

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Auditoria pós-obra da sobreescavação de túneis - Caso estudo Túneis em Portugal.

Vidal Félix Navarro Torres

Pesquisador, Instituto Tecnológico Vale, Belo Horizonte, Brasil, vidal.torres@itv.org

Carlos Dinis da Gama

Pesquisador, Centro de Recursos Naturais e Ambiente, Lisboa, Portugal, dgama@tecnico.ulisboa.pt

Juan Manuel Girao Sotomayor

Pesquisador, Instituto Tecnológico Vale, Belo Horizonte, Brasil, juan.sotomayor@itv.org

RESUMO: O artigo descreve um estudo com caráter de auditoria pós-obra, analisando causas intrínsecas, causas operacionais e causas geológico-geotécnicas que deram origem a trabalhos justificados de sobreescavação. Para a sua abordagem técnica desenvolveram-se modelos matemáticos que permitiram quantificar a sobreescavação por divergência periférica que envolve a carga específica dos explosivos utilizados na zona periférica do túnel, a qualidade geotécnica do maciço rochoso e os aspectos operacionais. Com a finalidade de determinar as responsabilidades, quer do empreiteiro quer do dono da obra, foi utilizada como base a Norma Suíça SIA 198 que recomenda uma sobreescavação máxima tolerável. O caso de estudo foi desenvolvido em dois túneis escavados durante a fase construtiva da hidroelétrica de Alqueva, em Portugal.

PALAVRAS-CHAVE: Sobreescavação, qualidade geotécnica, aspectos operacionais, auditoria pós-obra.

ABSTRACT: The article describes a post-work audit study analyzing intrinsic causes, operational causes, and geological-geotechnical causes that led to justified excavation work. For its technical approach, mathematical models were developed to quantify the over excavation for the peripheral divergence that involves the specific charge of the explosives used in the peripheral zone of the tunnel, the geotechnical quality of the rock mass and the operational aspects. In order to determine the responsibilities of both the contractor and the owner, the Swiss Standard SIA 198, which recommends a maximum permissible over excavation, was used. The study case was developed in two tunnels excavated during the construction phase of the Alqueva hydroelectric dam in Portugal.

KEYWORDS: Over excavation, geotechnical quality, operational aspects, tunnel, post-work auditing.

1 Introdução

A barragem de Alqueva inaugurou-se em 2002, a central hidroelétrica começou a produzir eletricidade em 2003 com uma potência instalada total de 260 MW e uma produção média de 166 GWh/ano (APA, 2008). Desde a construção da barragem estava previsto duplicar a potência inicial instalada para produzir 197 GWh. Dentro das obras para ampliação energética foi projetada a construção de túneis de adução para a nova Central (Figura 1). Os trabalhos de escavação foram feitos numa zona com ocorrência de xistos verdes com intercalações de carbonatos metamorfizados (Coba, 2007) se observando, em algumas zonas pontuais, camadas de xistos luzentes (filitos) com componente clorítica com variações laterais e verticais (Zagope, 2009). O mapeamento geotécnico realizado considerou o estado de alteração e fraturação da rocha, a velocidade de propagação de ondas sísmicas, RQD (*Rock Quality Designation*) e ensaios de compressão simples sendo possível caracterizar duas zonas fracas e uma zona com boa qualidade, nesta última zona foram escavados os túneis de adução.

A sobreescavação realizada nesta zona foi motivo de litígio entre o dono da obra e a empresa contratada, nesse sentido, o presente trabalho analisa as causas intrínsecas, operacionais e geológico-geotécnicas que deram origem à sobreescavação. Para uma abordagem técnica desenvolveram-se modelos matemáticos que

permitiram quantificar a divergência devido à sobreescavação que envolve a carga específica dos explosivos utilizados na zona periférica do tunel, a qualidade do maciço rochoso e aspectos operacionais (Navarro Torres V.F. e Da Gama C., 2005). A Norma Suíça, SIA (2004), foi usada como referência, para determinar o limite máximo tolerável da sobreescavação.



