

# MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIOS REALIZADOS NOS MATERIAIS DO ATERRO DA BARRAGEM DE ODELOUCA

## NUMERICAL MODELLING OF TESTS PERFORMED ON THE MATERIALS OF THE ODELOUCA EMBANKMENT DAM

Brito, Andrea; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal*, andreabrito@lnec.pt  
Maranha, João; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal*, jmaranha@lnec.pt  
Caldeira, Laura; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal*, laurac@lnec.pt

### RESUMO

A caracterização mecânica e hidráulica dos materiais da Barragem de Odelouca, efectuada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*), é utilizada para a calibração dos modelos constitutivos a utilizar na modelação numérica da barragem.

Assim, tendo como ponto de partida os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a construção da barragem, procede-se à verificação da adequação e à calibração de modelos constitutivos existentes para descrever o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais empregues no núcleo e das misturas de solo-enrocamento utilizadas nos maciços estabilizadores.

A Barragem de Odelouca localiza-se no conselho de Silves e implanta-se na Ribeira de Odelouca, principal afluente do Rio Arade. Trata-se de uma barragem de perfil zonado, com um núcleo central constituído por coluviões e por solo residual do xisto, e maciços estabilizadores constituídos por xistos e grauvaques ripáveis.

O programa explícito de diferenças finitas *FLAC* foi utilizado nas modelações numéricas. É feita uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo Cam-clay (já implementado no software utilizado) e os obtidos com um modelo elasto-plástico não convencional implementado para o efeito, designado por "sub-cedência", que descreve uma transição gradual entre o regime elástico e o elasto-plástico, para ambos os tipos de materiais colocados na barragem.

### ABSTRACT

The hydraulic and mechanical tests of the materials used in the Odelouca dam embankment, performed in the National Laboratory of Civil Engineering (*LNEC*), are used to calibrate the constitutive models to be used in the numerical modelling of the dam.

Taking as a starting point the results obtained in tests carried out during the dam's construction, this work proceeds to the calibration and verification of the adequacy of existing constitutive models in order to describe the mechanical and hydraulic behaviour of the materials used in the core (colluvial and residual schist soil) and soil and rock mixtures, used in the shells (weathered schist with a significant fraction of large sized particles).

The Odelouca Dam is located near Silves, in the Odelouca brook, the main tributary of the Arade River. It is a zoned dam with a core consisting of colluvial and residual schist soil and shells of weathered schist.

The explicit finite difference program *FLAC* was used in the numerical modelling. Results of the Cam Clay model (already implemented in the software) and of an unconventional elastoplastic model, the Subloading Surface model, which describes a gradual transition between the elastic and elastoplastic behaviour, are compared for both materials placed in the dam.

### 1 - INTRODUÇÃO

A barragem de Odelouca (ver Figura 1), construída recentemente no Algarve, é uma barragem de aterro zonada com um núcleo central constituído por coluviões e solo residual de xisto, e com maciços estabilizadores constituídos por xistos e grauvaques ripáveis. Tem cerca de 76 m de altura e o seu coroamento, com 11 m de largura, tem um comprimento de 415 m. A superfície inundada à cota de pleno armazenamento é da ordem dos 7,8 km<sup>2</sup>, a que corresponde um volume armazenado de cerca de 157 hm<sup>3</sup>.

Um dos grandes objectivos de um dos trabalhos de investigação que se está a realizar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*), é modelar o comportamento desta barragem na fase de construção e de primeiro enchimento. Para atingir esse fim, considerou-se pertinente, iniciar um processo de escolha

de leis constitutivas para descrever o comportamento dos materiais utilizados no aterro da Barragem de Odelouca. Os ensaios realizados até ao momento foram utilizados para a calibração dos modelos, isto é, a determinação das constantes do modelo material que permitem uma melhor reprodução dos resultados dos ensaios.

