



ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA BARRAGEM DE MONTESINHO DURANTE A SUA CONSTRUÇÃO

João Marcelino*

Investigador Principal
com Habilitação
LNEC
Lisboa
marcelino@lnec.pt

André Serrano

LNEC/IST
Lisboa

João Manso

Bolseiro de Doutoramento
LNEC
Lisboa
jmanso@lnec.pt

Laura Caldeira

Investigadora
Coordenadora
LNEC
Lisboa
laurac@lnec.pt

José Paixão

ATMAD
Administrador
Vila Real
j.paixao@atmad.pt

SUMÁRIO

Este trabalho descreve a preparação um modelo tridimensional de elementos finitos (FEM), desenvolvido em Code-Aster, utilizado para modelar a construção da barragem de Montesinho. Trata-se de uma barragem de enrocamento com membrana de betão a montante (CFRD) com uma altura de aterro de 36,5 m. Localiza-se no norte de Portugal, perto da fronteira com Espanha, e a sua construção decorreu durante o desenvolvimento deste trabalho, estando neste momento a terminar. A barragem localiza-se no rio Sabor e encontra-se inserida na Reserva Natural de Montesinho tendo como principal função fornecer água à cidade de Bragança. Esta obra visa reforçar a capacidade existente na barragem de Serra Serrada, localizada a cerca de 3 km a Oeste da barragem de Montesinho, que se tem mostrado como insuficiente para fornecer água à população de Bragança durante o ano. Dada a importância e sensibilidade da Reserva Natural de Montesinho o dono de obra – ATMAD (Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro) – tomou medidas especiais de mitigação de riscos ambientais.

O Code-Aster é um programa de elementos finitos de utilização genérica desenvolvido pela Eléctricité de France (EDF) para o projeto e manutenção das centrais eléctricas e da rede eléctrica da EDF. Em 2001 a EDF decidiu tornar a utilização do Code-Aster pública, sob a Licença Pública Geral GNU. A partir desse momento tem estado em desenvolvimento constante fazendo com que este software seja capaz de tratar uma vasta gama de fenómenos. O programa é escrito em linguagem Fortran e Python, tendo mais de 1,5 milhões de linhas de código.

Neste estudo desenvolveu-se um modelo de elementos finitos para simular o processo construtivo da barragem, tendo-se adotado um modelo de Drucker-Prager para modelar o comportamento do material enrocamento. Os parâmetros do modelo foram calibrados com base em ensaios triaxiais de grandes dimensões realizados sobre os materiais

usados na construção da barragem. O faseamento construtivo foi simulado no modelo, tendo os resultados numéricos concordado com os assentamentos do aterro registados in situ, indicando assim que este tipo de modelação pode ser aplicada na análise de deformações de uma barragem CFRD.

Palavras-chave: Barragem, CFRD, enrocamento, FEM, Open Source

1 INTRODUÇÃO

A modelação da construção de barragens de aterro realiza-se geralmente através de programas comerciais de elementos finitos ou, em casos específicos com código desenvolvido especificamente para esse fim. Cada abordagem tem as suas vantagens e desvantagens. Os programas comerciais do MEF são normalmente desenvolvidos para garantir simplicidade, facilidade de utilização e o rápido desenvolvimento de modelos permitindo obter resultados usando apenas uma quantidade limitada de experiência em geotecnia e do próprio programa. Outra importante característica de programas comerciais de elementos finitos é o seu custo (podendo atingir por vezes valores entre os 10 e 30 mil euros) e o seu modelo de licença é de código fechado, não permitindo qualquer ou muito pouca personalização ou introdução de características específicas. Porém, se forem utilizados com precaução, estes programas podem ser bastante úteis para empresas de projeto ou empreiteiros dado que normalmente o tempo para estudos e desenvolvimento de modelos é limitado. Por outro lado, como esses programas são simples e focados para aplicação de modelos genéricos, normalmente não incluem algumas necessidades especiais que certas estruturas necessitam. Este é o caso do estudo de barragens de enrocamento onde a variedade de fenómenos e a complexidade de modelos pode ser considerável. Por exemplo, para simular a construção de uma barragem de aterro é necessário especial atenção para considerar corretamente a sua deformação. Por vezes o uso de programas personalizados pode fornecer uma boa solução para essas soluções. Por exemplo, Marcelino [1] desenvolveu internamente um código eficiente para modelar os fenómenos, tanto de colapso como de fluência, em enrocamento usando uma abordagem viscoelastoplasticidade. O código conseguia modelar a fase de construção e de primeiro enchimento do reservatório, mas encontrava-se limitado às análises em estado plano de deformação.

