

COBRAMSEG' 2006

XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica  
IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas  
III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia



Anais do

III Congresso Luso-Brasileiro  
de Geotecnia

Volume Único

Curitiba



Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Solo-Emulsão .....	131	Efeitos dos Ciclos de Temperatura na Manutenção das Características dos Solos Protegidos com Barreiras de Fluxo em Camadas de Base .....	239
<i>Elza Conrado Jacintho, José Camapum de Carvalho, Márcio Muniz de Farias, Renato Cabral Guimarães</i>		<i>Marcus Guadagnin Moravia, Paulo Ivo Braga de Queiroz e Delma de Mattos Vidal</i>	
Comportamento de Geogrelha Aplicada em Pavimento Submetido a Tráfego Acelerado na Rodovia Rio - Teresópolis .....	137	Utilização de Resíduos de Indústria Cerâmica em Pavimentação .....	245
<i>Marcos Antonio Fritzen e Laura Maria Goretti da Motta</i>		<i>Karina Lorena Corrêa Floriano e Soluzo Almeida de Oliveira, Luiz Claudio Schwarz Baras</i>	
Avaliação do emprego de escória de aciaria com material para lastro de ferrovia .....	143	Comportamento Mecânico de uma Amostra de Solo da Zona da Mata Norte Mineira através dos Ensaios: Módulo de Resiliência e Resistência à Compressão Não Confinada .....	251
<i>Patrício José Moreira Pires, José Tavares Araruna Junior, Álvaro de Freitas Vianna, Franklin dos Santos Antunes</i>		<i>Dando de Sá Viana Rezende e Gisele Santos Custódio, Dario Cardoso de Lima, Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Kellen Dias Nery</i>	
<i>Josanna dos Santos Barreto, Flávio Salles</i>		Viabilidade da Utilização de Material Fresado de Revestimento Asfáltico em Restauração de Bases Rodoviárias .....	257
Dimensionamento analítico de camadas de reforço em plataformas ferroviárias .....	149	<i>Luciana Michelle Dellabianca Araújo, Márcio Muniz de Farias</i>	
<i>João Marcelino, Eduardo Fortunato, Antônio Pinelo</i>		Estudo Experimental das Características Mecânicas de Solos Evolutivos em Aterros de Estradas de Baixo Custo e Sujeitas a Ciclos de Molhagem-Secagem .....	263
Desenvolvimento de Sistemas de Inteligência Artificial para Análise de Túneis Ferroviários .....	155	<i>Antônio Viana da Fonseca, Saturnino D. L. Chembze</i>	
<i>Tiago Miranda e Antônio Gomes Correia, Cristina Silva, Luís Ribeiro e Sousa</i>		Marine Sediments in Road Construction .....	269
Utilização de Misturas de Solo e Resíduo da Fabricação de Papel na Construção Rodoviária .....	161	<i>Nor Edine Abriak, Vincent Dubois, Rachid Zentar, Denis Damidot</i>	
<i>Carlos E. C. Molina, Alexandre B. Parreira e Wesley E. L. Novais</i>		Utilização de Geogauge H-4140 e Viga Benckelman em Obras de Controle de Compactação de Infra-Estruturas Viárias .....	275
Comportamento Mecânico de Misturas de Resíduo da Indústria de Adubos e Cal Para Uso Como Sub-Base e Base de Pavimentos .....	167	<i>Sérgio Luiz Costa Saraiva, Romero César Gomes, Gilberto Fernandes</i>	
<i>Shirley M. Ferreira de Oliveira, Alexandre Benetti Parreira e José L. Fernandes Júnior</i>		Efeito da Saturação nas Propriedades Mecânicas e na Degradação de uma Mistura de Concreto Asfáltico Drenante .....	281
Estradas Não-Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos .....	173	<i>Paulo R. F. Falcão, Márcio M. de Farias, Jofran L. Roxeno, Renato C. Guimarães</i>	
<i>Karla Cristina A. Pimentel e Ennio M. Palmeira</i>		Influência da Instalação de Sensores de Velocidade na Degradação do Pavimento Asfáltico .....	287