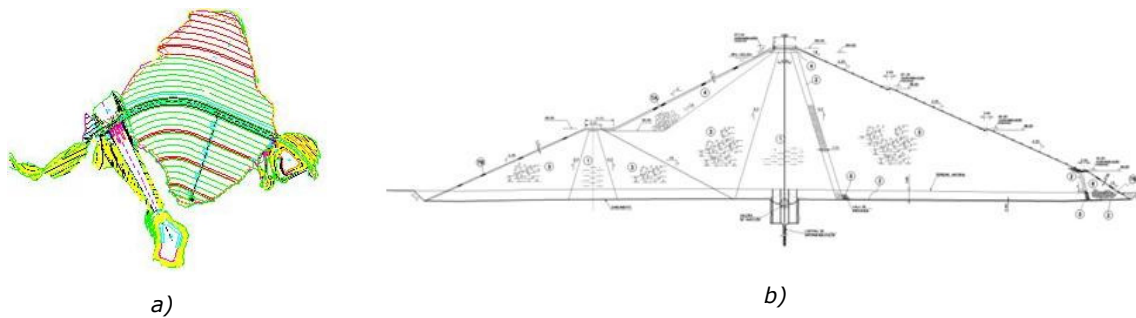


Figura 1 – a): Planta geral e b): Perfil tipo da Barragem de Odelouca

Assim, após a realização da interpretação dos ensaios realizados na fase de construção da barragem e de alguns dos ensaios que constavam no Programa de Trabalhos desta investigação, iniciou-se o processo de modelação matemática dos materiais do aterro.

São aqui modelados os ensaios de corte em compressão triaxial consolidados não drenados.

Na modelação dos ensaios utilizou-se o programa *FLAC*. Trata-se de um programa bidimensional de diferenças finitas explícito que permite simular o comportamento de estruturas geotécnicas e a incorporação de leis constitutivas pelos utilizadores. Este artigo apresenta alguns dos resultados obtidos.

## 2 - O MODELO ELASTOPLÁSTICO CAM CLAY MODIFICADO

### 2.1 - Breve descrição do modelo

Para representar o comportamento dos materiais da barragem de Odelouca, começou-se por aplicar o modelo Cam Clay modificado (Schofield & Wroth, 1968).

O modelo Cam Clay modificado é um modelo elastoplástico com endurecimento que incorpora, de uma maneira bastante simplificada, vários aspectos fundamentais do comportamento dos solos.

A função de cedência utilizada por este modelo, descreve uma elipse no espaço  $(p', q)$  que é dada pela seguinte equação:

$$f(\sigma) = f(p', q) = \left(\frac{q}{M}\right)^2 + p'(p' - p_c) = 0 \quad [1]$$

Sendo  $M$  o declive da linha dos estados críticos e  $p_c$  a tensão isotrópica de pré-consolidação.

Este modelo assume uma lei de fluxo associada, o que faz com que os incrementos de deformação plástica sejam ortogonais à superfície de cedência no espaço das tensões.

Outra particularidade deste modelo é que a lei de endurecimento é determinada exclusivamente pelo incremento da deformação volumétrica plástica, não existindo qualquer contribuição da componente distorcional da deformação plástica.

### 2.2 - Modelação de ensaios laboratoriais

O modelo Cam Clay modificado encontra-se implementado no programa *FLAC* de origem e foi utilizado para reproduzir um conjunto de três ensaios dos materiais do núcleo e um conjunto de três ensaios dos materiais dos maciços estabilizadores da barragem de Odelouca. Os ensaios realizados são ensaios de corte em compressão triaxial consolidados não drenados, consolidados isotropicamente para três níveis de tensão: 200, 400 e 800 kPa.

Nas Figura 2 e Figura 3 é possível comparar, respectivamente, para o material do núcleo e para o material dos maciços, os resultados obtidos nos ensaios com os do modelo cam Clay modificado. São representados o invariante da tensão deviatória,  $q$ , em função da deformação axial e as trajectórias de tensão efectiva.