A EDF, uma importante empresa francesa, cujo principal negócio se relaciona com a produção de eletricidade, desenvolveu internamente durante anos um código FEM que se adaptava às suas necessidades. O seu desenvolvimento começou em 1988 com o objetivo de ser aplicável a todos os problemas especiais da empresa. Em 1994 foram apresentados os primeiros trabalhos de doutoramento utilizando cálculos realizados com Code-Aster (<http://www.code-aster.org/V2/spip.php?article806>). Em 2001, a EDF decidiu distribuir o programa e o código para o público em geral sob o modelo de licenciamento GNU de Richard Stallman (www.gnu.org). Isto permitiu que o código fosse testado por utilizadores em todo o mundo, enquanto era ativamente desenvolvido para incorporar algum do *feedback* recebido. Em 2007, foi apresentado um pacote especial – Salome Meca – tornando-o mais acessível e aumentando o seu campo de aplicação. Ao mesmo tempo o Code-Aster ficou preparado para processamento paralelo, tanto para computadores com multi-processadores como para clusters de computadores, aumentando as capacidades de computação em várias ordens de grandeza quando comparadas com as atualmente disponíveis em computadores pessoais. Como o Code-Aster e o Salome Meca estão disponíveis no modo de licença GNU são ambos de uso livre, livres de estudar e livres de modificar [2]. Em suma, o Code-Aster é um programa de elementos finitos de uso genérico, preparado para

resolver modelos 1D/2D/3D de fenómenos mecânicos, térmicos e hidráulicos. O programa inclui vários tipos de modelos de carregamento, modelos de materiais não lineares (incluindo Cam-Clay, *CJS* e modelo de Barcelona para solos), não linearidades em geometria, interações para fluido-estrutura ou solo-fluido-estrutura, cerca de 400 tipos de elementos finitos diferentes incluindo fronteiras absorventes especiais, etc. Todas estas características do Code-Aster permitiram aos autores desenvolverem as ferramentas necessárias para criar o modelo 3D e estudar a barragem de enrocamento atualmente em construção.

As barragens de enrocamento com cortina a montante (*CFRD*) são um tipo importante de barragens de enrocamento, cujas estruturas consistem numa camada de amortecimento, numa camada de transição, numa camada de enrocamento principal e de zonas de enrocamento secundárias. Devido à boa adaptabilidade à topografia, geologia e clima, uso de materiais disponíveis localmente, custo-benefício, simplicidade de construção e período de construção reduzido, este tipo de estrutura tem sido repetidamente construído nas últimas décadas e em alguns casos com alturas superiores a 200 m (Quadro 1).

Quadro 1 - As mais altas CFRD do mundo

Nome da barragem	Altura	Data de abertura	País
Shuibuya	233 m	2008	China
Bakun	205 m	2011	Malásia
Aguamilpa	187 m	1993	México
Pubugou	186 m	2010	China
Sanbanxi	185.6 m	2006	China
Barra Grande	185 m	2005	Brasil
Hongjiadu	179.5 m	2005	China
Tankeng	162 m	2008	China
Foz do Areia	160 m	1980	Brasil

As maiores preocupações em relação ao projeto e operação deste tipo de estruturas relacionam-se com as deformações de certas zonas do enrocamento e com as tensões na membrana de betão e nas suas juntas. Os métodos numéricos, como o método de elementos finitos, podem ser utilizados para prever a deformação da barragem durante a sua construção e exploração. Porém, a confiança nos resultados dos modelos adotados depende principalmente da sua capacidade de simular materiais de enrocamento e da capacidade de se obter parâmetros representativos desses materiais. Vários métodos têm sido adotados para modelar enrocamento. O modelo não linear de Duncan–Chang E–B [3] tem sido extensivamente aplicado para modelar a construção de *CFRD* devido à sua simplicidade e clareza de significado físico dos seus parâmetros. Xing et al. [4] estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de enrocamento durante a colocação e compactação de três barragens diferentes. As tensões e as deformações das barragens foram avaliadas usando um modelo de elementos finitos bidimensional, onde implementaram o modelo hiperbólico não linear Duncan–Chang E–B e compararam com resultados *in situ*. Zhou et al. [5] também aplicaram este modelo para analisar as deformações registadas através da monitorização contínua da barragem *CFRD* de Shuibuya. Realizaram uma retro-análise para determinar parâmetros com base nas deformações utilizando algoritmos genéricos híbridos (*HGA*), permitindo a previsão da deformação a longo prazo da barragem. As simulações foram realizadas em condições de deformação plana bidimensional, considerando a deformação dependente do tempo, do processo construtivo e do armazenamento de água. Eles mostraram que a taxa de assentamento diminui com o tempo, tendendo a

estabilizar, e também que o módulo de deformação do material era menor que o módulo obtido através dos ensaios laboratoriais correspondentes.

