

MODELAÇÃO NUMÉRICA PARA A INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES POR SOBRECAROTAGEM

NUMERICAL MODELLING FOR INTERPRETATION OF STRESS MEASUREMENTS BY OVERCORING

Figueiredo, Bruno, *LNEC, Lisboa, Portugal, brunof@lneec.pt*

Lamas, Luís, *LNEC, Lisboa, Portugal, lamas@lneec.pt*

Muralha, José, *LNEC, Lisboa, Portugal, jmuralha@lneec.pt*

RESUMO

O método de sobre-carotagem é frequentemente utilizado para a determinação do estado de tensão em maciços rochosos. Nesta técnica de ensaio, a determinação do estado de tensão é feita partir das extensões medidas durante a sobre-carotagem e das constantes elásticas do tarolo que são determinadas, em regra, a partir dos resultados de um ensaio biaxial. Foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos que permite considerar um comportamento tanto isotrópico como transversamente isotrópico para a determinação do estado de tensão. Foram realizadas diversas simulações numéricas do ensaio biaxial para avaliar a influência de microfissuras normais ao eixo dos tarolos na determinação das constantes elásticas. O modelo foi também utilizado para analisar a influência da consideração da anisotropia na determinação do estado de tensão em maciços rochosos.

ABSTRACT

The overcoring method for measuring in situ stresses is frequently used for estimating the state of stress in rock masses. In this technique, computation of the state of stress is performed using the measured strains at the end of the overcoring test and from the elastic constants of the rock mass. The elastic constants are determined by various methods, preferably by biaxial tests on the recovered core. A three-dimensional finite element model was developed that allows calculating the state of stress assuming an isotropic or a transversely-isotropic behaviour for the rock mass. Several numerical trials were performed to analyse the influence of the weakness planes that frequently occur in rock cores as a consequence of the tensile strains that develop during the biaxial test. The model was also used for studying the effect of the degree of rock anisotropy on in situ stress determinations.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do estado de tensão desempenha um importante papel nas fases de projecto e de construção de obras subterrâneas em maciços rochosos. No entanto, a determinação do estado de tensão em maciços rochosos continua a ser um dos grandes desafios na área da Mecânica das Rochas.

O método de sobre-carotagem para a medição do estado de tensão é frequentemente utilizado para a determinação do estado de tensão em maciços rochosos. Nesta técnica de ensaio são medidas as deformações originadas pelo um alívio de tensões resultante da sobre-carotagem, sendo posteriormente calculadas as tensões a partir das constantes elásticas do maciço. São

utilizados vários tipos de equipamentos ou células que se podem distinguir pela capacidade de medir o estado de tensão completo ou parcial.

No primeiro conjunto inclui-se o defórmeter tridimensional (Stress Tensor Tube - STT) cuja célula é constituída por um tubo de plástico epoxídico com 2 mm de espessura e 35 mm de diâmetro exterior, possuindo 10 extensómetros na sua superfície média orientados de acordo com as normais às faces de um icosaedro. Nesta técnica de ensaio, introduz-se a célula num furo de sondagem de pequeno diâmetro executado no final de outro furo de maior diâmetro. A continuação do furo mais largo provoca a libertação do estado de tensão e uma variação correspondente das deformações registadas pelos extensómetros.

A determinação do estado de tensão a partir das extensões medidas durante a sobre-carotagem requer o conhecimento das constantes elásticas. No caso do STT, estas constantes são determinadas, em regra, a partir dos resultados de um ensaio biaxial do tarolo sobre-carotado onde a célula se encontra, o que constitui uma vantagem, comparativamente com outras metodologias existentes (Amadei, 1996). Contudo, verifica-se que durante a realização deste ensaio ocorrem extensões de tracção na direcção axial dos tarolos resultantes da aplicação do carregamento biaxial que influenciam os valores obtidos para as constantes elásticas.

Se num grande número apreciável de casos um modelo isotrópico pode ser considerado adequado, no caso de certos maciços de rochas metamórficas ou sedimentares, a não consideração da sua anisotropia pode conduzir a variações significativas dos resultados (Amadei, 1983). Apesar da importância da anisotropia nos maciços rochosos, esta geralmente é desprezada, uma vez que a sua consideração envolve a determinação de um maior número de parâmetros, o que por vezes é difícil de pôr em prática, face à variabilidade espacial das características dos maciços.

O artigo apresenta trabalhos de investigação recentes realizados no LNEC que abordam estas duas questões e pretendem contribuir para uma melhor interpretação dos ensaios de sobre-carotagem realizados com a célula STT. Foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos que permite considerar um comportamento tanto isotrópico como transversamente isotrópico para a determinação do estado de tensão a partir das extensões medidas durante a sobre-carotagem e dos valores das constantes elásticas obtidos a partir dos ensaios biaxiais. Este modelo pode ser utilizado em metodologias de retro-análise para estimar as constantes elásticas do meio transversamente isotrópico a partir das extensões medidas no ensaio biaxial. A utilização do modelo permitiu realizar cálculos cujos resultados evidenciam a importância das extensões de tracção introduzidas na direcção axial dos tarolos durante a realização de ensaios biaxiais. É apresentada uma nova metodologia para o ensaio biaxial que permite evitar o aparecimento dessas extensões durante o ensaio. Finalmente, o modelo numérico foi utilizado para analisar a influência da consideração da anisotropia na determinação do estado de tensão em maciços rochosos. Apresentam-se resultados comparativos entre a consideração de um comportamento isotrópico e de um comportamento transversamente isotrópico com várias inclinações para o ângulo entre o eixo do furo e o plano transversamente isotrópico.