Os valores da compressibilidade volumétrica elastoplástica,  $\lambda$ , e elástica,  $\kappa$ , dos materiais dos maciços estabilizadores foram obtidos através de ensaios de compressão isotrópica. No caso dos materiais do

núcleo, só foram efectuados até ao momento ensaios de deformação uniaxial (edométricos) em amostras não saturadas. Assumiu-se que o valor da compressibilidade volumétrica elástica,  $\kappa$ , não sofre alteração com a saturação. O valor de  $\lambda$  sofre uma redução com a saturação, devido ao desaparecimento das forças de natureza capilar, que não é possível quantificar. Sabendo que, neste modelo, o que determina o valor de  $q_{máx}$  em regime não drenado é a relação  $\kappa/\lambda$ , e que o valor desse rácio não deverá ser superior a 1/3, esse é o valor a que corresponde um  $q_{máx}$  mais elevado. Para se atingirem valores de  $q$  tão elevados quanto os observados nos ensaios teria sido necessário adoptar valores de  $\kappa/\lambda$  próximos da unidade o que não é realista, pois significa que a rigidez na carga seria igual à da descarga.

A comparação de resultados obtidos para o material do núcleo permite verificar que o modelo apresenta um comportamento mais rígido do que os materiais para deformações inferiores a cerca de 1 a 2% e um comportamento menos rígido do que o material a partir desses níveis de deformação. Além disso, é incapaz de reproduzir, convenientemente, a trajectória de tensões quando ocorre a sua inversão de direcção.

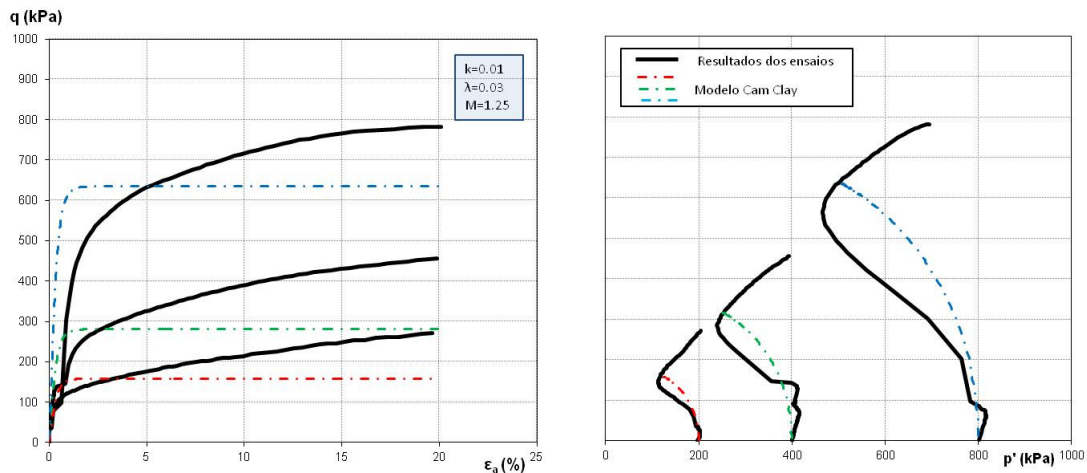


Figura 2 – Comparação de resultados obtidos nos ensaios de corte em compressão triaxial do material do núcleo da barragem com o modelo Cam Clay modificado

