

# ANÁLISE NUMÉRICA DAS CAVERNAS PRINCIPAIS DO COMPLEXO HIDROELÉCTRICO DA VENDA NOVA II E RETROANÁLISE DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE VENDA NOVA II HYDROELECTRICAL COMPLEX MAIN CAVERNS AND BACKANALYSIS OF THE GEOMECHANICAL PARAMETERS

Miranda, Tiago, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, tmiranda@civil.uminho.pt*  
Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*  
Eclaircy-Caudron, Stéphanie, *INSA, Lyon, França, stephanie.eclaircy@insa-lyon.fr*  
Dias, Daniel, *INSA, Lyon, França, daniel.dias@insa-lyon.fr*  
Lima, Celso, *EDP-Produção, Porto, Portugal, celso.lima@em.edpproducao.edp.pt*  
Ribeiro e Sousa, Luís, *Universidade do Porto, Porto, Portugal, ribeiro.e.sousa@gmail.com*

### RESUMO

Neste trabalho é apresentado um modelo numérico 3D para as cavernas principais do complexo da Venda Nova II considerando as diferentes fases de escavação. Os parâmetros geomecânicos do maciço granítico, para os modelos, foram calculados utilizando o software GEOPAT. Este programa é um sistema baseado em conhecimento que permite obter os parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos. Os resultados do modelo são comparados com os deslocamentos observados por intermédio de extensómetros ao longo das várias fases construtivas. Nesta comparação são utilizadas diversas ferramentas estatísticas para a validação dos resultados obtidos. Finalmente, é realizada a retroanálise de parâmetros geomecânicos do maciço rochoso utilizando um algoritmo de optimização inovador. Os resultados obtidos permitiram concluir que a estimativa inicial dos parâmetros apresenta uma precisão bastante aceitável e que o algoritmo possui uma boa robustez e eficiência.

### ABSTRACT

In this work a 3D numerical model for the main caverns of the Venda Nova II complex which considers the different excavation stages is presented. The geomechanical parameters for the numerical models were computed using GEOPAT. This software is a knowledge based system which allows evaluating geomechanical parameters for the modelling of underground works built in granite rock masses. The results are compared with the observed displacements measured with extensometers along the different construction stages. In this comparison several statistical tools are used for the validation of the obtained results. Finally, the backanalysis of geomechanical parameters of the interested rock mass is performed using an innovative optimization algorithm. The results show that the initial evaluation of the parameters presents a very acceptable accuracy and that the algorithm possesses good robustness and efficiency.

### 1. INTRODUÇÃO

O complexo hidroeléctrico da Venda Nova II foi construído recentemente no Norte de Portugal com o objectivo de optimizar os recursos dos reservatórios criados pelas barragens de Venda Nova e Salamonde. O complexo é composto quase na sua totalidade por importantes obras subterrâneas, construídas num maciço predominantemente granítico de boa qualidade

geomecânica, incluindo vários túneis com um comprimento total de aproximadamente 7,5 km, poços inclinados e verticais com um comprimento total de 750 m e duas cavernas principais. Estas cavernas estão interligadas por duas galerias e foram escavadas a cerca de 350 m de profundidade (Figura 1). (Lima et al., 2002; Plasencia, 2003).



- |                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Albufeira da Venda Nova        | 7 – Túnel de restituição        |
| 2 – Tomada de água superior        | 8 – Caverna da central          |
| 3 – Tomada de água inferior        | 9 – Caverna dos transformadores |
| 4 – Chaminé de equilíbrio superior | 10 – Galerias de ventilação     |
| 5 – Chaminé de equilíbrio inferior | 11 – Túnel de acesso            |
| 6 – Túnel em carga                 | 12 – Túneis auxiliares          |

Figura 1 – Aproveitamento hidroelétrico da Venda Nova II (Lima et al., 2002).

