resultados analisados foram recalques, tensões totais verticais e tensões totais horizontais.

Geralmente, no núcleo da barragem as tensões verticais estão aliviadas e a concentração de tensões nas zonas de transição é marcante (Maranha das Neves, 1991).

Os recalques máximos sofridos para os diferentes modelos foram de 1,6m para o modelo linear-elástico; 1,8m para o modelo elasto-plástico e 2,2m para o modelo hiperbólico. Os recalques máximos ocorreram entre as cotas 400 e 420 metros, região central do núcleo.

A Figura 7 apresenta a configuração para os recalques calculados por meio do modelo hiperbólico.

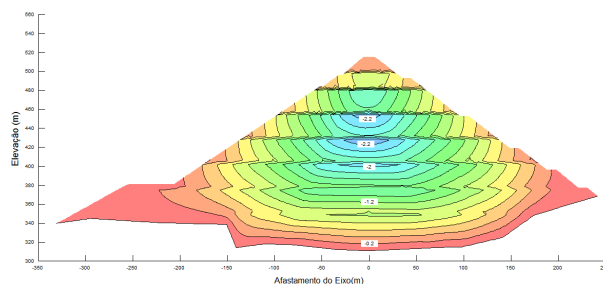


Figura 7. Recalque para o modelo hiperbólico para o cascalho.

A Figura 8 e 9 mostram as tensões totais verticais se horizontais para o modelo hiperbólico. Ao analisar o conteúdo destas figuras verifica-se que as tensões se concentram nas zonas de filtro e transição dos materiais, ou seja, ocorre o fenômeno conhecido como arqueamento.

Este comportamento era previsto, pois o filtro e o enrocamento 5L apresentam maior rigidez que o núcleo da barragem.

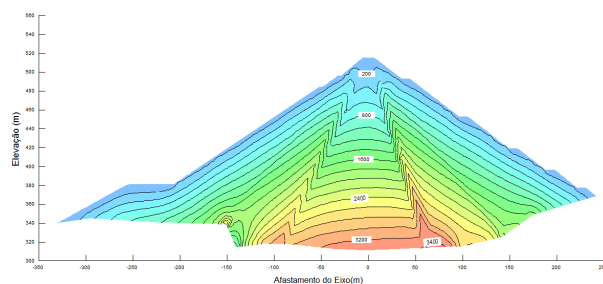


Figura 8. Tensões totais verticais para o modelo hiperbólico.

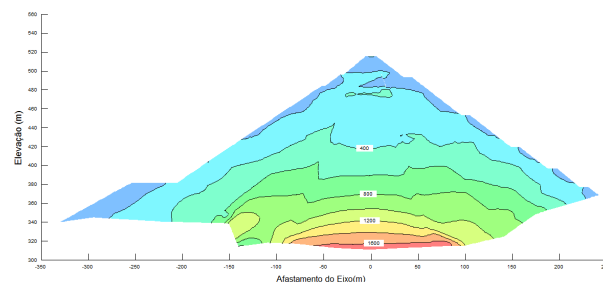


Figura 9. Tensões totais horizontais para o modelo hiperbólico.

5 COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS DE CAMPO E NUMÉRICOS

Neste item serão apresentados gráficos comparativos entre os valores das tensões e dos recalques representativos dos dados fornecidos pela instrumentação durante o período de construção da barragem, e as simulações do programa empregando os modelos: linear-elástico (LE), elasto-plástico (EP) e o hiperbólico (HP). O banco de dados da instrumentação disponível é até a elevação 482m.

Para o estudo comparativo foram usadas as leituras de treze instrumentos, mas nem todos serão representados em forma gráfica. Os instrumentos são:

- Célula de Pressão CP-309 para avaliar a tensão total horizontal;
- Células de Pressão CP-301, CP-302, CP-304, CP-306 e CP-308 para avaliar a tensão total vertical;
- Placas de Recalque Magnético RM-302, RM-304, RM-306, RM-307 e RM-308 para avaliar recalque;
- Caixa Sueca CS-301 e CS-305 para avaliar recalque.