Li e Desai [6] desenvolveram um procedimento de elementos finitos para a análise tensão-deformação de barragens, incluindo a construção sequencial do aterro, análise de percolação (incluindo a superfície livre transitória e em regime permanente), e uma combinação de ambos. Para o comportamento mecânico foram usados modelos elásticos lineares, não lineares ou elásticos lineares por troços (hiperbólico) e de plasticidade (Drucker-Prager). Para fazer a análise de percolação e de tensões utilizaram a mesma malha tendo também feito a sobreposição dos dois efeitos. Garantindo as condições adequadas, foi possível incorporar os efeitos da saturação parcial durante a construção e incluir as alterações na geometria da barragem durante o processo de deformação. Este procedimento forneceu correlações satisfatórias com as soluções analíticas e as observações *in situ*.

Xu et al. [7] modificaram o modelo de plasticidade generalizada para areias, baseado no trabalho de Pastor et al. [8] e Ling and Liu [9], de modo a descrever melhor o comportamento de materiais de enrocamento, em particular a sua dependência ao confinamento devido à quebra de partículas. O modelo foi depois incorporado num modelo de elementos finitos tridimensional e foi feita a simulação do processo de construção e enchimento da barragem CFRD de Zipingpu, comparando os resultados numéricos com as medições *in situ*. Este procedimento numérico não considerou a deformação por fluência do enrocamento, nem a influência de partículas de grandes dimensões no comportamento e por isso pode ter subestimado a deformação da barragem e as tensões da membrana, em particular durante o período de operação do reservatório. Porém, estas subestimações foram compensadas com o uso de um enrocamento menos denso como processo de calibração dos parâmetros do modelo, devido às dimensões dos equipamentos laboratoriais.

Nos parágrafos seguintes descreve-se a modelação da barragem de Montesinho verificando-se que o apresenta resultados para a fase de construção que se encontram de acordo com o comportamento observado.

2 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DE MONTESINHO

A barragem de Montesinho localiza-se no rio Sabor, na reserva Natural de Montesinho. Trata-se de uma barragem CFRD construída para fornecer água à cidade de Bragança reforçando a atual reserva de água existente na barragem de Serra Serrada, localizada a aproximadamente 3 km a Oeste da barragem de Montesinho.

A barragem de Montesinho tem 36,5 m de altura e um coroamento com um comprimento de cerca de 310 m com 7 m de largura. O volume total do aterro é aproximadamente de 174 000 m³ e consiste em enrocamento de granito obtido em pedreiras localizadas a montante da barragem na área do reservatório.

O reservatório tem uma capacidade de 3,69 hm³ (volume útil de 3,53 hm³) com uma área inundada de 35,8 ha e uma bacia hidrográfica de 10,1 km². O nível de pleno armazenamento (NPA) localiza-se à cota 1217,50 m e o nível de máxima cheia à cota de 1219,73 m. A folga é de cerca de 1,37 m, e como tal o coroamento localiza-se à cota 1221,10 m. Os paramentos de montante e de jusante tinham originalmente um declive constante de 1:1,5 (v:h), porém, durante a construção decidiu-se incluir uma banqueteta no paramento de jusante.

Na área da barragem e do seu reservatório, os blocos que afloram à superfície e as camadas superficiais são constituídas essencialmente por granito de duas micas de grão grosseiro. A rocha apresenta uma caulinação dos feldspatos generalizada leve a média, e por isso por vezes as suas características mecânicas correspondem a um granito alterado (W3 e W4), com baixa resistência mecânica e baixo módulo de deformabilidade. A maiores profundidades a sua qualidade aumenta (W2 a W3).

Toda a extensão da fundação tem uma fina camada de solos soltos ou solo orgânico que foi removido antes da construção. As Figuras 1 e 2 apresentam a planta e um corte da barragem. Como se pode observar através das figuras, o vale é assimétrico com um declive médio de 1:6,5 (v:h) acima da cota 1200 m no encontro direito e de 1:2,6 (v:h) nos encontros direito e esquerdo abaixo dessa cota.