Análise da Adição de Cal em um Solo Arenoso em Ensaios de Resistência à Compressão Simples e Colapsibilidade .....	179	<i>Lorena Cristina Martins Batista, Marcos Aires Albuquerque Santos, Paulo Roberto Falcão e José Camapum de Carvalho</i>	
<i>Daniela M. Ide, Anna Sílvia P. Peixoto, Gustavo Pompermayer</i>		Comportamento de Lastro Ferroviário sob Cargas Repetidas e Caracterização de Estruturas de Pavimentos Ferroviários de Trechos de Linhas de Trens Metropolitanos do Rio de Janeiro .....	293
Caracterização de Agregados Lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima para Uso em Obras Rodoviárias .....	185	<i>Laura Maria Goretti da Motta e Jacques de Medina, Jorge Luiz Goudene Spada, Luiz Francisco Muniz da Silva</i>	
<i>José Camapum de Carvalho, Márcio Muniz de Farias</i>		Caracterização Mecânica de Escória de Aciaria Utilizada como Lastro de Ferrovia de Tráfego Pesado .....	299
Ensaio de Adsorção do Azul de Metileno na Caracterização da Atividade da Fração Fina de Solos da Planície Costeira Sul do RS .....	191	<i>Gilberto Fernandes, Romero C. Gomes, Gustavo M. Sousa, Ennio M. Palmeira</i>	
<i>Cezar Augusto Burkert Bastos, Silvana Macedo de Vasconcelas, Débora Felten</i>		Parâmetros Experimentais de Resistência Longitudinal dos Dormentes em Lastro Padrão e Base de Solo Compactado para Trilhos Longos Soldados .....	305
Aplicação de Uma Nova Energia de Compactação aos Solos do Estado do Ceará para Finalidades Rodoviárias .....	197	<i>Rudney C. Queiroz</i>	
<i>Jocely Demétrio de Souza Junior, Suelly Helena de Araújo Barroso</i>		Estudo de Redimensionamento da Dormentação na Malha Ferroviária do Sudeste Brasileiro .....	309
Comparação entre os Resultados de Algumas Propriedades de Interesse à Pavimentação em Cilindro Convencional e Miniatura .....	203	<i>Luiz Francisco Muniz da Silva, Jorge Luís Goudene Spada, Camilce Jorge Sousa, Fernando César de Moura e Silva, Walter Vidon Júnior</i>	
<i>Suelly Helena de Araújo Barroso, Glaucio Túlio Pessa Fabbri</i>		Caracterização Geotécnica e Reciclagem de Resíduos de Construção Civil .....	315
Um Primeiro Estudo da Estabilização dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza Para Aplicação na Engenharia Rodoviária .....	209	<i>Alexandre Duarte Gusmão, Mariana Santos de Siqueira, Fabiana Padilha Carneiro, Bêda Barkokébas Jr.</i>	
<i>Suelly Helena de Araújo Barroso e Raphael Mesquita dos Santos</i>		Estudo experimental da compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação .....	321
Caracterização de Subrasantes Finas Sedimentarias Potencialmente Expansivas del Sur de Uruguay .....	215	<i>Carlos Olympio Lima Raposo, Kátia Vanessa Bicalho, Reno Reime Castello</i>	
<i>Álvaro Rostan, Leonardo Behak, Marcos Musso, Maria Inês Regueira</i>		Análises Geotécnicas da Superestrutura Rodoviária com Materiais Alternativos em Trecho Experimental Instrumentado .....	327
Propriedades Tecnológicas de Solos Arenosos Finos com Potencial de Emprego em Pavimentação na Planície Costeira Sul do RS .....	221	<i>Sérgio Luiz Costa Saraiva, Glaucio Túlio Pessa Fabbri</i>	
<i>Cezar Augusto Burkert Bastos, Márcio Antônio Sapper de Souza, Leonardo Andres Schmitt, Débora Felten</i>			
Estudo de Alternativa para o Aproveitamento de Rejeitos da Exploração de Quartzitos do Sudoeste Mineiro em Sub-base e Base de Pavimentos .....	227		
<i>Adson Viana Alveirim, Glaucio Túlio Pessa Fabbri, Liedi Légi Bariani Bernucci, Edson de Moura</i>			
Comportamento de Solo Melhorado com Cimento para Uso em Pavimentação Sob Carga Repetida .....	233		
<i>Laura Maria Goretti da Motta, Mirtes Maria de Macêdo</i>			