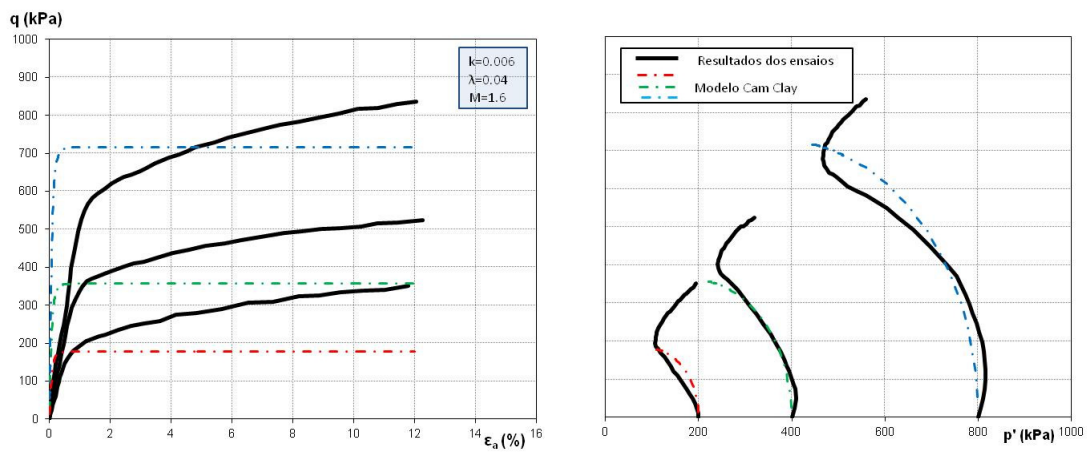


Figura 3 – Comparação de resultados obtidos nos ensaios de corte em compressão triaxial do material dos maciços estabilizadores da barragem com o modelo Cam Clay modificado

O mesmo tipo de comportamento do modelo é obtido nos materiais dos maciços estabilizadores, apresentando um comportamento mais rígido do que os materiais para deformações inferiores a cerca de 0,6, 1,1 e 4,6% (respectivamente, para a amostra consolidada com 200, 400 e 800 kPa de tensão de confinamento) e um comportamento menos rígido do que o material a partir desses níveis de deformação.

### 2.3 - Limitações do modelo

Os materiais ensaiados apresentam uma transição gradual do comportamento elástico para o elastoplástico e inversão da trajectória de tensões, conforme se pode constatar na Figura 2 e na Figura 3. O modelo Cam Clay é um modelo que apresenta uma transição brusca da rigidez do comportamento elástico para o comportamento elastoplástico, comportamento esse que poderá ser uma boa aproximação

ao comportamento normalmente consolidado, mas que se mostra pouco eficaz na reprodução do estado sobreconsolidado.

Assim, o próximo passo na modelação matemática consistiu na procura de um modelo que apresentasse uma transição do comportamento elástico para o elastoplástico mais gradual e controlável, permitindo assim uma melhoria na descrição do comportamento observado. Uma família de modelos com esta característica são os modelos de Sub-cedência.

### 3 - O MODELO ELASTOPLÁSTICO DE SUB-CEDÊNCIA

#### 3.1 - Breve descrição do modelo

O modelo elastoplástico de Sub-cedência (Hashiguchi & Ueno, 1977; Hashiguchi, 1980; 1989) é um modelo elastoplástico não convencional que expande a teoria da elastoplasticidade de um modo que o interior da superfície de cedência deixa de ser um domínio puramente elástico. Em vez disso, deformações plásticas podem ser induzidas pela variação da tensão no interior da superfície de cedência. Desta forma, a superfície de cedência convencional passa a ser conhecida como *superfície de cedência normal*.

Neste modelo, o processo evolutivo da superfície de cedência normal ocorre por endurecimento isotrópico e a superfície final, chamada de superfície de sub-cedência, é homotética da inicial, requerendo apenas uma variável escalar interna à sua definição ( $R$ - factor de escala da superfície de sub-cedência), como pode ser observado na Figura 4. O estado de tensão nula corresponde a  $R = 0$ , o estado sub-cedência a  $0 < R < 1$  e o estado de cedência normal a  $R = 1$ .