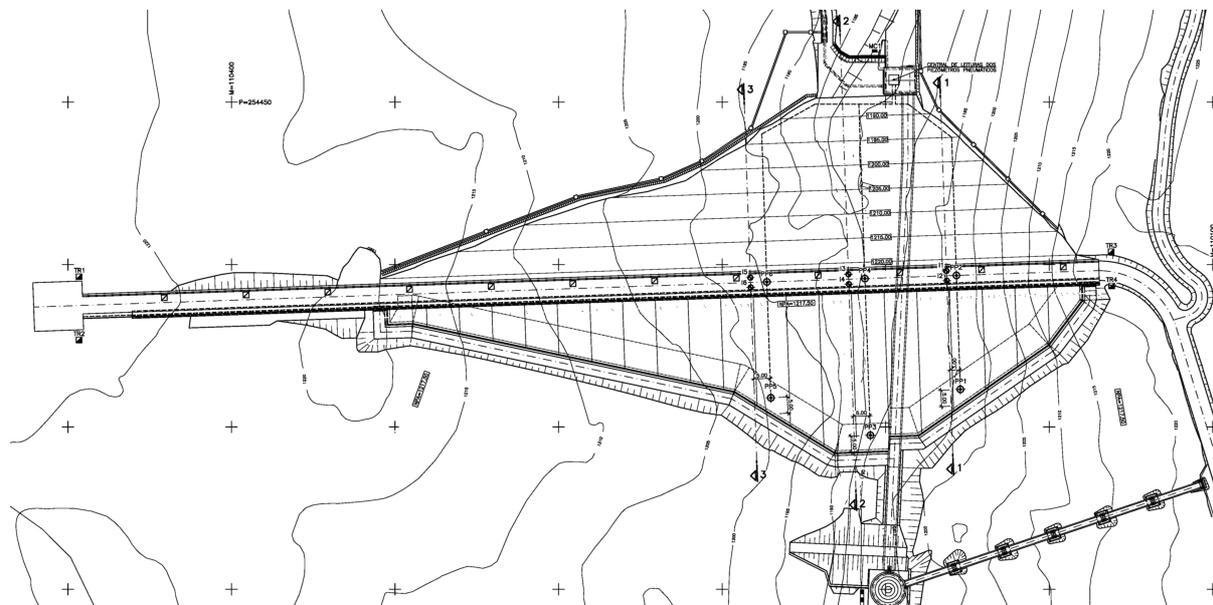


Figura 1. Planta da barragem Montesinho

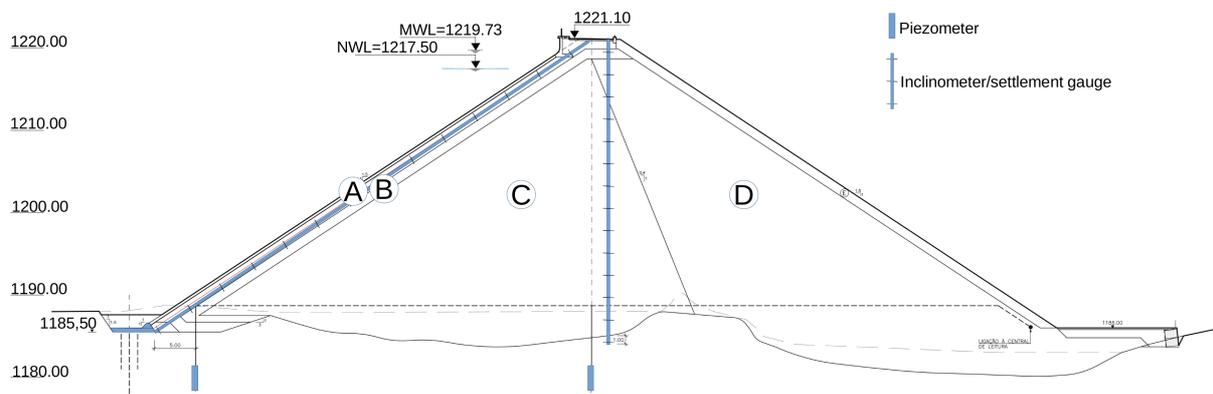


Figura 2. Disposição dos inclinómetros na secção 2-2 da barragem de Montesinho

3 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Foi desenvolvido um sistema de monitorização de deformação detalhado para registar as deformações na barragem de Montesinho. Os deslocamentos verticais e horizontais no interior da barragem são registados com inclinómetros/baterias de assentamento verticais distribuídos em três importantes secções: 1 – 1, 2 – 2 e 3 – 3, sendo a secção 2 – 2 a maior da barragem (Figura 2). As deformações da membrana de betão são medidas por três inclinómetros inclinados localizados na camada de amortecimento, nas mesmas secções: 1 – 1, 2 – 2 e 3 – 3. As deformações superficiais no coroamento da barragem são registadas

através de 12 pontos alvo, separados entre si de cerca de 25 m. As suas posições apresentam-se na Figura 1.

O sistema de monitorização inclui 3 conjuntos de 2 piezómetros na fundação da barragem. Em cada conjunto, o primeiro piezómetro localiza-se imediatamente a seguir à cortina de impermeabilização, enquanto que o segundo se localiza próximo do eixo da barragem. O propósito deste sistema é avaliar a eficiência da cortina de impermeabilização.

Finalmente, para complementar este sistema inclui-se um sistema de medição do caudal total da barragem, próximo da base a jusante. Durante a construção da barragem realizaram-se medições regulares dos assentamentos verticais internos e das pressões de água na fundação. Os resultados do primeiro apresentam-se a seguir e comparam-se com o modelo.

4 BREVE DESCRIÇÃO DO PROGRAMA CODE-ASTER E SALOME-MECA

O Salome-Meca é um programa que reúne várias ferramentas dedicadas ao método de elementos finitos. Reúne, entre outros, um módulo de geometria (Geom), um módulo de malha (Mesh), um editor de ficheiro de comandos (Eficas), um módulo de controlo dos modelos (Aster) e um módulo de pós-processamento (Paravis). O último módulo é uma derivação do conhecido programa de visualização Paraview, com filtros especiais de importação para processar resultados oriundos do módulo de Code-Aster. O Salome-Meca corre em qualquer distribuição moderna de Linux. Pode ser instalado diretamente usando pacotes binários pré-compilados ou compilados a partir da fonte.