O instrumento CP-309 localiza-se na elevação 421m, a meia altura do núcleo, afastado 26m do eixo da barragem e a aproximadamente 11m do filtro. Este instrumento foi escolhido por estar no local de concentração de tensões, onde o arqueamento foi detectado.

De acordo com o comportamento observado na Figura 10, o modelo elasto-plástico apresentou até a leitura da elevação do aterro na cota 480m, um comportamento mais próximo daquele verificado para as leituras do instrumento. Os outros modelos apresentaram comportamento semelhante, porém diferencial em relação ao instrumento a partir de elevação 460m. Nestes modelos, o aumento da tensão horizontal mostrou-se “inibido” a partir desta elevação.

No final de construção os resultados mostram que a tensão horizontal igual a 400kPa, no eixo da barragem, ocorre na elevação 380, 410, e 420m, para os modelos linear-elástico, hiperbólico e elasto-plástico, respectivamente. Este comportamento sugere maior alívio de tensão horizontal no núcleo, em função do maior arqueamento nos filtros e

transições, para o modelo elasto-plástico, seguido do modelo hiperbólico e linear-elástico.

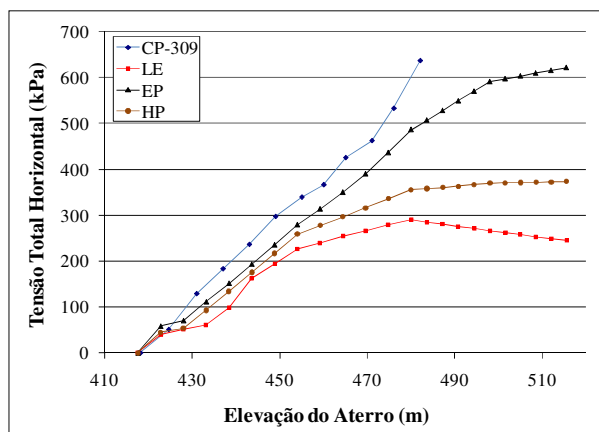


Figura 10. Tensões totais horizontais dos modelos e instrumento CP-309.

O instrumento CP-301 está instalado no eixo da barragem na cota 329 m, muito próximo da fundação. A Figura 11 apresenta o estudo comparativo entre as tensões de campo e as da simulação numérica para esse instrumento. A partir desta Figura, nota-se que, as tensões das simulações foram iguais às do instrumento até a cota 415m do aterro. Essa cota coincide com o início da compactação do solo 1-J1. Este solo tem rigidez bem inferior a do filtro e transições, ou seja, a partir desta elevação tem-se o início do arqueamento e em consequência, os incrementos de tensão vertical não acompanham linearmente o aumento da altura do aterro compactado. Os resultados numéricos mostraram comportamento bastante semelhante dentre os modelos adotados.

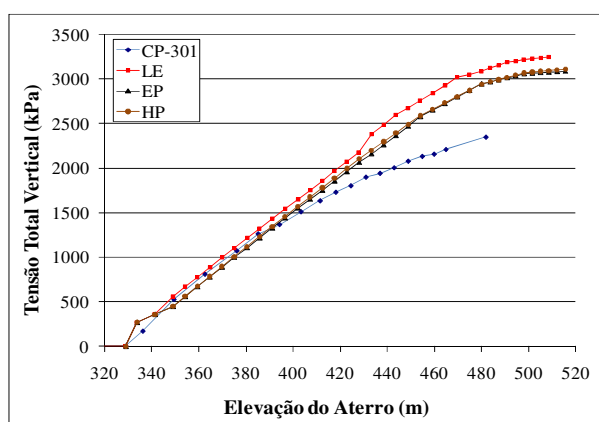


Figura 11. Tensões totais verticais dos modelos e instrumento CP-301.

A Figura 12 mostra as tensões verticais do instrumento CP-302. Este instrumento está instalado no eixo da barragem na cota 355m, 26 metros acima do instrumento CP-301. O comportamento deste estudo é divergente daqueles observados nos instrumentos anteriores. Neste caso, as tensões de campo mostram-se superiores àquelas quantificadas pelos modelos.