Foi estabelecido um plano de monitorização para as estruturas subterrâneas, com especial relevância para o complexo da central. Nas cavernas da central, foram colocadas 5 a 7 marcas de convergência por secção e instalados 11 extensómetros de vara em duas secções ao longo do eixo das cavernas (Figura 2). Na caverna da central, os extensómetros foram colocados em duas secções, enquanto que, na caverna dos transformadores, foram instalados em apenas uma.

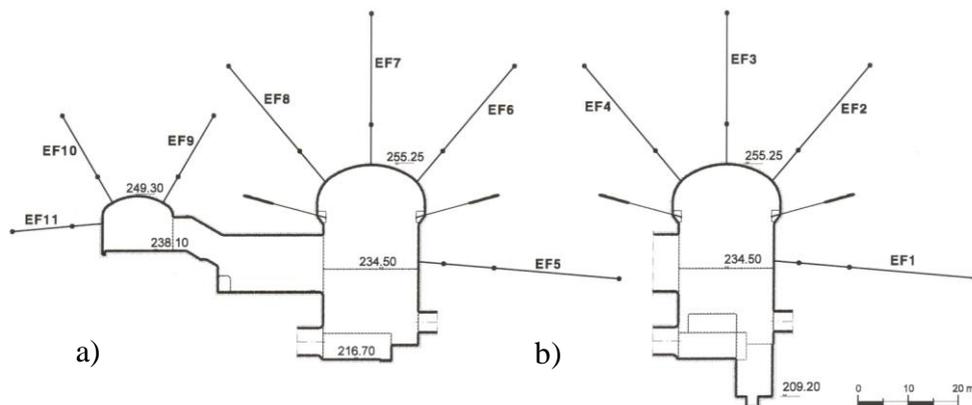


Figura 2 – Corte representativo do plano de monitorização.

O GEOPAT (Miranda, 2003) foi aplicado ao complexo da central utilizando os sistemas RMR e GSI. A informação disponível relativa ao parâmetro GSI indicava um valor médio de 65 mas com uma variabilidade considerável. Os valores obtidos para o RMR variaram, na maioria dos casos, entre 80 e 85. Baseado nesta informação e utilizando os resultados obtidos pelo GEOPAT determinaram-se os seguintes parâmetros geomecânicos:  $E = 45 \text{ GPa}$ ,  $\phi' = 54^\circ$  e  $c' = 4 \text{ MPa}$ .

Os ensaios *in situ* apontaram para um estado de tensão aproximadamente constante e caracterizado por uma tensão vertical proporcional ao peso do material acima do nível das cavernas. O valor de  $K_0$  determinado foi de 1 na direcção paralela ao eixo das cavernas e varia de 2 a 3 na direcção perpendicular. No modelo adoptou-se um valor inicial de 2.

## 2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS CAVERNAS DA CENTRAL

### 2.1. Modelos numéricos desenvolvidos

O modelo 3D foi desenvolvido utilizando o software FLAC3D (Itasca, 2005) de forma a simular a complexa geometria das cavernas da central e a sua sequência construtiva. A malha foi realizada utilizando o programa de geração de malhas 3DShop e é composta por 43930 zonas, 46715 pontos na malha e 1100 elementos estruturais (Figura 3). Como foi considerado um estado de tensão constante em torno das cavernas foi possível simplificar a malha de forma a aumentar o desempenho computacional. Assim, apesar dos 350 m de profundidade do eixo das cavernas, apenas foram modelados 200 m.