# Desenvolvimento de Sistemas de Inteligência Artificial para Análise de Risco em Túneis

Tiago Miranda e António Gomes Correia

Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Cristina Silva

Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

Luís Ribeiro e Sousa

LNEC e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

**RESUMO:** O presente trabalho descreve sistemas computacionais que estão em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento e que servirão para a análise de risco dos túneis da rede de comboios de alta velocidade a ser construída em Portugal. Um dos sistemas, designado GEOPAT, serve para prever parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas. Neste trabalho serão apresentadas duas aplicações que já foram efectuadas nesta fase de desenvolvimento do sistema a duas importantes obras subterrâneas construídas no Norte de Portugal. O outro sistema, designado MATUF, está vocacionado para o apoio a operações de manutenção e inspecção dos túneis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Túneis, Sistemas Baseados em Conhecimento, Modelação Numérica.

## 1 INTRODUÇÃO

Portugal encontra-se perante uma nova forma de integração europeia, o sistema transeuropeu de transportes de comboios de alta velocidade, que irá reduzir o problema de infra-estruturas do país. Estão planeadas várias ligações entre Portugal e Espanha, bem como a ligação Lisboa-Porto. A rede projectada ligará as principais cidades do país e servirá cerca de 80% da população e da economia portuguesa.

Em Portugal existe pouca experiência no uso de análises de risco para avaliação de estruturas subterrâneas. Com a rede de comboios de alta velocidade, que envolverá a construção de túneis de grande extensão, o desenvolvimento de estudos de risco geotécnico vai adquirir grande importância para o país.

Encontra-se em desenvolvimento um projecto de investigação subsidiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da análise de risco para túneis ferroviários de alta velocidade. O projecto envolve, em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Universidade

do Minho (UM) e tem o suporte activo da empresa RAVE responsável pelos estudos e desenvolvimento da rede ferroviária de alta velocidade em Portugal e suas conexões com Espanha.

No âmbito deste projecto está previsto o desenvolvimento de sistemas computacionais com recurso a técnicas de inteligência artificial em várias áreas, nomeadamente, na análise de risco e caracterização de maciços e o estabelecimento de metodologias para a manutenção e segurança de túneis ferroviários.

Neste trabalho apresentam-se sistemas computacionais que se encontram em fase de desenvolvimento e que se constituirão como novas ferramentas para o estudo e a análise do risco geotécnico em túneis para comboios de alta velocidade focando as problemáticas anteriormente referidas. O GEOPAT é um sistema baseado em conhecimento (SBC) que está em fase de aperfeiçoamento e foi desenvolvido para a previsão de parâmetros geomecânicos, de deformabilidade e resistência, contemplando os casos de maciços rochosos, terrosos e heterogéneos. Estão já em

desenvolvimento outros módulos para a previsão dos parâmetros que recorrem a modelos induzidos por técnicas de *data mining* aplicadas a uma alargada base de dados. O outro sistema, designado MATUF é também um SBC que foi inicialmente desenvolvido para a manutenção e inspecção de túneis ferroviários antigos. Encontra-se actualmente em início de desenvolvimento para os túneis ferroviários de alta velocidade a construir em Portugal. Faz-se referência a algumas aplicações do sistema GEOPAT a uma estação subterrânea do Metro do Porto e a um complexo subterrâneo de uma central hidroeléctrica.

## 2 SISTEMA GEOPAT

O GEOPAT é um SBC para a previsão de parâmetros geomecânicos em formações graníticas para maciços rochosos, terrosos e heterogêneos para a modelação de obras subterrâneas.

Este sistema foi desenvolvido baseado em conhecimento sistematizado e organizado obtido por especialistas em túneis e caracterização geomecânica, em pesquisa bibliográfica e em estudos detalhados sobre as expressões e hipóteses a considerar. Para organizar este conhecimento estabeleceram-se redes causais. O GEOPAT pretende ser uma ferramenta importante no apoio à decisão.

### 2.1 Formações rochosas

A avaliação do módulo de deformabilidade em maciços rochosos ( $E_M$ ) foi estabelecida através de um estudo comparativo de várias expressões encontradas na literatura (Miranda, 2003). Através da ponderação e da experiência de alguns especialistas, foi seleccionado um grupo de expressões e a algumas foram colocadas restrições. A Tabela 1 sumaria as expressões adoptadas.

Para o cálculo dos parâmetros de resistência utiliza-se o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002).