O módulo Geom consiste num ambiente *CAD* orientado a objetos permitindo criar geometrias complexas e arbitrarias através do uso de primitivas geométricas, várias operações de transformação, manipulação booleana de objetos (corte, junção – e, ou), optimização de algoritmos, etc. O módulo é capaz de importar vários formatos de ficheiro, todos em padrão aberto. Como com todos os módulos no Salome-Meca a maior parte das características do módulo Geom pode ser obtidas por meio de programação usando a linguagem python (<https://www.python.org/>), permitindo a criação de geometrias extremamente complexas.

O módulo Mesh lê a geometria e cria uma malha de elementos finitos usando um dos algoritmos e métodos disponíveis. As malhas geradas podem ser hexaédricas, tetraédricas, triangulares e quadriláteras para geometrias 3D e 2D, respetivamente. Além disso o módulo Mesh admite a criação de sub-malhas permitindo refinar a densidade da malha e criar grupos de elementos, faces ou nós, especificando diferentes materiais e condições de fronteira. A Figura 3 mostra uma sessão de Salome-Meca no módulo Mesh, cuja malha se refere à barragem de Montesinho.

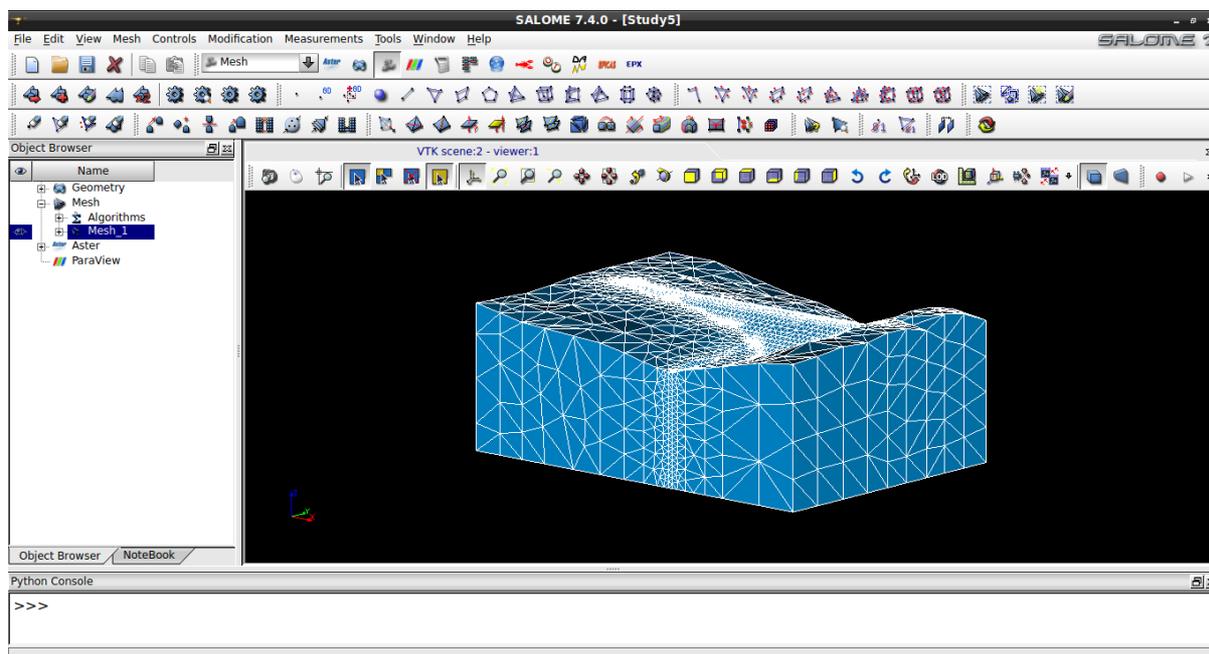


Figura 3. Ambiente de trabalho do programa Salome-Meca

O módulo Eficac dedica-se à criação do ficheiro que contém todos os comandos para a modelação Code-aster. Este módulo é relativamente complexo e requer um bom conhecimento do método de elementos finitos dado que permite especificar análises complexas e operações do modelo.

O módulo Aster é apenas uma interface gráfica para lançar os cálculos com *FEM*. Permite ao utilizador especificar a máquina onde irão correr os cálculos (local, remota ou cluster remoto), especificar o número de *cpus*, a alocação de memória e o tempo total de *cpu*.

Por fim, para ver os resultados obtidos o Salome-Meca usa o módulo Paravis. Este módulo deriva do programa ParaView sendo uma estrutura extensível e configurável usada para visualizar os dados de várias formas.