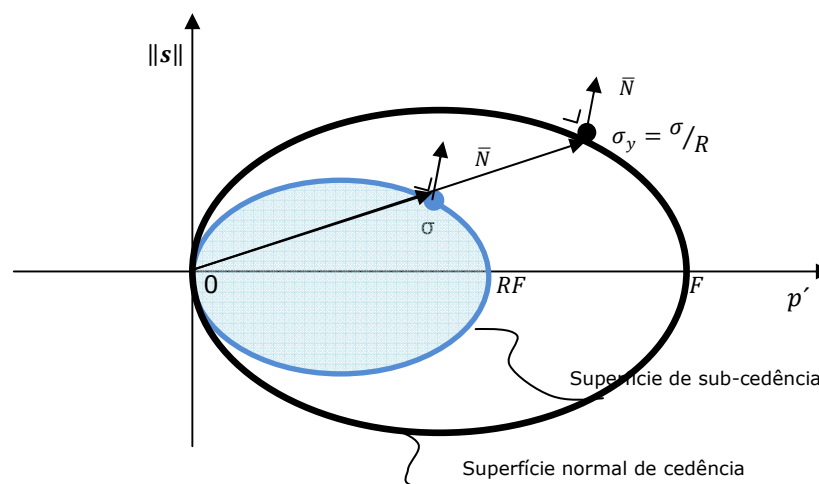


Figura 4 – Superfície normal de cedência e superfície de sub-cedência

A função de sub-cedência deste modelo, pode ser escrita através da expressão:

$$f(\sigma) = RF(H) \quad [2]$$

em que  $H$  é a variável escalar interna que controla o amolecimento/endurecimento isotrópico e  $F$  é a função de amolecimento/endurecimento isotrópico.

Esta expressão pode ser reescrita na forma do modelo Cam Clay (Roscoe e Burland, 1968) através de:

$$f(\sigma) = p(1 + \chi^2) = RF(H) \quad [3]$$

sendo

$$\chi = \frac{\|\eta\|}{m} \quad [4]$$

e

$$\eta = \frac{s}{p} \quad [5]$$

A equação da normal exterior da superfície do modelo de sub-cedência ( $\bar{N}$ ) é dada por:

$$\bar{N} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3}(1-\chi^2)^2 + \left(\frac{2\chi}{m}\right)^2}} - \left[ \frac{1}{3}(1-\chi^2)I + \frac{2}{m^2}\eta \right] \quad [6]$$

A lei de endurecimento é determinada por:

$$F(H) = F_0 e^{\left(\frac{H}{\lambda^* - k^*}\right)} \quad [3]$$

O modelo Sub-cedência necessita de seis parâmetros do material:  $\lambda^*$ ,  $k^*$ ,  $F_0$ ,  $\nu$ ,  $u$  e  $m$ .

Os parâmetros  $\lambda^*$  e  $k^*$  são determinados de maneira a se ajustarem, respectivamente, à inclinação da linha de compressão normal (LCN) e à linha de descarga/recarga elástica, obtidas em condições de tensão isotrópica numa representação bi-logarítmica ( $\ln v, \ln p'$ ), diferentemente dos parâmetros  $\lambda$  e  $k$  do modelo Cam Clay que são obtidos em representação semi-logarítmica ( $v, \ln p'$ ).

O valor  $F_0$  é a tensão média efectiva correspondente ao ponto inicial de transição entre a linha de descarga/recarga elástica e a linha de compressão normal e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

A constante do modelo material  $u$  é determinada de maneira a ajustar a evolução da rigidez com a deformação na transição entre o regime elástico e o elastoplástico. Quanto mais baixo for o valor deste parâmetro mais gradual será a transição entre os dois comportamentos. No limite, quando  $u$  tende para infinito, obtém-se a resposta elastoplástica tradicional, com uma descontinuidade na rigidez.

A constante,  $m$ , que define a inclinação da linha dos estados críticos no espaço ( $q, p'$ ) pode ser determinada a partir da razão de tensões no estado crítico medida em ensaios de corte em compressão triaxial. A constante  $m$  relaciona-se com a constante  $M$  do modelo Cam Clay Modificado através da expressão:

$$m = \sqrt{\frac{2}{3}} M \quad [7]$$

### 3.2 - Modelação de ensaios laboratoriais

O modelo de Sub-cedência descrito acima foi implementado no programa *FLAC* para reproduzir os mesmos ensaios para os valores de tensão na fase de consolidação isotrópica: 200, 400 e 800 kPa.

Na Figura 5 e na Figura 6 é possível comparar, respectivamente para os materiais do núcleo e para os materiais dos maciços estabilizadores, os resultados obtidos nos ensaios de corte triaxial com os obtidos na modelação matemática efectuada usando os modelos de Sub-cedência e Cam Clay modificado. São representadas curvas da tensão deviatórica,  $q$ , e as trajectórias de tensão efectiva.