A informação geomecânica pode ser introduzida no sistema de duas maneiras distintas. Na primeira os sistemas empíricos

RMR e Q são aplicados e eventualmente os valores da matriz de interações, como formulado por Hudson (1992). Na segunda, a informação é inserida de uma forma mais expedita considerando a introdução directa do valor de GSI. A Figura 1 apresenta a janela relativa ao sistema RMR.

Tabela 1. Expressões para o cálculo do módulo de deformabilidade em maciços rochosos.

$E_M$		Limitações
$E_M = 10^{(RMR-10)/40}$	(1)	RMR $\leq$ 80
$E_M = 2RMR - 100$	(2)	RMR $>$ 50 e $\sigma_c >$ 100MPa
$\frac{E_M}{E_R} = \left( 0,0028RMR^2 + 0,9e^{(RMR/22,82)} \right)$	(3)	-
$E_M = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(GSI-10)/40}$	(4)	$\sigma_c \leq$ 100MPa
$E_M = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) 10^{(GSI-10)/40}$	(5)	$\sigma_c >$ 100MPa
$E_M = 10Q^{1/3}$	(6)	-
$E_M = 1,5Q^{0,6} E_R^{0,14}$	(7)	$E_M \leq E_R$ e $Q \leq 500$

Obs.:  $\sigma_c$  – resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;  $E_R$  – modulo de deformabilidade da rocha intacta; D – factor de perturbação do maciço rochoso devido à libertação de tensões e aos rebentamentos.

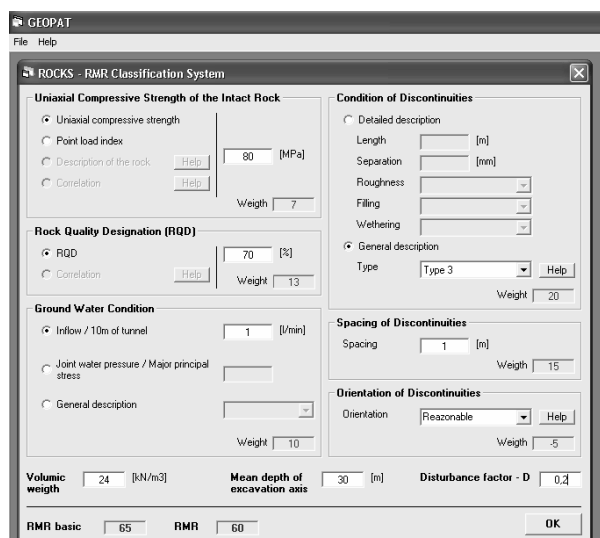


Figura 1. Janela relativa ao sistema RMR.

Os valores de  $E_M$  e dos parâmetros de resistência ( $m_i$ ,  $m_b$ ,  $s$  e  $a$  do critério de Hoek-Brown e  $c'$  e  $\phi'$  do critério de Mohr-Coulomb) são então calculados utilizando as expressões correspondentes. Foi definida uma metodologia para obter o valor final de  $E_M$  que tem em consideração a média e a variância dos valores calculados. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo dos resultados dados pelo GEOPAT.

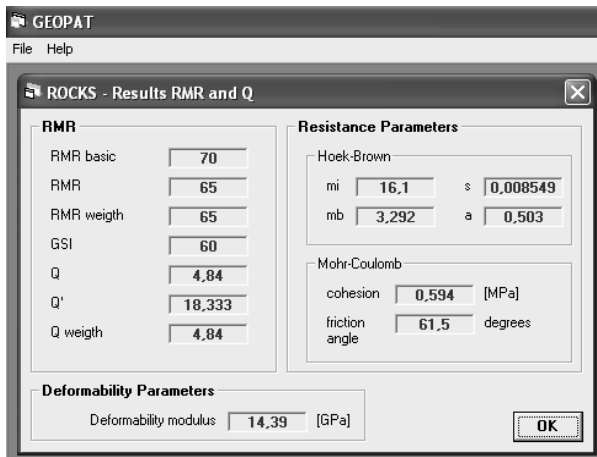


Figura 2. Exemplo de resultados dados pelo GEOPAT.

## 2.1 Formações terrosas

No caso de formações terrosas, o GEOPAT calcula os parâmetros de resistência e deformabilidade a partir de um grande número de ensaios *in situ* e em laboratório. As expressões utilizadas foram encontradas nos trabalhos de vários autores fazendo a distinção de solos residuais e solos transportados. Neste trabalho apenas são apresentadas algumas das expressões utilizadas para solos transportados.