5 CONFIGURAÇÃO DO MODELO

5.1 Geometria, scripts e automatização

A geometria do modelo é feita em duas fases. A fundação é gerada a partir de um conjunto de blocos com uma base e topo triangulares. A superfície da fundação é obtida através de uma amostragem pontual, preferencialmente regular, da superfície da barragem. Esses pontos são submetidos a uma triangulação Delaunay criando o conjunto de blocos, que são depois fundidos em conjunto constituindo a geometria da fundação. Todo este processo é obtido através de um script escrito em python pelos autores. Caso seja necessário existe outra ferramenta que permite a geração da galeria da descarga de fundo. Por forma a minimizar os dados, a geometria da barragem é bastante parametrizada no script. O utilizador tem de especificar 2 pontos do coroamento (o bordo de montante) e todas as características relevantes da geometria da barragem: do coroamento, declives de montante e jusante, etc. A barragem é depois gerada como um sólido regular independente da fundação. Utilizando uma operação de corte booleana este bloco é depois cortado, ajustando a sua geometria à superfície “real” da fundação. Uma vez que as trajetórias de tensões e de deformações são relevantes para o comportamento de solos e de

enrocamento a construção da barragem tem de ser feita por camadas [7,10]. Por outro lado, para ter em conta a correta deformação da barragem a ser construída, a simulação da construção considera os deslocamentos das camadas pré-existentes mas não da que está a ser aplicada (que é espalhada e compactada). Como tal, o modelo da barragem também é dividido em camadas por meio de vários planos de corte, permitindo um número arbitrário de camadas definido pelo utilizador.

5.2 Malha de elementos finitos

A malha do modelo foi gerada utilizando o algoritmo mais simples existente no programa – Netgen [11] e adotadas todas as hipóteses existentes por defeito no módulo Mesh. No caso da análise da barragem de Montesinho a malha gerada era constituída por cerca de 17 000 nós e 83 000 elementos tetraédricos. Destes, cerca de 30 000 elementos correspondem às 15 camadas de aterro em que se modela a construção da barragem. Neste módulo é ainda aconselhável definir grupos de nós, faces e elementos, para permitir a imposição das condições de fronteira e sequência construtiva.

5.3 Modelação da construção da barragem

A modelação da construção da barragem é feita em camada não só por ser necessário ter em conta as deformações devidas à construção, mas também porque o comportamento do solo e do enrocamento depende das trajetórias de tensão (e deformação). Para considerar corretamente as deformações devidas à construção da barragem segue-se a proposta de Naylor, onde, como se disse, os deslocamentos da camada mais recente são anulados. Através deste método, quando a barragem é terminada, os deslocamentos no coroamento são nulos tal como na realidade, uma vez que a barragem é construída até à cota de projeto. A Figura 4 mostra a sequência construtiva real do aterro. Note-se que no modelo considerado, não foi ainda tida em consideração esta sequência (o modelo usado é independente do tempo). Em alternativa considerou-se uma taxa de construção constante.

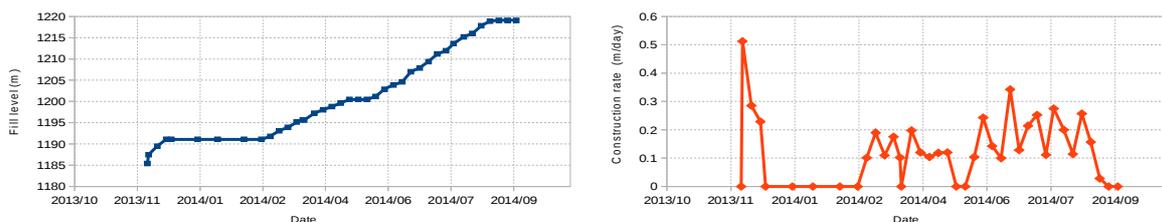


Figura 4. Taxa de construção (valores atuais)

6 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS

6.1 Material enrocamento

A maior dimensão das partículas de enrocamento empregues na construção da barragem foi de 800 mm, tornando assim impossível calibrar os parâmetros do modelo com base no material real em ensaios de laboratório. Para permitir o ensaio do enrocamento utilizando ensaios laboratoriais com dimensões correntes (edométrico e triaxiais) aplicou-se a técnica de granulometria paralela (ou *scalp-and-replace*). Esta

técnica utiliza o mesmo material que no protótipo, mas considera apenas as menores partículas, substituindo os blocos maiores por partículas de menores dimensões.