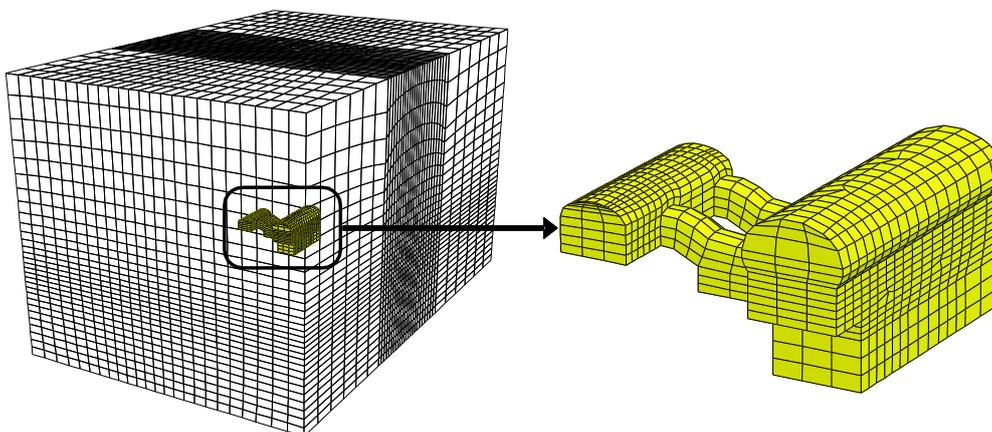


Figura 3 – Modelo 3D desenvolvido para as cavernas da central do complexo da Venda Nova II.

O betão projectado foi simulado através de elementos de casca com um modelo constitutivo elástico e isotrópico, com um módulo de Young de 15 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2. As pregagens foram simuladas através de elementos lineares de dois nós e um grau de liberdade axial. Para o maciço rochoso foi utilizado o modelo elástico-perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb.

Para o modelo numérico 3D a sequência construtiva foi simplificada relativamente à adoptada no projecto. No total, foram modeladas cinco macro-fases de escavação. Devido às boas características geomecânicas do maciço rochoso, o seu comportamento durante a escavação foi praticamente elástico. Assim, as simplificações consideradas para as fases de escavação tiveram um impacto reduzido nos resultados dos modelos.

### 2.2. Resultados obtidos

Devido ao elevado valor de  $K_0$  na direcção perpendicular ao eixo das cavernas e ao vão da parede vertical da caverna principal era expectável que os deslocamentos mais elevados se localizassem nessa área. A Figura 4 apresenta os contornos de deslocamentos calculados com o modelo 3D para a última fase de escavação. De facto, os deslocamentos mais elevados observam-se na parede da caverna principal, particularmente, entre as duas galerias de ligação.

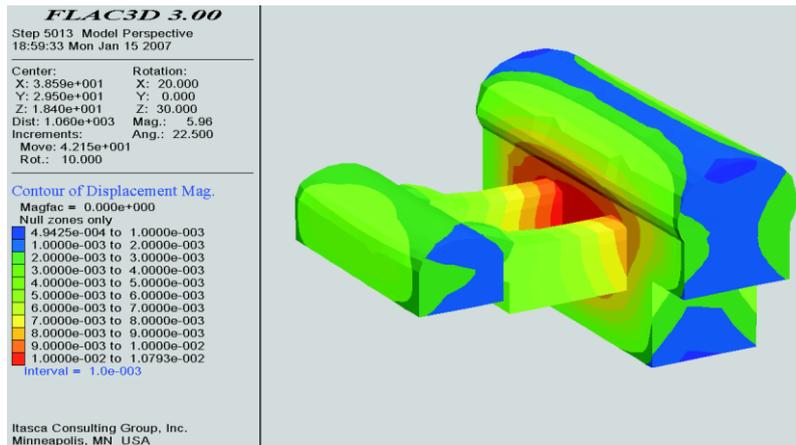


Figura 4 – Contornos de deslocamentos para a última fase de escavação.

Devido à boa qualidade global do maciço rochoso a magnitude de deslocamentos é pequena. Os deslocamentos máximos calculados no maciço rochoso foram de 10,5 mm. Para além disso, existe apenas um número reduzido de zonas em rotura que são confinadas a pequenas áreas junto ao arco e parede da caverna principal.