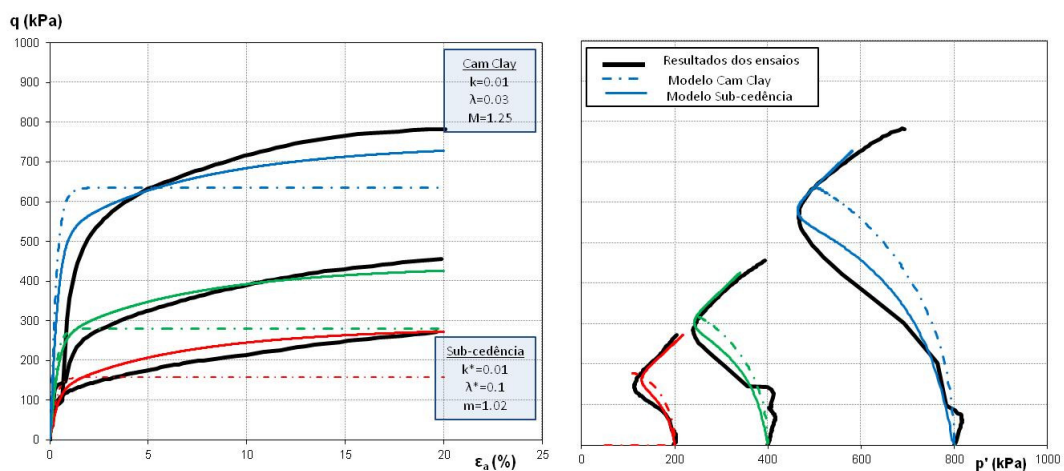


Figura 5 – Comparação de resultados obtidos nos ensaios de corte em compressão triaxial dos materiais do *núcleo da barragem*, com o modelo Sub-cedência e o modelo Cam Clay modificado

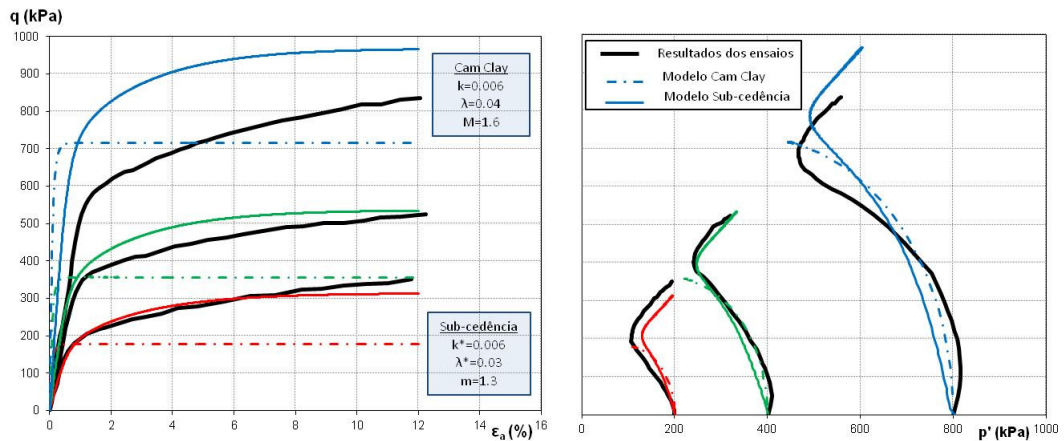


Figura 6 – Comparação de resultados obtidos nos ensaios de corte em compressão triaxial dos *materiais dos maciços estabilizadores* – conjunto de amostras 1, com o modelo Sub-cedência e o modelo Cam Clay modificado

Nos cálculos efectuados foi modelada também a fase de consolidação isotrópica que antecedeu o corte em compressão triaxial das amostras. Em todas as modelações efectuadas, considerou-se que o valor da tensão média efectiva inicial ( $p_0$ ), que traduz o efeito da sucção matricial presente na amostra no início do ensaio devido à compactação, seria o mesmo que para as amostras do mesmo material. Este facto não é relevante no caso das modelações efectuadas com o modelo Cam Clay modificado, no entanto poderá ser significativo nas modelações efectuadas com o modelo de Sub-cedência na medida em que, neste tipo de modelo, a superfície pode sofrer endurecimento antes mesmo de se atingir a superfície de cedência, o que não ocorre no caso do modelo Cam Clay modificado.