Figura 1. Tunel de adução da Central de Alqueva

2 Caracterização geomecânica e geotécnica

As características geomecânicas e geotécnicas do maciço rochoso são apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Características geomecânicas do maciço rochoso.

Parâmetro	Zona G1	Zona G2	Zona G3
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	70	45	< 10
RQD (%)	75-100	50-75	< 25
Abertura de descontinuidades	fechadas	< 1mm	> 5mm
RMR básico	72-87	50-57	< 30

Tabela 2. Características geotécnicas do maciço rochoso.

Critério de ruptura	Parâmetro	Zona G1	Zona G2	Zona G3
Hoek-Brown	mb	8,2	4,0	1,4
	s	0,0622	0,0067	0,0002
Mohr-Coulomb	c' (MPa)	1,9	0,4	0,1
	ϕ' (°)	61	60	35

A Figura 2 ilustra a localização de cada Zona Geotécnica G1 onde foram escavados os tuneis de adução, sendo de boas características geotécnicas, aspecto que exigiu escavação com recurso a explosivos.

A estratificação na zona estudada é relativamente constante, dado que, na generalidade, a direção é NW-SE e a inclinação varia de 5° a 40° para o quadrante NE, com planos de estratificação bastante ondulados; as alternâncias de xisto verde compacto e xisto verde com leitos carbonatados são constantes e aleatórias. A xistosidade varia de N50°-90°W a 5°-40°NNE e o valor médio é de N65°W, 18°NNE. Na área caracterizam-se algumas dobras com uma atitude predominante que é N35°-45°W, 20°-30°NE. As diáclases na sua generalidade têm uma tendência subvertical com direção predominante no sentido NE e, através da projeção

estereográfica dos planos, foram caracterizadas quatro famílias de falhas (A, B, C e D), sendo a família A, em N75°-90°W, 10°-75°NE (inversas, deslizamento esquerdo), mais frequente.

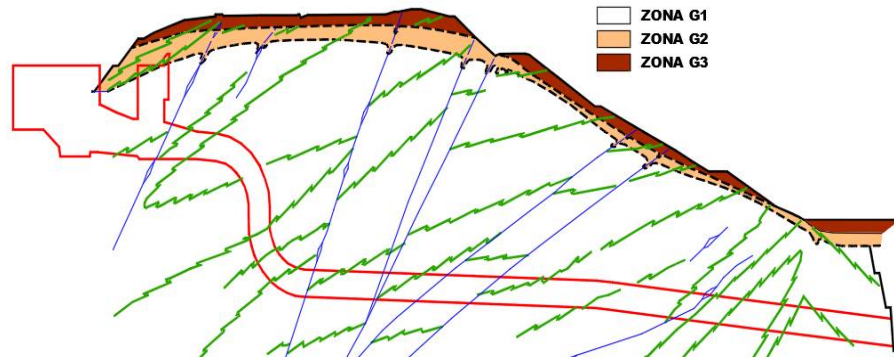


Figura 2. Zoneamento geotécnico no perfil longitudinal.

3 Método de escavação

A metodologia adotada para a escavação dos tuneis foi conforme à particularidade do maciço rochoso, tendo-se determinado que as escavações devem ser realizadas de acordo com as técnicas mais aconselháveis perante a natureza do terreno e dos condicionamentos específicos de cada caso (EDP, 2007).

Para avaliação dos tuneis foi usado o software GDA (*Geomechanical Design Analysis for Underground Openings*) que examina a estabilidade de aberturas subterrâneas, com amplo uso em projectos de túneis, galerias, rampas e desmontes de minas subterrâneas, mediante um processo de análise de alternativas (GDA, 2000). Os mecanismos de instabilidade em aberturas subterrâneas são relacionados com as discontinuidades estruturais (falhas) dos maciços rochosos, que podem formar blocos no teto e hastes da escavação (Hoek & Brown, 1980). O módulo do software relacionado a este aspecto analisa cunhas tetraédricas em 3D, cujo resultado é útil para seleção das dimensões mais favoráveis, orientação e tamanho das aberturas subterrâneas.