O ângulo de atrito de pico ( $\phi_p'$ ) pode ser determinado a partir dos resultados do ensaio com cone penetrômetro (CPT) e do dilatômetro de Marchetti (DMT). As expressões utilizadas para o cálculo deste parâmetro apresentam-se na Tabela 2 (Robertson and Campanella, 1983; Mayne, 2001).

Tabela 2. Expressões para o cálculo de  $\phi_p'$ .

$$\phi_p' = \arctan[0,1 + 0,38 \cdot \log(q_c / \sigma'_{v0})] \quad (8)$$

$$\phi_p' = 20^\circ + \frac{1}{0,04 + 0,06 / k_D} \quad (9)$$

Obs.:  $q_c$  – resistência de ponta do ensaio CPT;  $\sigma'_{v0}$  – tensão efectiva vertical inicial;  $k_D$  – índice de tensão horizontal obtido a partir do ensaio DMT.

O ângulo de dilatância ( $\alpha$ ) é calculado utilizando a relação empírica proposta por Bolton, 1986:

$$\alpha = \phi_p' - \phi_{cv}' = m \{ D_R [ Q - \ln(\sigma'_{mf}) ] \} - R \quad \phi_p' \geq \phi_{cv}' \quad (10)$$

onde:  $\phi_{cv}'$  é o ângulo de atrito do estado crítico;  $m$  é um coeficiente respectivamente igual a 3 e 5 para condições axissimétricas e de estado

plano de deformação;  $D_r$  é a densidade relativa;  $R \approx 1$  para areias;  $Q$  é uma função logarítmica da resistência à compressão dos grãos (areias de quartzo  $\approx 10$  e areias calcárias  $\approx 8$ );  $\sigma'_{mf}$  é a tensão média efectiva na rotura (no sistema este valor é considerado igual a  $\sigma'_{v0}$ ).

O cálculo do módulo de deformabilidade secante para níveis de deformação que interessam as obras subterrâneas é baseado no módulo de Young para pequenas deformações ( $E_0$ ). Alguns ensaios fornecem este valor directamente enquanto outros relacionam-se melhor com o módulo de distorção ( $G_0$ ), com o qual é possível obter  $E_0$ . Para o cálculo de  $G_0$  consideraram-se os ensaios SPT, CPT e CH. As expressões que relacionam os resultados destes ensaios com  $G_0$  apresentam-se na Tabela 3 (Gomes Correia et al., 2004).

Tabela 3. Expressões para o cálculo de  $G_0$ .

$G_0$	
$\frac{G_0}{q_c} = 290.57 \left[ \frac{q_c}{(\sigma'_{v0} p_a)^{0.5}} \right]^{-0.75}$	(11)
$\frac{G_0}{q_c} = 144.04 \left[ \frac{q_c}{(\sigma'_{v0} p_a)^{0.5}} \right]^{-0.631}$	(12)
$V_s = 69 \cdot N_{60}^{0.17} \cdot Z^{0.2} \cdot F_A \cdot F_G$	(13)
$G_0 = \rho \cdot V_s^2$	(14)
$\frac{G_0(\text{MPa})}{F(e)} = [3.16 \text{ to } 5.72] \cdot [p'_0(\text{MPa}) \cdot 10^3]^{0.4}$	(15)
where: $F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	(16)

Obs.:  $p_a$  – tensão de referência (100kPa);  $V_s$  – velocidade das ondas sísmicas (m/s);  $N_{60}$  – número de pancadas para uma razão de energia de 60%;  $Z$  – profundidade (m);  $F_G$  – factor geológico (argilas=1; areias=1,086);  $F_A$  – factor de idade (Holocénico=1; Pleistocénico=1,303);  $\rho$  – massa volúmica;  $e$  – índice de vazios;  $p'_0$  – tensão efectiva média.

O valor de  $E_0$  pode ser obtido através do módulo determinado pelo ensaio DMT ( $M_{DMT}$ ) utilizando a seguinte relação:

$$E_0 \approx 0.8 M_{DMT} \quad (17)$$

O módulo de deformabilidade dos materiais geotécnicos é altamente dependente dos níveis de deformação e o valor utilizado no projecto deve ser adaptado para as deformações esperadas de acordo com os estados limite de serviço da estrutura. Para isto o sistema procede

a uma correcção do valor de  $E_0$  obtido pelo programa multiplicando-o por um factor correctivo (F) que é dependente do nível de deformação esperado para a estrutura. Assim, considerando várias propostas encontradas na bibliografia são considerados razoáveis valores de deformação de 0,05% e 0,3%, respectivamente, para túneis escavados com tuneladora e pelo método SEM/NATM.