A observação das figuras permite concluir que o modelo de Sub-cedência é capaz de reproduzir convenientemente a trajectória de tensões, com destaque para a inversão na direcção. Verifica-se que existe um bom ajustamento no caso dos materiais do núcleo da barragem (Figura 5). Porém, o mesmo não sucede com o conjunto de amostras 1 dos materiais dos maciços estabilizadores (Figura 6). A aproximação é razoável para amostras consolidadas a tensões mais baixas, contudo, no caso da amostra consolidada à tensão de confinamento mais elevada (800 kPa) o material apresenta menor rigidez que o modelo. Existem, pelo menos três possibilidades para tal ocorrer:

1. Variabilidade do próprio material – o material foi recolhido à mesma cota da barragem e em zonas muito próximas, porém, tratando-se de uma mistura de solo-enrocamento, isso pode traduzir alguma variabilidade, pois as percentagens das diversas dimensões presentes em cada amostra poderão ser ligeiramente diferente;
2. A linha dos estados críticos poderá não ser uma linha recta com declive constante mas sim uma curva cujo declive diminui com o aumento de aumento de  $p'$ ;
3. A anisotropia plástica inicial do material e sua evolução com a tensão efectiva.

Optou-se por testar outro conjunto de amostras, colhidas a outra cota da barragem para verificar se esse comportamento também ocorreria. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7. Optou-se por escolher um conjunto de três amostras que apresentavam um coeficiente de determinação de cerca de  $R^2 = 0,996$  na obtenção da linha dos estados de pico, valor esse superior ao obtido com o conjunto de amostras 1 ( $R^2 = 0,953$ ) e que apresentavam um comportamento mais próximo.

Também neste conjunto de amostras se conseguiu obter uma aproximação do modelo melhor para as amostras consolidadas a menores tensões (200 e 400 kPa), tendo o modelo apresentado menor rigidez que o material (para elevadas taxas de deformação) nestas amostras e apresentado maior rigidez em todo o domínio da amostra consolidada à tensão de confinamento mais elevada (800 kPa). Este comportamento observado é contudo menos notório neste conjunto de amostras do que no conjunto de amostras 1. Com este conjunto de amostras seria possível obter uma melhor aproximação às duas amostras consolidadas a menores tensões mas isso implicaria que a diferença entre os resultados do modelo e da amostra consolidada à tensão de 800 kPa seria muito maior. Assim, optou-se por apresentar os resultados que melhor se ajustam ao conjunto das três amostras.

Presentemente está a ser averiguada a possibilidade da linha dos estados críticos não ser uma linha recta e a possibilidade da anisotropia do material ser significativa.