Nas simulações realizadas, considerou-se a geometria e orientação do túnel, a xistosidade, diáclases e família de falhas. Observou-se que vários cenários ilustram debilidades estruturais relacionadas à xistosidade, sistemas de diáclases e falhas, que geralmente favorecem a formação de cunhas de maiores dimensões no teto. No que diz respeito à orientação da localização das cunhas estruturais, estas estão localizadas geralmente no sentido NE (SW), aspecto que favorece a orientação dos tuneis que estão no sentido NW (SE).

4 Modelamento matemático e metodologia de análise

4.1 Definição dos danos causado pelo desmonte de rochas com explosivos e a geometria do túnel

Segundo Navarro Torres V.F. e Da Gama C. (2005) os danos dos desmontes de rochas com explosivos em túneis são denominados com o termo DTW (*Damage to Tunnel Wall*) que é expresso principalmente em termos de sobreescavação (*overbreak*) e subescavação (*underbreak*).

A predição e medição do DTW são extremamente importantes na execução do projeto de túneis com revestimento primário e definitivo utilizando concreto, pois permitem quantificar o volume de rocha sobreescavada ou subescavada (Mandal e Singh, 2009) e, consequentemente quantificar o volume de concreto a ser aplicado. Esses aspectos historicamente comprometem o custo total do projeto, traduzido algumas vezes em conflitos entre o dono da obra e o empreiteiro. As definições a seguir são baseadas em delimitações geométricas numa seção transversal de um túnel (Figura 3) e servem de base para definir claramente estes danos.

Na Figura 3, a linha “A” representa o perímetro mínimo de escavação ideal do projeto, onde, dentro desse perímetro, não deveria resultar rocha, já que significaria investir em uma escavação secundária. Esta parte de maciço resultante é denominado como subescavação (*underbreak*). A linha de escavação paga pelo dono da obra é a definida pela linha “B”, que representa o perímetro localizado a uma denominada tolerância, desde a linha “A”, com valor típico de 0,20 m para avanço de 1 metro de túnel (Maerz, N.H., et al, 1996). Esta distância corresponde principalmente a causas relacionadas com as divergências e desvios de perfuração. Já a linha “C” é o perímetro final ou acabado do túnel revestido com o concreto. Deste modo, o volume de concreto a ser pago pelo dono da obra é definido pelo volume determinado entre as linhas “B” e “C”.

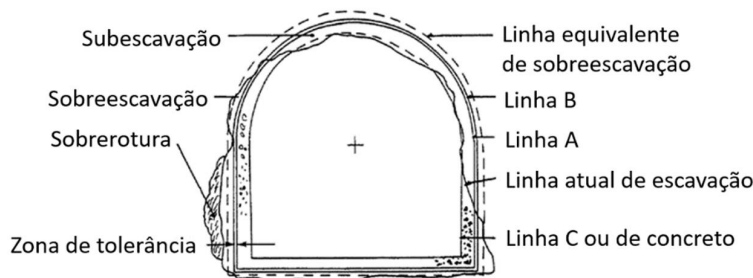


Figura 3. Danos causados pelo desmonte de rochas com explosivos e a geometria do túnel.

Maciço rochoso escavado além da linha de tolerância “B” é denominado sobreescavação (*overbreak*) e expresso em m³/m (Mancini, et al., 1996), cujo custo da quantidade de concreto necessário para o preenchimento do espaço corresponde usualmente ao empreiteiro, uma vez que será necessário um volume extra da mistura para compensar esta sobreescavação. As causas desta sobreescavação estão relacionadas com as propriedades do maciço e a ação explosiva. A linha equivalente à sobreescavação é uma linha teórica que representa o valor médio da sobreescavação uniformemente distribuída ao redor do perímetro da abertura. Finalmente, a sobrerotura é um caso especial de sobreescavação além da linha “B”, decorrente das estruturas geológicas ou danos do desmonte com explosivos.