A Figura 5 compara os resultados dos modelos com as medições dos extensómetros 5 a 11 para a última fase de escavação. Nesta Figura apresentam-se também resultados de um modelo numérico 2D desenvolvido para a secção em análise (Miranda, 2007). Os resultados dos modelos 2D e 3D são bastante similares para a maioria dos extensómetros. Os valores calculados seguem a mesma tendência qualitativa dos valores da observação. Os piores resultados são observados para os extensómetros inclinados (2, 6 e 8) onde os valores dos deslocamentos são claramente sobreestimados. Nos casos restantes o modelo 3D é mais preciso no que concerne às medições dos extensómetros 5, 7 e 9 enquanto que o modelo 2D tem melhores resultados para os extensómetros 10 e 11. Numa perspectiva qualitativa pode ser concluído que, com excepção dos extensómetros 2, 6 e 8, os resultados dos modelos são bastante aceitáveis.

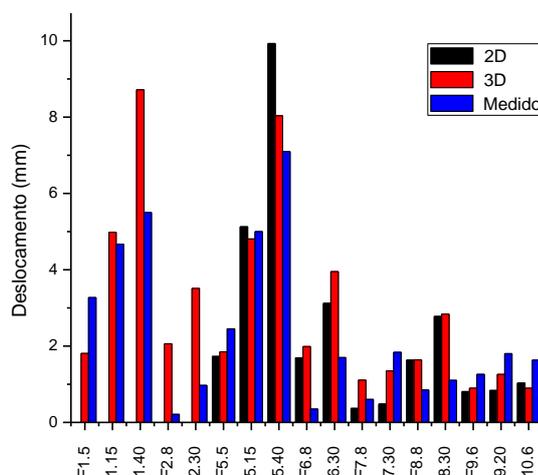


Figura 5 – Comparação entre deslocamentos medidos e calculados na última fase de escavação.

Para uma análise mais completa dos resultados procedeu-se a uma análise estatística dos deslocamentos observados e medidos considerando duas situações diferentes: a) comparação entre os resultados de ambos os modelos com as medições na secção de referência (extensómetros EF5 a EF11) e b) comparação entre os resultados do modelo 3D com todas as medições consideradas válidas (EF1 a EF11 com excepção de EF3 e EF4). O Quadro 1 apresenta os valores médios dos deslocamentos e o erro médio absoluto (EMA) para ambas as situações.

Quadro 1- Deslocamentos médios e erros para as situações a) e b).

	Situação a)			Situação b)	
	2D	3D	Medidos	3D	Medidos
-					
Desl. Médio (mm)	2,47	2,47	2,34	2,91	2,48
EMA* (mm)	-0,135	-0,136	-	-0,425	-

$$EMA^* = \sum_{i=1}^n (desl.calc. - desl.medido)$$

Pode ser observado do Quadro 2 que, em termos médios, os resultados dos modelos 2D e 3D são bastante semelhantes para a secção analisada apresentando o mesmo deslocamento médio e valores muito similares de EMA. Foi efectuado o teste-T no sentido de comparar os deslocamentos médios de cada cálculo com os valores reais correspondentes e concluiu-se que, para todas as situações, os valores médios calculados dos deslocamentos podem ser considerados estatisticamente semelhantes à média dos valores medidos para um nível de significância de 95%. O teste de Smirnov foi também realizado entre os valores calculados e medidos, tendo sido validada, para ambas as situações, a hipótese nula de que estes valores seguem a mesma distribuição estatística. Estes resultados apontam também, como havia acontecido para a análise qualitativa, para uma boa correspondência entre os resultados dos modelos e o comportamento real da estrutura subterrânea.

Para o modelo 3D foi efectuado um cálculo do factor de segurança. O FLAC3D utiliza o método desenvolvido por Dawson et al. (1999) no qual os parâmetros de resistência são consecutivamente reduzidos até que se verifique um escoamento plástico significativo em alguma parte do modelo. Desta forma foi obtido um factor de segurança de 4,63 o que pode ser considerado satisfatório em termos de nível de segurança.