### 2.3 Formações heterogéneas

Relativamente às formações rochosas altamente heterogéneas e devido à grande incerteza quanto ao seu comportamento geomecânico foi implementada uma metodologia probabilística.

Utilizando o sistema RMR é possível obter uma distribuição estatística destas estruturas geotécnicas. O valor médio e o desvio padrão dos pesos deste sistema de classificação são introduzidos. Depois, e assumindo uma distribuição normal, o sistema gera mil valores aleatórios para cada um dos pesos utilizando o método de Monte Carlo. Estes valores são posteriormente adicionados obtendo-se os correspondentes valores de RMR com o qual é possível obter o parâmetro GSI. Assim, obtém-se uma distribuição probabilística deste parâmetro que é possível visualizar através de um histograma (Figura 3). Os valores médio e característico de GSI são calculados e são utilizados para determinar os parâmetros de resistência e deformabilidade.

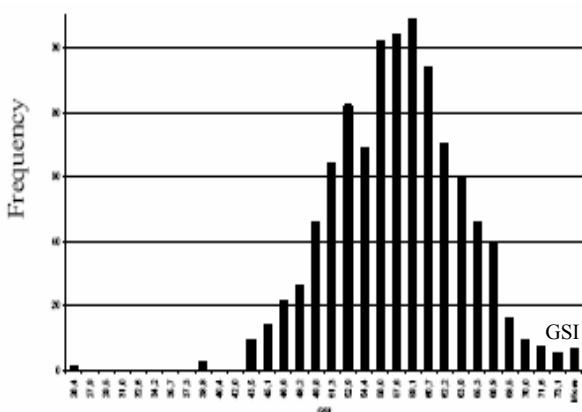


Figura 3. Histograma do parâmetro GSI dado pelo GEOPAT.

## 3 SISTEMA MATUF

O MATUF (Metodologia de Apoio a Túneis

Ferrovíarios) foi desenvolvido para uma manipulação adequada da informação existente sobre os túneis ferroviários em Portugal e para a avaliação e controlo da sua segurança (Silva, 2001). Este sistema apresenta um conjunto de interfaces interactivas e incorpora o conhecimento de especialistas no domínio das obras subterrâneas com vista à avaliação das condições dos túneis ferroviários estabelecendo, se necessário, recomendações para a sua reabilitação. Para cada túnel, são inseridos os dados gerais e, posteriormente, as informações resultantes da exploração do túnel, distinguindo-se dois tipos de dados: os respeitantes às inspecções e os respeitantes à observação e ensaios (Figura 4).



Figura 4. Níveis de informação considerados no sistema MATUF.

O MATUF está dividido em vários módulos de aplicação constituindo o TUPER o subsistema baseado em conhecimento. Para o desenvolvimento do TUPER foi definido um conjunto de anomalias que podem ocorrer nestas obras e tem por base informação essencialmente qualitativa. A base de conhecimentos é essencialmente empírica e foi implementada com recurso a um conjunto de redes causais que simulam o processo de raciocínio dos especialistas. Uma vez analisados os cenários de ocorrência possíveis de anomalias, são verificadas possíveis soluções e estabelecidas recomendações.

4 APLICAÇÃO DO SISTEMA GEOPAT A

## DUAS OBRAS SUBTERRÂNEAS

### 4.1 Estação do Bolhão do Metro do Porto

A estação subterrânea do Bolhão, pertencente à rede do Metro do Porto, está situada numa das principais zonas comerciais da cidade localizando-se por baixo de edifícios datados do início do século XX e da Capela das Almas que pertence ao património cultural da cidade (Gaspar et al., 2004).

Esta estação foi construída a uma profundidade de 12 m e a sua configuração consiste em duas cavernas perpendiculares com 70 e 62 m de comprimento e diâmetros de 18 e 16 m, respectivamente. Esta estrutura está localizada numa formação granítica normalmente designada por “Granito do Porto” que é caracterizada pela ocorrência de perfis de alteração altamente heterogéneos o que dificulta o estabelecimento de um comportamento geomecânico padrão. A Figura 5 apresenta a planta da caverna bem como a distribuição espacial dos grupos geomecânicos.