4.2 Modelagem matemática

Para a modelagem matemática foi necessário caracterizar as causas que provocam o DTW (*Damage to Tunnel Wall*), tendo em vista a participação do dono da obra e o empreiteiro.

- **Causas inerentes ao empreiteiro:** estas causas estão relacionadas principalmente aos aspectos operacionais durante o processo de escavação com a utilização de explosivos (Figura 3), como: tipo de explosivo e fator de potência; concentração de carga explosiva; tempo de retardo, plano de fogo, erros ou desvios na perfuração, diâmetro e comprimento dos furos carregados; e, furos vazios;
- **Causas inerentes ao dono da obra:** são causas intrínsecas, como características geológicas e geotécnicas do maciço rochoso adjacente. Consideram-se os seguintes aspectos: orientação e espaçamento das diaclases, enchimento com argila ou alteração, resistência da rocha, efeitos da tensão *in situ* e influência de água subterrânea. Outro fator é referente às divergências dos furos periféricos que estão relacionados com o espaço mínimo requerido para o posicionamento do martelo hidráulico na operação de perfuração.

A quantificação da sobreescavação devido à divergência periférica (SE_d) é calculada com a Equação 1, em função do perímetro da seção do túnel (P_t), a seção de escavação de projecto do túnel (S) e o avanço da pega (L), considerando que o desvio de tolerância é de 0,20 m para avanço de 1 metro de túnel (Maerz, N.H., et al, 1996), que está relacionado com o requerimento técnico do equipamento de perfuração utilizado.

$$SE_d (\%) = \left(\frac{P_t}{S \cdot L} \sqrt{0,01L^2 - 0,0001} \right) 100 \quad (1)$$



A sobreescavação (SE_g) e a subescavação (sE_g), devido a causas geológicas e geotécnicas e operacionais, são calculadas através das Equações 2 e 3, respectivamente, em função da carga específica periférica (P_f) e a qualidade (Q) do maciço rochoso (Navarro e da Gama, 2005).

$$SE_{go}(\%) = -a + b.P_f - c.LnQ \quad (2)$$

$$sE_{go}(\%) = d - e.P_f + f.LnQ \quad (3)$$

Onde, os coeficientes a, b, c, d, e, f consideram os seguintes fatores: concentração de carga explosiva, tempo de retardo, diagrama de fogo, erros ou desvios na perfuração, diâmetro, comprimento dos furos carregados e furos vazios, entre outros.

Com base em 50 perfis de sobreescavação medidas topograficamente durante a escavação do tunel de Adução 2 no trecho entre Pk 277 ao Pk 427 e usando recursos estatísticos foi possível determinar os valores dos coeficientes com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 73%.

A carga específica periférica (P_f), é calculada mediante a Equação 4, em função da área da seção periférica (A_p), comprimento do avanço por disparo (L), quantidade de furos periféricos (n_f), e a carga explosiva por furo (q_f).

$$P_f = \frac{n_f \cdot q_f}{A_p \cdot L} \quad (4)$$

De acordo com os cálculos demonstrados por Da Gama C. (1999), a sobreescavação por causas operacionais pode ser determinada a partir de equações dinâmicas, que são baseadas na previsibilidade dos danos ao maciço, provocados pela ação explosiva. Essa previsão pode ser desenvolvida a partir das relações matemáticas entre as grandezas dinâmicas que controlam o fenômeno.