Existem alguns fatores que afetam aspetos do comportamento do enrocamento, tais como a resistência e a rigidez. Entre os vários fatores destacam-se a natureza dos minerais das partículas, o tamanho e a forma das partículas, o coeficiente de uniformidade (C_u), a densidade relativa, a trajetória de tensões, a presença de água, a granulometria e o efeito do tempo [12-17]. Alguns destes factores são tidos em conta através da aplicação da técnica de granulometria paralela e pela manutenção da forma dos grãos. Apesar de ser conhecida a influência das partículas de menores dimensões nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material [18], existem algumas dificuldades para quantificar a relação existente entre as dimensões das partículas e a resistência e a rigidez do enrocamento [15,16,19]. Alguns autores [15,16] mostraram que a rigidez empírica do enrocamento pode diminuir até 50 % caso a maior dimensão da partícula aumente dez vezes [20]. Pelo contrário, alguns estudos mostraram que amostras menos densas originam espécimes maior dilatância [21], o que pode levar a um pequeno aumento da rigidez global de uma barragem de enrocamento devido ao efeito de restrição existente no aterro. Tendo em consideração estes aspetos, as amostras selecionadas para calibrar os parâmetros do modelo apresentaram uma menor densidade. *In situ* o enrocamento apresentou um índice de vazios de 0,259 e uma densidade de 2,16 g/cm³ após compactação. Neste estudo, o índice de vazios do enrocamento ensaiado foi de 0,319, com uma densidade de 2,06 g/cm³. Este menor valor de índice de vazios resulta num menor valor de módulo de rigidez e resistência ao corte [22-23]. Reduz também a dilatância do enrocamento e contribui para a diminuição da rigidez global da barragem devido aos menores efeitos de restrição.

7 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o modelo e em estreita concordância com outros casos de barragens com as mesmas características, a barragem exhibe um baixo nível de deformações durante a construção do aterro. Comparando o modelo com os registos realizados *in situ* observa-se uma concordância de resultados.

A Figura 5 apresenta os registos referentes aos deslocamentos verticais internos obtidos através dos inclinómetros verticais. Os diagramas comparam os registos feitos *in situ* e os resultados obtidos numericamente. No caso do inclinómetro 13 (próximo da maior secção da barragem) apresentam-se resultados de dois cálculos diferentes. Um obteve-se através do modelo 3D, descrito neste artigo, e o outro obteve-se através de um modelo 2D, usando o mesmo conjunto de parâmetros.

Os valores observados mais recentes foram obtidos em Agosto de 2014, cerca de 2 metros antes de atingir a cota máxima do aterro. Atualmente está a ser construído o paramento de montante (membrana de betão) e apenas depois de terminado é que a campanha final de assentamentos estará disponível. O máximo assentamento expectável será de aproximadamente 25 +/- 5 mm.

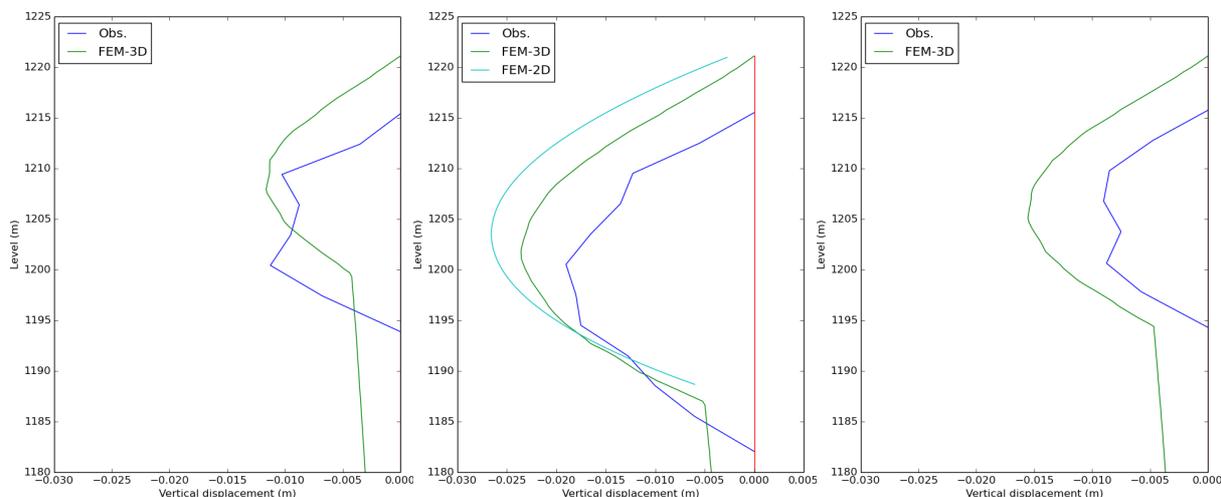


Figura 5. Assentamentos internos no perfil I1, I3 e I5 (valores atuais e calculados)

8 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este artigo apresenta um modelo de elementos finitos tridimensional desenvolvido para estudar a construção de uma barragem de enrocamento com cortina de betão a montante. Todos os recursos e ferramentas utilizadas estão disponíveis sobre a declaração de licenciamento *GNU*, portanto estão disponíveis gratuitamente. O modelo e o procedimento geral apresentam-se neste artigo e parecem estar de acordo com o comportamento registado na barragem, neste caso particular. Uma vez que a barragem ainda se encontra em construção, parte dos resultados obtidos servem também para calibração do modelo. Em particular, os assentamentos obtidos no modelo apresentam resultados concordantes com os valores registados pelo sistema de observação. O assentamento máximo registado até agora foi cerca de 2 cm, enquanto que no final da construção o modelo prevê que se encontre próximo dos 2,5 cm.