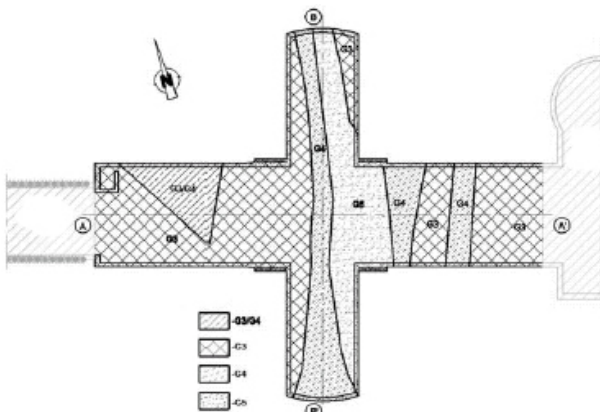


Figura 5. Planta da configuração da caverna com a distribuição espacial dos grupos geomecânicos.

O maciço rochoso que interessa esta estrutura é composto por três grupos geomecânicos principais. Os parâmetros obtidos para estes grupos utilizando o GEOPAT apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da aplicação do sistema GEOPAT.

Grupo	E GPa	Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		
		$\varphi$ , °	$c$ , kPa	$m_b$	$s$	$a$
G3	3,4	54	126	1,35	5,87E-4	0,51
G4	1,6	44	66	0,84	1,41E-4	0,53
G5	0,84	28	24	0,55	4,03E-5	0,56

Foram desenvolvidos modelos numéricos considerando as seis fases de escavação e os parâmetros geomecânicos dados pelo sistema. Para a modelação escolheu-se uma secção afastada da intersecção entre as cavernas para evitar o efeito tridimensional da geometria. A Figura 6 mostra as curvas de assentamentos à superfície para as várias fases construtivas que são bastante semelhantes às curvas teóricas. O assentamento máximo observado nesta secção foi de 2 mm que fica bastante próximo do valor calculado que é de 1,8 mm.

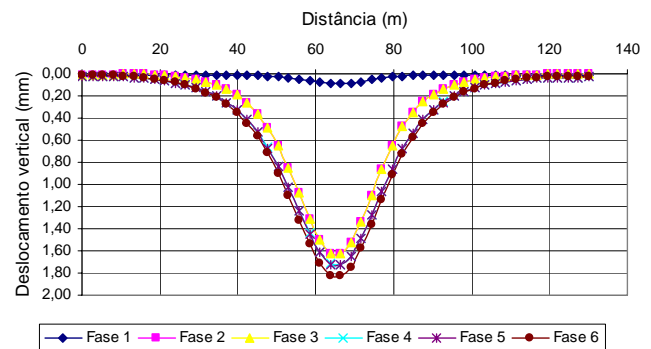


Figura 6. Curvas calculadas de assentamentos à superfície para as diferentes fases de escavação.

### 4.2 Complexo da central de Venda Nova II

O complexo da central consiste em duas cavernas ligadas por duas galerias. Em planta, estas cavernas são retangulares e têm, respectivamente, para a galeria principal e para a caverna dos transformadores, as seguintes dimensões: 19,0x60,5 m e 14,1x39,8 m. Na Figura 7 apresenta-se um corte transversal do complexo.

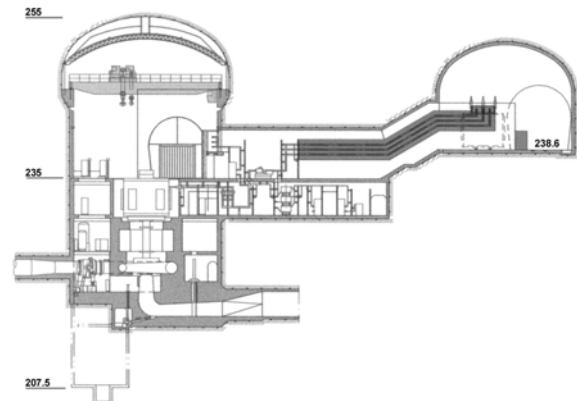


Figura 7. Vista em corte do complexo da central.

O maciço rochoso no qual o complexo

hidroeléctrico está instalado é caracterizado por um granito de grão médio de boa qualidade. Os parâmetros geomecânicos obtidos pelo GEOPAT para este maciço foram os seguintes:  $E = 45 \text{ GPa}$ ,  $\phi' = 54^\circ$  e  $c' = 4 \text{ MPa}$ .