### 3. RETROANÁLISE DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

#### 3.1. Introdução

Da análise efectuada e dado o comportamento quase elástico do maciço rochoso concluiu-se que os parâmetros mais influentes no comportamento da estrutura subterrânea são o módulo de deformabilidade (E) e o coeficiente de impulso ( $K_0$ ) na direcção perpendicular ao eixo das cavernas. Deste modo, estes parâmetros foram objecto de retroanálise considerando o modelo 3D e as medições de deslocamentos registadas pelos extensómetros.

O processo de retroanálise é, normalmente, levado a cabo utilizando uma função erro, que mede a diferença entre valores medidos e calculados, e um algoritmo de optimização que, através de um processo iterativo, tenta encontrar o conjunto de parâmetros que conduz ao valor mínimo dessa função. A função erro utilizada neste caso foi a clássica função de mínimos quadrados.

Existem vários tipos de algoritmos de optimização que se podem englobar em dois grandes grupos, nomeadamente, os relativos aos métodos clássicos de optimização (métodos de procura directa, baseados no gradiente da função objectivo, etc.) e métodos inovadores da área da programação evolutiva (algoritmos genéticos, estratégias evolutivas, etc.). Os primeiros

apresentam um desempenho satisfatório para funções erro que, no espaço dos parâmetros, apresentem uma forma convexa com um mínimo claramente definido. Para além disso só garantem convergência para mínimos locais. Fora destas circunstâncias, o que é bastante típico dos problemas em geomecânica, estes algoritmos apresentam problemas ao nível da convergência (Miranda, 2007). Os algoritmos baseados em programação evolutiva são métodos robustos de optimização, inspirados pela lei de selecção natural de Darwin que tentam mimetizar a evolução natural das espécies em sistemas biológicos (Costa, 2007). Estes algoritmos não necessitam que a função erro sejam contínua e convexa para convergirem e só necessitam de informação sobre a função erro e suas restrições. A maior desvantagem é o número de avaliações da função erro que podem ter de realizar o que pode comportar um peso computacional muito elevado.

Neste trabalho utilizou-se um algoritmo baseado em estratégias evolutivas (ES) (Schwefel, 1995) para proceder à retroanálise dos parâmetros geomecânicos. Este tipo de algoritmos é em muitos aspectos semelhante aos algoritmos genéticos mas para variáveis contínuas são significativamente mais robustas e eficientes. Isto significa que as ES necessitam de menos avaliações da função erro para atingirem a convergência o que pode ser importante na redução do tempo computacional quando se utilizam modelos numéricos.

As ES começam a procura a partir de uma população inicial de possíveis conjuntos de soluções para o problema de optimização e usam regras de transição determinística entre gerações procurando por novas possíveis soluções baseadas em operadores de mutação e recombinação. Uma das principais vantagens em relação aos algoritmos genéticos é a de que os parâmetros internos do algoritmo, que controlam o seu desempenho, são adaptados/optimizados ao longo do processo de procura aumentando significativamente a sua eficiência.

### 3.2. Resultados obtidos

O algoritmo descrito foi utilizado em conjunto com o modelo numérico 3D para a identificação dos parâmetros. Os seus valores iniciais, utilizados no modelo numérico, bem como os valores identificados pelo processo de retroanálise são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2- Resultados dos cálculos de retroanálise realizados

Caso	E (GPa)	$K_0$	Função erro x $10^{-6}$	N.º gerações
Inicial	45,0	2	1,90	-
Optimizado	58,0	1,98	1,34	6

Os parâmetros identificados apontam para um comportamento mais rígido do maciço do que inicialmente previsto já que E sofre um acréscimo de cerca de 29% no caso do valor optimizado enquanto que  $K_0$  mantém-se praticamente inalterado. O valor da função erro associado ao conjunto de parâmetros optimizados decresceu cerca de 30% em relação aos valores iniciais.