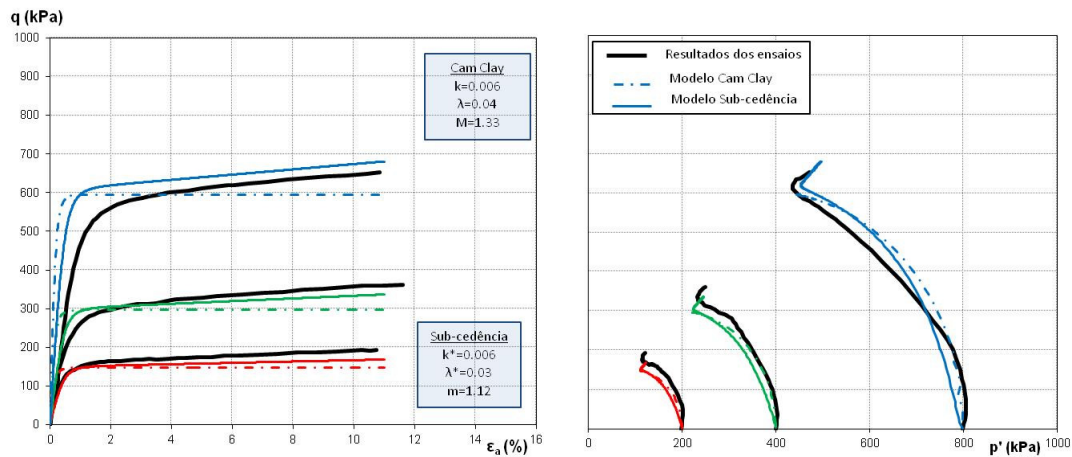


Figura 7 – Comparação de resultados obtidos entre os ensaios de corte triaxial dos materiais dos maciços estabilizadores – conjunto de amostras 2, o modelo Sub-cedência e o modelo Cam Clay

#### 4 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste artigo foram apresentados os resultados obtidos da modelação de alguns dos ensaios realizados com os materiais empregues no núcleo (coluviões e solo residual do xisto) e das misturas de solo-enrocamento, empregues nos maciços estabilizadores (xistos e grauaques ripáveis) da Barragem de Odelouca. Nesta modelação utilizou-se o programa explícito de diferenças finitas *FLAC*.

São comparados resultados obtidos com o modelo Cam Clay modificado (já existente no software utilizado) com os obtidos com um modelo elasto-plástico não convencional, modelo de Sub-cedência, que prevê uma transição gradual entre o regime elástico e o elasto-plástico, para ambos os materiais colocados na barragem.

Concluiu-se que o modelo Cam Clay não consegue reproduzir convenientemente o comportamento apresentado pelos materiais da barragem, ao contrário do modelo de Sub-cedência, que se mostrou eficaz na reprodução desse comportamento, nomeadamente na reprodução da trajectória de tensões quando ocorrem inversões na sua direcção.

Nas misturas de solo-enrocamento (dos maciços estabilizadores) não se conseguiu um bom ajustamento ao conjunto de três amostras consolidadas isotropicamente para três tensões efectivas distintas. Conseguiu-se um bom ajustamento para as amostras consolidadas a tensões mais baixas mas, e utilizando as mesmas constantes para a amostra consolidada a tensões mais elevadas, o modelo apresenta um comportamento mais rígido do que o material ensaiado o que pode denotar três situações: variabilidade do próprio material; a linha dos estados críticos não ser uma linha recta; ou a anisotropia plástica do material e a sua evolução com o estado de tensão ser significativa.

Como perspectivas futuras pretende-se avaliar o exposto no parágrafo anterior. Pretende-se também determinar, de uma forma mais consistente, qual a influência da tensão inicial, devido ao efeito da compactação das amostras, no tamanho da superfície inicial e na sucção matricial devida à não saturação da amostra.

Outro objectivo prende-se com a verificação da adequação do modelo também na reprodução de outros ensaios para os mesmos materiais, nomeadamente, ensaios de consolidação isotrópica e ensaios de deformação uniaxial.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Dono de Obra, Águas do Algarve S.A., a disponibilidade dos materiais para a realização dos ensaios experimentais. Gostariam também de agradecer aos técnicos do *LNEC*, em especial os Técnicos Superiores Sr. Joaquim Timóteo e Sr. Fernando Rodrigues e o Coordenador Técnico Sr. António Cardoso, pelo desenvolvimento do trabalho experimental.

## REFERÊNCIAS

- Hashiguchi, K. (1980). Constitutive equations of elastoplastic materials with elastic-plastic transition. *J.Appl. Mech. ASME* 47, No.2, 266-272.
- Hashiguchi, K. (1989). Subloading surface model in unconventional plasticity. *Int. J. Solids Struct.* 25. No.8, 917-945.
- Hashiguchi, K. e Ueno, M. (1977). Elastoplastic constitutive laws of granular materials. *Constitutive Equations of Soils. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Special Session 9, Tokyo, 73-82.*
- Roscoe, K.H. e Burland, J.B. (1968). On the generalized stress strain behaviour of wet clay . In *Engineering Plasticity*, eds. J.Heyman and F.A. Leckie, 535-609. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Schofield, A. E Wroth, P. (1968). *Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill. Londres.*