A partir dessas equações, considerando as variáveis de tensão dinâmica (σ) [N/m^2], a densidade da rocha (ρ) [kg/m^3], a velocidade de propagação das ondas na rocha (u) [m/s] e o peso da carga detonada por retardo (q) [kg], pode-se calcular a distância de dano (D_d) em metros, como sendo a distância correspondente à rotura da rocha remanescente situada em torno das cargas de contorno de um túnel, a qual é dada por:

$$D_d = \left[\frac{\sigma}{\rho \cdot u \cdot a' \cdot q^{b'}} \right]^{\frac{1}{c'}} \quad (5)$$

Segundo as equações da lei de propagação das velocidades de vibração determinadas, foi obtido valores médios dos coeficientes: $a' = 0,640$ [m/s]; $b' = 0,297$ e $c' = -1,239$. Com os valores dos coeficientes a equação para calcular a distância ou espessura de dano como distância de rotura da rocha remanescente situada em torno das cargas de contorno do túnel, resulta em:

$$D_d = \left[\frac{\sigma}{0,64 \cdot \rho \cdot u \cdot q^{0,292}} \right]^{-0,807} \quad (6)$$

Esta espessura de dano devido a causas operacionais (D_d), determina uma área periférica perturbada (A_d), que expresso em termos de sobreescavação (SE_o), tendo-se:

$$SE_o = \frac{A_d}{S} \cdot 100 \quad (7)$$



A sobreescavação devido às causas geológicas e geotécnicas (SE_g) é calculada baseada na Equação 8. Finalmente, a sobreescavação total é calculada somando a sobreescavação por divergência periférica, por fatores operacionais e por fatores geológico-geotécnicos, resultando a Equação 9.

$$SE_g = SE_{go} + SE_o \quad (8)$$

$$SE_t = SE_d + SE_o + SE_g \quad (9)$$

4.3 Metodologia da análise

A metodologia de análise foi baseada considerando o fato de que o perfil do projeto do túnel nunca coincide na prática com o perfil de escavação com explosivos, e apresentam sobreescavação e subescavação, devido às causas referidas anteriormente.

A definição de qual sobreescavação deve ser paga pelo dono da obra e qual deve ser pelo empreiteiro baseia-se nos seguintes critérios técnicos e normativos:

- A sobreescavação devido à divergência periférica, conforme explicado anteriormente e calculada com a Equação 1, é naturalmente paga pelo dono de obra;
- A sobreescavação devido às causas operacionais é responsabilidade do empreiteiro. Neste caso, os trabalhos de escavação foram mediante detonação utilizando furos com carga controlada e furos de alívio entre furos com carga;
- A sobreescavação devido a causas geológicas e geotécnicas acontecem principalmente pela qualidade do maciço rochoso e também é paga pelo dono de obra.

Como uma referência inclui-se a avaliação da sobreescavação de tolerância, considerada pela Norma Suíça, SIA (2004). A Tabela 3 mostra os valores máximos recomendados pela norma.

Tabela 3. Espessura de sobreescavação paga pelo dono de obra segundo a Norma Suíça, SIA (2004).

Método de escavação	D
Perfuração e desmonte com explosivos (<i>drill&blast</i>)	Máx (0,07 $\sqrt{S}$; 0,40m)
Roçadora (<i>roadheader</i>)	Máx (0,05 $\sqrt{S}$; 0,40m)
Solo sem escudo (<i>soil, without shield</i>)	Máx (0,05 $\sqrt{S}$; 0,40m)
Escudo (<i>shield</i>)	Máx (0,03 $\sqrt{S}$; 0,25m)
TBM	Máx (0,03 $\sqrt{S}$; 0,20m)

5 Resultados

As áreas das seções nos tuneis de adução são tipicamente de 75,92 m², mas variam em função do tipo de suporte de 76,63 a 81,17 m². A área da seção de transição, tomada de água-túneis de adução varia e do poço é de 70,88 m².

Para os tuneis de adução, considerou-se os dados de perímetro igual a 46,806 m e área da seção de 76,63 m². Já para o tunel de ataque, o perímetro foi de 19,641 m e área da seção de 27,30 m². Considerando os avanços por disparo medidos durante a realização da escavação e aplicando a Equação 1, obteve-se uma sobreescavação de divergência periférica (SE_d) média de 6,142% para os tuneis de adução e de 7,189% para o tunel de ataque.