Foram executados cálculos numéricos bidimensionais para este complexo considerando as seis fases de escavação. Os deslocamentos calculados foram comparados com os observados em extensómetros instalados em secções ao longo do eixo das cavernas e apresentam-se na Figura 8. Da análise dos resultados pode-se concluir que os valores apresentam, na generalidade, uma concordância razoável. Os maiores desvios foram nos extensómetros inclinados EF6 e EF8. Dada a natureza complexa do problema, justifica-se a realização de modelos tridimensionais que se encontram em fase de desenvolvimento.

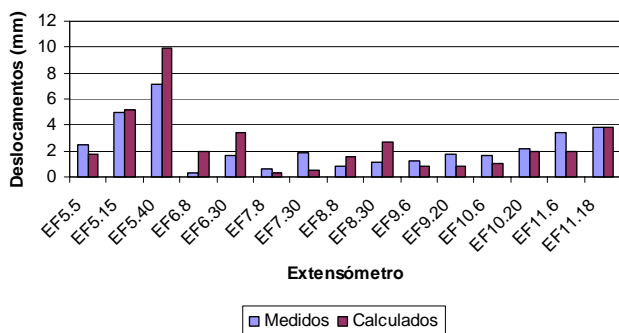


Figura 8. Deslocamentos medidos vs deslocamentos calculados.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados de forma circunstanciada dois sistemas computacionais em fase de desenvolvimento que pretendem ser ferramentas importantes no controlo de risco de túneis para a rede ferroviária de alta velocidade a ser construída em Portugal.

O sistema GEOPAT pretende dar apoio à determinação de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas. Faz a distinção de maciços rochosos, terrosos e heterogéneos estabelecendo diferentes metodologias de abordagem para cada caso. Nesta fase de desenvolvimento o sistema foi já testado em dois casos reais tendo conduzido a valores dos parâmetros que permitiram, através de modelação numérica, simular com

aproximação bastante razoável o real comportamento deformacional do maciço e da estrutura. Estão já em desenvolvimento outros módulos, nomeadamente: previsão dos parâmetros através de modelos induzidos por técnicas de *data mining* aplicadas numa base alargada de casos; aplicação de técnicas convencionais e inovadoras de retroanálise dos parâmetros geomecânicos a partir da observação do comportamento das estruturas; e aplicação de técnicas de *update Bayesiano* nas várias fases de projecto e construção à medida que nova informação sobre o maciço vai sendo colectada.

O sistema baseado em conhecimento MATUF foi originalmente desenvolvido para inspecção e manutenção de túneis antigos. Encontra-se nesta fase o início da sua adaptação e melhoramento para poder ser aplicável aos túneis ferroviários da linha de comboio de alta velocidade.

#### REFERÊNCIAS

- Bolton, M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 36 (1), pp. 65-78.
- Gaspar, A., Ferreira, L., Robalo, R., Lopes, P. (2004). Monitorização automatizada aplicada na estação do Bolhão do Metro ligeiro do Porto. *9º Congresso Nacional de Geotecnia*, Aveiro, pp. 355-362.
- Gomes Correia, A., Viana da Fonseca, A., Gambin, M. (2004). Routine and advanced analysis of mechanical in situ tests. Results on saprolitic soils from granites more or less mixed in Portugal. *Second Int. Conf. on Site Characterization – ISC'2*, Porto. Ed. Viana da Fonseca & Mayne Millpress, Rotterdam, pp. 75-95.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterium – 2002 Edition. *North American Rock Mechanics Society*, Toronto.
- Hudson, J. (1992). *Rock Engineering Systems – Theory and Practice*. Ellis Hor. Ltd. U.K. 185p.
- Mayne, P.W. (2001). Stress-strain-strength parameters from enhanced in-situ tests. *International Conference on In situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, Bali. Pp. 27-47.
- 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.
- Robertson, P.K. & Campanella, R.G. (1983). Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand. *Canadian Geotech. J.*, Vol. 20, Nº 4, pp. 718-733.
- Silva, C. (2001). Controlo de segurança de túneis ferroviários – Desenvolvimento de metodologias de apoio e de sistemas baseados em conhecimentos. *Tese*



*de Mestrado*. FEUP, Porto, 273p.