Relativamente à eficiência o algoritmo necessitou de 6 gerações para convergir. Cada geração corresponde 10 soluções possíveis o que perfaz um total de 60 iterações o que ainda é um valor considerável se atendermos que o modelo utilizado é um modelo 3D. No entanto, este é um valor muito inferior às centenas ou mesmo milhares de iterações normalmente necessárias quando se utiliza, por exemplo, um algoritmo genético.

A Figura 6 apresenta uma comparação entre os deslocamentos observados e os valores calculados com os parâmetros iniciais e optimizados. O ajuste dos valores calculados aos valores medidos é melhorado em 9 dos 18 casos apresentados. No entanto, o aspecto mais importante a salientar é uma distribuição mais uniforme dos erros relativamente aos valores medidos em cada extensómetro.

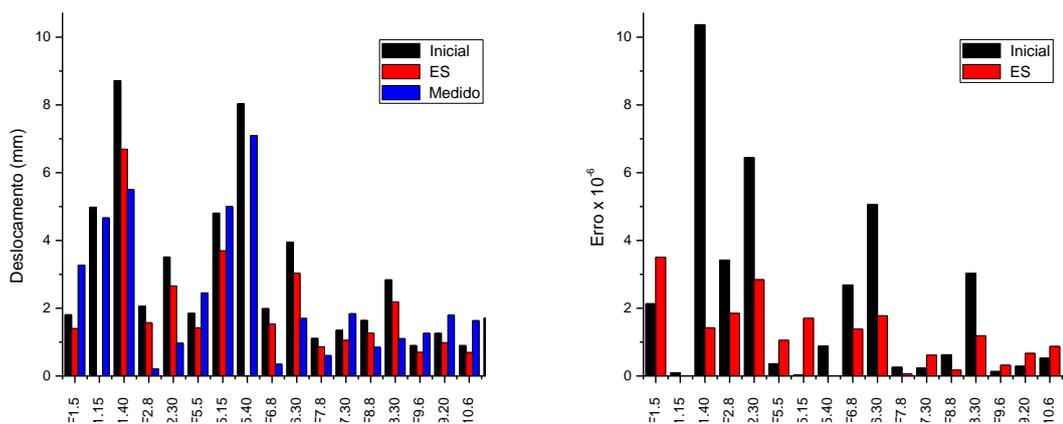


Figura 6 – Comparação entre valores calculados com os parâmetros iniciais e otimizados e valores medidos.

A Figura 7 apresenta a topologia da função erro no espaço dos parâmetros com a identificação dos valores identificados. Apesar da forma regular da função é possível identificar, na vista em planta, a existência de um mínimo local próximo do ponto correspondente a um E de 45 GPa e um  $K_0$  de 1,5. O algoritmo utilizado conseguiu evitar esse mínimo local evidenciando a sua robustez.