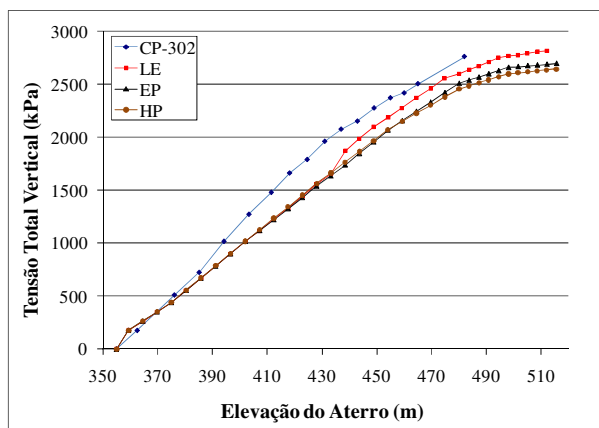


Figura 12 - Tensões totais verticais dos modelos e instrumento CP-302.

Para o estudo dos recalques, foram selecionados sete instrumentos, os instrumentos RM estão instalados no eixo da barragem e as cotas dos instrumentos são: RM-302 cota 355m, RM-304 cota 385m, RM-306 cota 421m, RM-307 cota 440m e RM-308 cota 460m. Assim, este estudo se estendeu a quase todo o eixo da barragem. As caixas suecas estão instaladas no enrocamento. O instrumento CS-301 está a 67m do eixo da barragem, na cota 367m e o CS-305 está a 57m do eixo da barragem, na cota 400m. Ambos os instrumentos estão próximos da transição.

A Tabela 4 mostra um resumo dos recalques calculados pelos modelos e os recalques aferidos pelos instrumentos para a elevação do aterro na altura de 482 metros.

Comparando-se então o comportamento médio dos modelos com os valores quantificados em campo, como mencionado anteriormente, pode-se verificar que os instrumentos localizados abaixo da meia altura da barragem apresentam recalques de campo inferiores aos recalques calculados numericamente. Este comportamento sugere

que o módulo de deformabilidade de campo seja superior ao aplicado nos modelos.

Oportunamente, notifica-se que, exceto para o cascalho, os demais materiais foram modelados com módulos de deformabilidade constantes. Como se sabe, os módulos tendem a aumentar com o aumento do nível de tensão confinante. Assim, uma modelagem mais adequada deveria contemplar este efeito em todos os materiais da barragem. No caso em questão, o aumento do módulo de deformabilidade em função do nível de tensão levaria os modelos a apresentarem recalques menores na região inferior e maiores na superior da barragem, ajustando-se melhor às condições verificadas em campo.

Tabela 4 - Recalques dos instrumentos e modelos para a cota 482 metros.

Instrumento	Campo (m)	LE (m)	EP (m)	HP (m)
RM-302	0,59	0,79	0,76	0,91
RM-304	0,86	1,07	1,05	1,34
RM-306	1,29	1,25	1,20	1,45
RM-307	1,45	0,97	1,00	1,21
RM-308	1,10	0,64	0,64	0,91
CS-301	0,77	0,98	0,96	1,04
CS-305	0,75	1,22	1,19	1,31

Como previamente comentado para ilustrar o comparativo dos recalques entre instrumentos e modelagem apresenta-se as Figuras 13 e 14. Ao analisar estas figuras o comportamento na região central do núcleo, próximo à interface entre os solos cascalho e J1, mostra-se muito bem ajustado, com diferenças relativas entre os modelos.

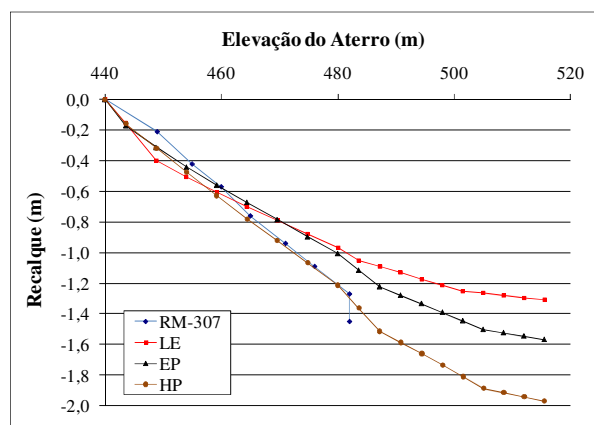


Figura 13 - Recalques dos modelos e instrumento RM-307.