Utilizando dados disponíveis dos planos de fogo de cada seção e aplicando-os na Equação 4, foi possível obter a carga específica periférica para os tuneis. A carga específica periférica para o tunel de adução 1 varia de 0,392 a 0,616 kg/m³, com um valor médio de 0,506 kg/m³. Para o tunel de adução 2 varia de 0,392 a 0,616 kg/m³, com um valor médio de 0,490 kg/m³ e, já para o tunel de ataque, varia de 0,392 a 0,616 kg/m³, com um valor médio de 0,778 kg/m³.

Através das variáveis carga específica periférica (P_f) e a qualidade do maciço rochoso (Q) determinados para cada avanço por disparo, foi possível obter a sobreescavação geológica, geotécnica e operacional (SE_{go}). O valor médio encontrado para o tunel de Adução 2 foi de 5,611 %.



Informações técnicas proporcionadas mostram que os tuneis 1 e 2 foram escavados em totalidade na zona geotécnica ZG1 (Figura 3), pelo que a aplicação da equação dinâmica (Equação 5) é baseado nos parâmetros geotécnicos correspondentes a esta zona (Tabela 1 e Tabela 2) para uma resistência à tração de 15 MPa.

6 Análise dos resultados

A Figura 4 mostra a porcentagem de cada sobreescavação calculada ao longo do tunel de adução.

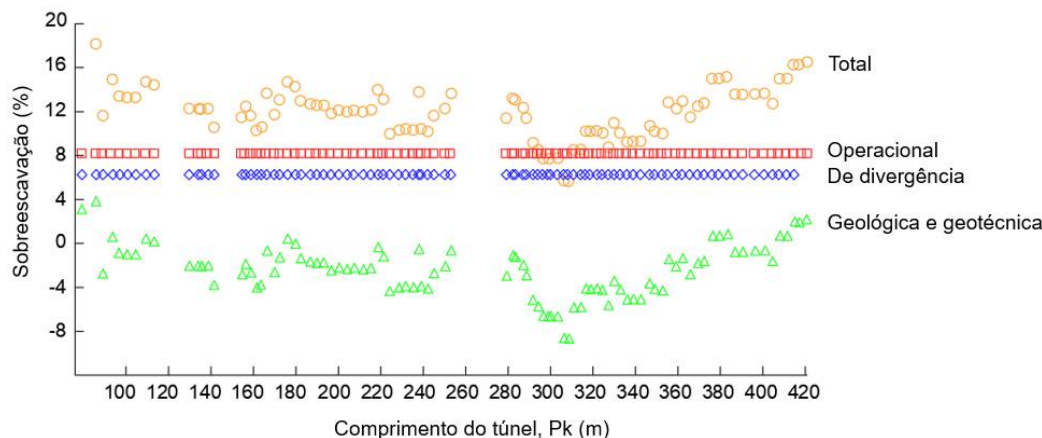


Figura 4. Sobreescavação operacional, de divergência, geológica geotécnica e total.

O cálculo da sobreescavação total satisfaz as tolerâncias da norma. Por exemplo, na Tabela 4, observa-se que para uma seção de 76,62 m² de área do tunel de adução 2, a linha de sobreescavação paga pelo dono da obra resulta estar entre 0,40 m a 0,61m por norma.

Tabela 4. Localização da linha de sobreescavação paga pelo dono de obra segundo a Norma Suíça SIA 198.

Tunel de adução 1	Tunel de adução 2	Tunel de ataque
0,40 m – 0,61 m	0,40 m – 0,61 m	0,37 m – 0,40 m

Na Figura 5 apresenta-se a posição relativa da sobreescavação total do tunel de adução 2 entre os limites toleráveis de escavação segundo a norma SIA (2004).