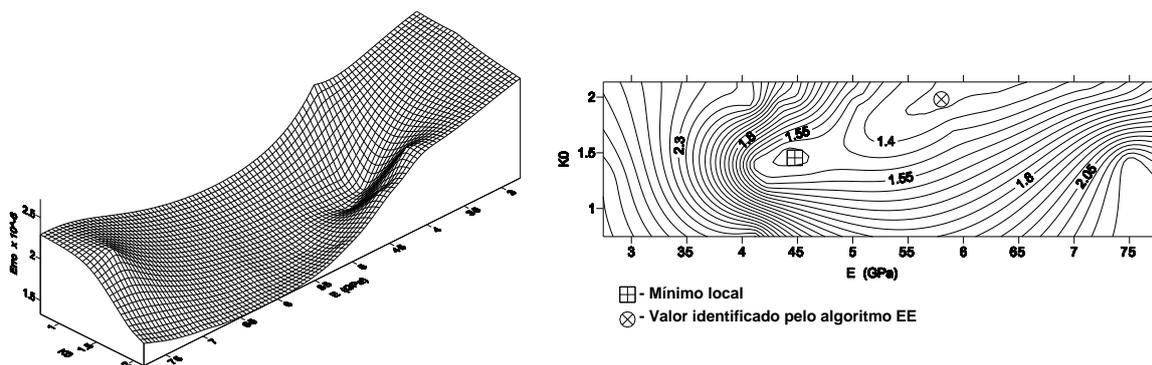


Figura 7 – Topologia da função erro.

#### 4. CONCLUSÕES

O complexo hidroeléctrico da Venda Nova II inclui um conjunto de obras subterrâneas muito importantes construídas num maciço predominantemente granítico de boa qualidade geomecânica. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico 3D das cavernas da central considerando as principais fases construtivas. Os parâmetros geomecânicos para o modelo inicial foram avaliados utilizando informação geomecânica em conjunto com um sistema baseado em conhecimento denominado GEOPAT.

Os deslocamentos verificados nas cavernas são largamente influenciados pela elevada tensão horizontal *in situ* na direcção perpendicular ao eixo principal das cavernas. Os resultados obtidos apresentam uma boa concordância com os deslocamentos medidos pelos extensómetros conclusão que foi validada qualitativamente e quantitativamente através de uma análise estatística adequada. O factor de segurança calculado de 4,63 aponta para níveis de segurança aceitáveis.

Foi executada a retroanálise de E e  $K_0$  (os parâmetros com mais influencia no comportamento em termos de deslocamentos das cavernas) utilizando um algoritmo de optimização inovador da área da programação evolutiva – uma estratégia evolutiva. Os valores identificados foram de 58 GPa para E e 1,98 para  $K_0$  parâmetros que permitem obter um ajuste mais homogéneo dos deslocamentos calculados aos medidos e uma redução significativa do erro. Uma discussão mais profunda relativa a este assunto pode ser encontrada em Miranda (2007).

O algoritmo apresentou uma eficiência bastante aceitável para um algoritmo desta natureza necessitando de 60 iterações para convergir. A sua robustez também foi comprovada já que foi demonstrado que o algoritmo conseguiu evitar a convergência para um mínimo local da função erro. Estas características apontam para a potencial aplicabilidade deste tipo de algoritmos em problemas na área da geomecânica onde as funções erro apresentam, tipicamente, topologias complexas com diversos mínimos locais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento à EDP Produção EM por ter disponibilizado a informação necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), Projecto POCI/ECM/57495/2004, intitulado Geotechnical Risk in Tunnels for High Speed Trains.

## REFERÊNCIAS

- Costa, L. (2007). “A new parameter-less evolution strategy for solving unconstrained global optimization problems”. Comunicação pessoal.
- Dawson (1999). “Slope stability analysis with finite element and finite difference methods”. *Geotechnique*, 49(6): pp. 835-840.
- Itasca (2005). *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Version 5.0 User's manual, Minneapolis, USA.
- Lima, C; Resende, M.; Plasencia, N.; Esteves, C. (2002). “Venda Nova II hydroelectric scheme powerhouse geotechnics and design”. *ISRM News*, vol. 7, n.º 2, pp. 37-41.
- Miranda, T. (2003). *Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos*. Tese de Mestrado. UM, Guimarães, 186p.
- Miranda, T. (2007). *Geomechanical parameters evaluation in underground structures. Artificial intelligence, Bayesian probabilities and inverse methods*. Tese de Doutoramento. UM, Guimarães, 291p.
- Plasencia, N. (2003). *Obras subterrâneas – Aspectos da contribuição da Geologia de Engenharia na concepção e projecto*. Tese de Mestrado. IST, Lisboa, 155p.
- Schwefel, H. (1995). *Evolution and optimal seeking*. John Wiley & Sons.