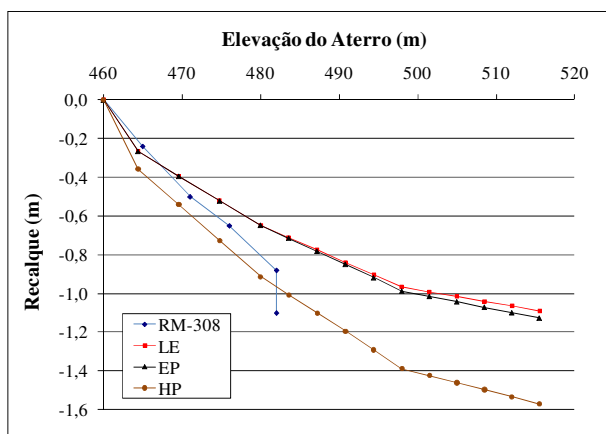


Figura 14 - Recalques dos modelos e instrumento RM-308.

6 CONCLUSÕES

O uso de modelos numéricos possibilitou avaliar o comportamento do material não convencional, “cascalho” (3B), utilizado na barragem de Irapé. Esse material mostrou-se extremamente rígido, com pequenas deformações durante a construção. O maior recalque apresentado pelos instrumentos foi 1,45m. Esse valor máximo de recalque representa 0,2% da altura máxima da barragem.

Como um todo, os resultados dos recalques e tensões horizontais e verticais para o final da construção os modelos linear elástico e elasto-plástico foram os que forneceram melhores resultados.

A primeira análise é para a comparação das tensões totais horizontais entre os resultados da célula de pressão 309 com as simulações dos modelos pelo programa Sigma. As curvas das simulações não foram muito satisfatórias, embora a curva do modelo elasto-plástico se aproxima da curva do instrumento.

A segunda análise é para a comparação das tensões totais verticais em cinco instrumentos posicionados no eixo da barragem e em cotas diferentes. As curvas apresentaram uma adequação entre os valores das simulações para todos os três modelos usados com os valores dos instrumentos. Isso é comprovado para as cinco células de pressão. Assim, os parâmetros que definem as tensões verticais foram bem definidos para a barragem como um todo pelos três modelos adotados.

Em geral, o estudo comparativo para os recalques não foi muito bom. As simulações computacionais apresentaram recalques maiores que os observados em campo. O que comprova que o material cascalho possui uma rigidez maior que a obtida pelo ensaio triaxial. Mas, pode-se destacar o modelo elasto-plástico que apresentou uma razão média de 8% maior que os recalques de campo. Finalmente, pode-se indicar o modelo elasto-plástico com o uso da função E50 como o mais indicado para os estudos tensão deformação de uma barragem. Isso por ser o modelo que mais aproximou-se dos resultados de campo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao NUGEO da UFOP e ao professor Saulo Gutemberg.

REFERÊNCIAS

- Aires, A.D.B., (2006). *Estudo Tensão Deformação da Barragem de Irapé - Dissertação de Mestrado – NUGEO/UFOP.*
- Almeida, M. M., (2010). *Estudo Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento – Dissertação de Mestrado NUGEO/UFOP.*
- Cruz, P., (1996). *Cem Grandes Barragens Brasileiras: Casos Históricos, materiais de construção e projetos. Oficina de Textos, São Paulo-Brasil.*
- Duncan, J.M. e Chang, C.Y. (1970). *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM5, pp 1629-1653.*
- Furnas (2004). *Relatório DCT.T.08.033.2004-R0 – CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais – Consórcio Construtor Irapé –Civil – UHE Irapé – Relatório Informativo do Controle Tecnológico.*
- Kondner, R.L. (1963). *Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, pp 115-143.*
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1970). *Soil Mechanics. Editora John Wiley & sons, New York.*
- Maranha das Neves, E. (1991). *Static behaviour of earth rockfill dams. Advances in Rockfill Structures. NATO ASI Series E. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.*
- Silveira, J.F.A. (2006). *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo, Oficina de Textos.*