Finalmente, apesar de se terem obtidos bons resultados, o modelo e o procedimento geral utilizados nesta análise ainda estão em desenvolvimento e alguns melhoramentos são necessários, como a seguir se indicam:

- inclusão explícita da membrana de betão a montante usando elementos de casca;
- inclusão da descarga de fundo no modelo;
- implementação e teste de modelos reológicos mais completos (tais como os modelos de Cam-clay e de Barcelona);
- acoplamento do comportamento termo-hidromecânico.

REFERÊNCIAS

- [1] Marcelino, J. (1996) – “Modelação do colapso e da fluência em aterros”. Dissertação de doutoramento, FEUP Porto
- [2] Code_Aster Open Source - general FEA software - www.code-aster.org
- [3] Duncan JM, Chang CY. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. J Soil Mech Found Div, ASCE 1970;96(SM5):1629–53.
- [4] Xing Hao-Feng, Gong Xiao-Nan, Zhou Xiao-Guang, Fu Hai-Feng. Construction of concrete-faced rockfill dams with weak rocks. J Geotech Geoenviron Eng, ASCE 2006;132(6):778–85.
- [5] Zhou Wei, Hua Jun-Jie, Chang Xiao-Lin, Zhou Chuangbing. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam. Comput Geotech 2011;38(2):269–80.

- [6] G.C. Li, C.S. Desai. Stress and seepage analysis of earth dams. *J GE, Proc ASCE*, 103 (GT7) (1983), pp. 667–676.
- [7] NAYLOR, D. J., PANDE, G. N.; SIMPSON B. e TABB, R. (1981)- "Finite elements in geotechnical engineering". Pineridge Press, Swansea, U.K.
- [7] Xu, B., Zou, D., Liu, H. Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model. *Computers and Geotechnics* 43 (2012) 143–154.
- [8] Pastor M, Zienkiewicz OC, Chan AHC. Generalized plasticity and the modeling of soil behavior. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 1990;14(3):151–90.
- [9] Ling HI, Liu H. Pressure dependency and densification behavior of sand through a generalized plasticity model. *J Eng Mech, ASCE* 2003;129(8):851–60.
- [10] Naylor, D. J., Maranha das Neves, E., Mattar, D. Jr & Veiga Pinto, A. A. (1986). Prediction of construction performance of Beliche Dam. *Geotechnique* 36, No. 3, 359–376
- [11] Schoberl, Joachim (1997) . NETGEN. An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules. *Computing and Visualization in Science*. Springer-Verlag. pp 41-52
- [12] Gamboa, C. (2011). Mechanical behaviour of rockfill materials application to concrete face rockfill dams. PhD thesis.
- [13] Hardin, B. O. (1985). Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical and Engineering, ASCE*, 111(10):1177–1192.
- [14] Fumagalli E. Tests on cohesionless materials for rockfill dams. *J Soil Mech Found Div* 1969;95(1):313–32.
- [15] Frost RJ. Some testing experiences and characteristics of boulder-gravel fills in earth dams. STP 523:207. Philadelphia: ASTM; 1973.
- [16] Saboya F, Byrne PM. Parameters for stress and deformation analysis of rockfill dams. *Can Geotech J* 1993;30(4):690–701.
- [17] Hunter G, Fell R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. *J Geotech Geoenviron Eng, ASCE* 2003;129(10):909–17.
- [18] Einav, I. (2007). Breakage mechanics - Part I: Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6):1274–1297.
- [19] Alonso EE, Oldecop L, Pinyol NM. Long term behavior and size effects of coarse granular media. *Mech Nat Solids* 2009:255–81.
- [20] Barton N, Kjaernsli B. Shear strength of rockfill. *J Geotech Eng Div, ASCE* 1981;107(7):873–91.
- [21] Evans TM, Mojarrad H, Cunningham C, Tayebali AA. Grain size distribution effects in 2D discrete numerical experiments. In: *Geotechnical Special Publication No. 186: contemporary topics in situ testing, analysis, and reliability of foundation*, Reston, VA; 2009. p. 58–65.
- [22] Hardin BO, Drnevich V. Shear modulus and damping in soils. *J Soil Mech Found Div* 1972;98(7):667–92.
- [23] Kokusho T, Esashi Y. Cyclic triaxial test on sands and coarse materials. In: *Proceedings of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm, vol. 1; 1981. p. 673–6.a