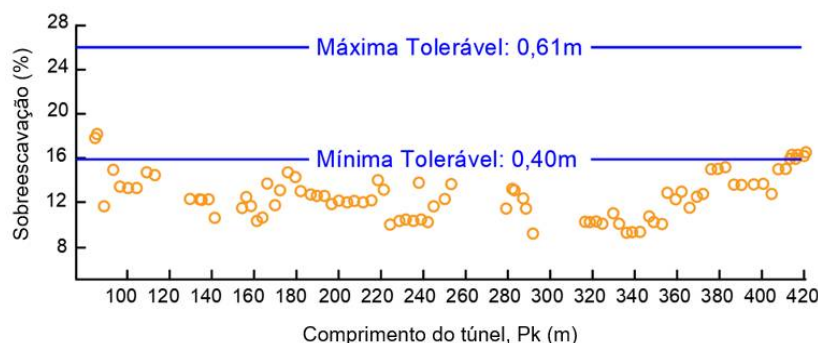


Figura 5. Sobreescavação máxima e mínima considerada pela Norma SIA (2004)



7 Conclusões

Foi realizado um estudo com caráter de auditoria pós-obra para avaliar as causas que deram origem a trabalhos de sobreescavação nos túneis de adução e de ataque da nova central hidroelétrica da barragem de Alqueva em Portugal.

Uma abordagem matemática permitiu quantificar a sobreescavação gerada por fatores intrínsecos (divergência periférica), fatores operacionais e fatores geológico-geotécnicos, conseguindo determinar a sobreescavação total realizada pelo empreiteiro.

A norma suíça SIA (2004) foi utilizada como referência para determinar os limites máximos e mínimos de sobreescavação recomendáveis neste tipo de obras, os resultados mostram que a sobreescavação satisfaz as tolerâncias da norma.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos para ao Instituto Tecnológico Vale por oferecer os recursos materiais para a elaboração deste trabalho e ao Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico de Lisboa pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA (2008) *Aproveitamento Hidroelétrico do empreendimento de fins múltiplos de Alqueva. Reforço de Potência do escalão Alqueva*. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em: <http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA1834/parecerca18342014925145618.pdf>>. Acesso em: 14 de jan. 2020.
- Coba (2007) *Reforço de potência do escalão de Alqueva empreitada geral de construção processo de concurso estudos Geológico-geotécnicos*. P1332/07.
- Da Gama, C. (1999) *Evaluación de los daños al macizo rocoso provocados por las voladuras en túneles*. Ingeotúneles, Madrid: Entorno Gráfico 1.2:231-249.
- EDP (2007) *Empreitada geral de construção. Processo de concurso*. Volume II – Caderno de encargos. Tomo E - Condições técnicas, EDP 2185-P1332/07.
- GDA (2000) *Geomechanical Design Analysis Software*. User's Guide, Dias Engineering Inc., Sudbury, Ontario, Canada.
- Hoek, E., Brown, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press. London, 527 p.
- Maerz, N. et al. (1996) *Overbreak and underbreak in underground openings Part 1: measurements using the light sectioning method and digital image processing*. Geotechnical and Geological Engineering, 14.4: 307-323.
- Mancini, R. et al. (1996) *Technical and economic aspects of tunnel blasting accuracy control*. Tunneling and Underground Space technology, 11.4: 455-463.
- Mandal, S., Singh M. (2009) *Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels*. Tunnelling and Underground Space Technology, 24.1: 22-36.
- Navarro Torres V.F., Da Gama C. (2005) *Engenharia ambiental subterrânea e aplicações*. Rio de Janeiro, CETEM/CYTED. ISBN: 85-7227-210-0, 550p.
- SIA (2004) *Underground Structures – Execution*. Swiss Society of Engineers and Architects. SIA 198:2004. Zurich.
- Zagope (2009) *Relatório Geológico-geotécnico escavações subterrâneas grupo de elemento de obra: Tunel de Ataque*, RGG 02/2009.