2. MODELO NUMÉRICO

A célula STT (Rocha e Silvério, 1969) contém 10 extensómetros localizados na superfície média do cilindro de plástico epoxídico, orientados de acordo com as normais às faces de um icosaedro, de modo a permitir uma boa amostragem de todas as direcções (Pinto, 1983). Na Figura 1 apresenta-se a geometria da célula, bem como a orientação dos extensómetros em relação ao sistema de eixos $[0xyz]$, em que z é a direcção axial da célula.

A posição de cada um dos 10 extensómetros pode ser definida através de 2 ângulos: ângulo α entre a direcção do extensómetro i ($i=1,\dots,10$) e o plano xy ; e ângulo θ entre o eixo x e a direcção da normal ao extensómetro i (para $i=1$, $\theta=0^\circ$). Utilizando estes ângulos, a extensão ϵ_i segundo a orientação do extensómetro i é calculada através da seguinte expressão:

$$\epsilon_i = \epsilon_{\theta i} \cos^2 \alpha_i + \epsilon_{z i} \sin^2 \alpha_i + \gamma_{\theta z i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \quad [1]$$

O modelo semi-analítico para a interpretação dos ensaios de sobrecarotagem (Pedro, 1972) considera um comportamento elástico, linear e isotrópico do maciço rochoso, e uma rigidez do maciço consideravelmente mais elevada do que a rigidez do cilindro. O modelo assume também um estado plano de deformação na zona dos extensómetros, face à relação entre o comprimento e o diâmetro da célula.

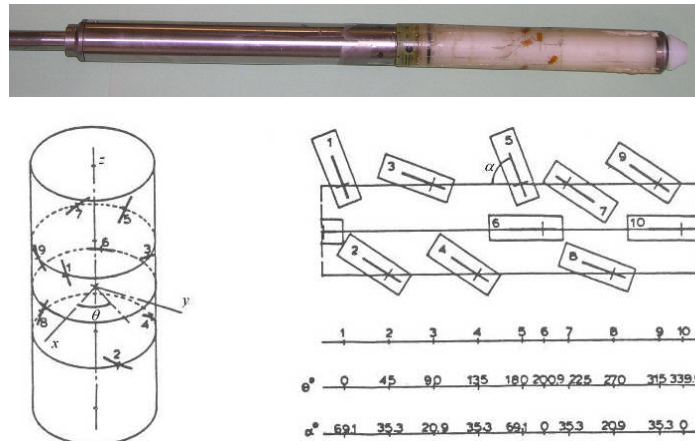


Figura 1 – Célula STT

Foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos (Figura 2) que permite considerar o comportamento transverso-isotrópico do maciço rochoso, caracterizado pelas cinco constantes elásticas e pelos dois ângulos que definem a orientação do plano transverso-isotrópico. O modelo simula o cilindro de plástico epoxídico e os extensómetros na sua localização exacta. A malha que discretiza o anel do cilindro de plástico possui duas camadas de elementos na direcção radial, cada uma, com 1 mm de espessura. Foi utilizada uma camada radial de elementos com 1 mm de espessura para simular a cola existente entre o cilindro de plástico e a superfície do maciço rochoso. A malha tem as dimensões de um cubo com 310 mm de lado e é constituída por 192 elementos finitos isoparamétricos de 20 nós. A malha é mais refinada junto ao cilindro de plástico epoxídico, em virtude de se necessitar de uma boa precisão para os valores das extensões.

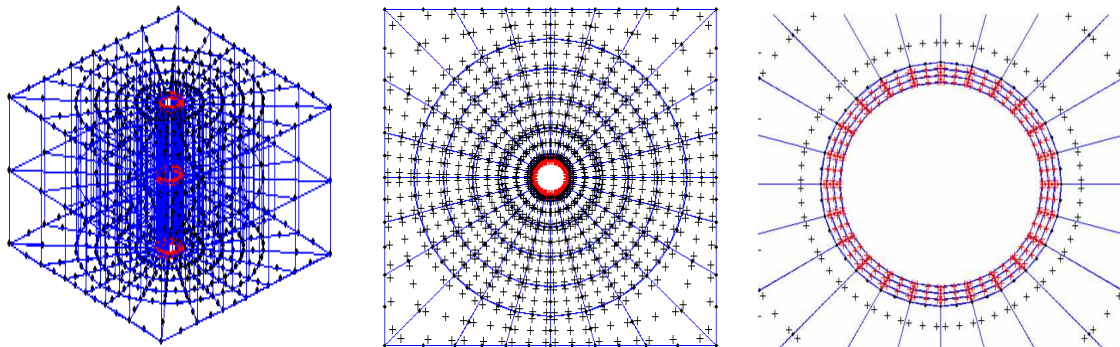


Figura 2 – Modelo tridimensional de elementos finitos

Considerando um comportamento elástico e linear do maciço rochoso, pode utilizar-se o princípio da sobreposição de efeitos no cálculo das extensões ε_i em cada extensómetro i ($i=1,\dots,10$), no final da sobrecarotagem:

$$\varepsilon_i = a_{i1} \sigma_{xx} + a_{i2} \sigma_{yy} + a_{i3} \sigma_{zz} + a_{i4} \sigma_{xy} + a_{i5} \sigma_{yz} + a_{i6} \sigma_{xz} \quad [2]$$

em que σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} e σ_{xz} são as componentes do tensor das tensões, e a_{ij} são os coeficientes correspondentes às extensões calculadas no extensómetro i . Estes coeficientes dependem das características geométricas do ensaio (diâmetro dos furos de sondagem, posição dos extensómetros) e das características elásticas do maciço rochoso. Podem ser determinados através de 6 simulações numéricas. Assim, cada simulação consiste na aplicação ao tarolo da rocha de um tensor das tensões com uma componente unitária e as restantes componentes nulas, e no cálculo das extensões nos 10 extensómetros.

Estes cálculos permitem escrever o sistema de 10 equações [3], que resolvido pelo método dos mínimos quadrados permite o cálculo das 6 componentes do tensor das tensões:

$$\varepsilon_i = a_{ij} \sigma_j \quad \text{com } i = 1, 10 \quad \text{e } j = 1, 6 \quad [3]$$

3. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS

3.1. Vantagens e desvantagens dos ensaios biaxiais

O ensaio biaxial tem como principal objectivo a determinação das constantes elásticas dos tarolos de rocha contendo as células STT depois de sobrecarotadas. Além disso, o ensaio permite também verificar o correcto funcionamento individual dos extensómetros.

Durante o ensaio biaxial são medidas as extensões resultantes da aplicação de uma pressão radial ao tarolo de rocha. O procedimento do ensaio inclui a realização de vários ciclos de carga e descarga, podendo deste modo avaliar-se a ocorrência de um eventual comportamento inelástico por parte da rocha.

Tal como foi referido anteriormente, comparativamente com as outras metodologias existentes para a determinação das constantes elásticas, o ensaio biaxial tem como principal vantagem o facto de permitir a determinação das constantes elásticas dos próprios tarolos sobrecarotados.

No entanto, nos ensaios biaxiais não é possível reproduzir estados de tensão semelhantes aos que realmente ocorrem. Enquanto os maciços rochosos estão sujeitos a estados de compressão tridimensionais, no ensaio biaxial, para além das tensões radiais, geram-se frequentemente tensões de tracção consideráveis na direcção axial dos tarolos, que podem influenciar significativamente a determinação das constantes elásticas.

De acordo com a experiência dos autores, durante os ensaios biaxiais realizados em alguns tipos de rocha, nomeadamente em rochas de baixa resistência ou xistosas para as quais a hipótese de isotropia é admissível para carregamentos de compressão, podem ocorrer microfissuras aproximadamente normais ao eixo do tarolo. Estas microfissuras podem ser interpretadas como um dano, que pode ser simulado através do aumento da deformabilidade na direcção axial do tarolo, ou seja, através da diminuição nesta direcção do módulo de elasticidade de E para E' .

Com o objectivo de avaliar a influência das extensões de tracção na determinação das constantes elásticas a partir do ensaio biaxial, utilizou-se o modelo numérico para a realização de diversas

simulações numéricas do ensaio. Nestes cálculos, foi considerado um modelo transverso-isotrópico com o eixo de simetria coincidente com o do tarolo, e caracterizado através dos módulos de elasticidade E e E' , dos coeficientes de Poisson ν e ν' e do módulo de distorção G' . Considerou-se um domínio de variação entre 1.0 e 2.0 para a relação entre o valor de E (no plano normal ao eixo do tarolo) e o valor de E' (na direcção do eixo do tarolo). Tendo em conta o domínio dos valores admissíveis para os coeficientes de Poisson ν e ν' (Amadei 1983), foi assumido um valor de 0.20 para o coeficiente de Poisson no plano normal ao eixo do tarolo ν . Consideraram-se os valores de 0.10, 0.20 e 0.25 para o coeficiente de Poisson ν' . Para o cálculo do módulo de distorção G' , utilizou-se o princípio de Saint Venant expresso na seguinte fórmula:

$$G' = \frac{E E'}{E + E' + 2\nu' E} \quad [4]$$

O modelo numérico foi utilizado para o cálculo das extensões ϵ_i^{ani} resultantes da aplicação de uma pressão radial ao tarolo de rocha. A partir das extensões calculadas, determinou-se por retroanálise as constantes elásticas de um meio isotrópico equivalente (E^{iso} e ν^{iso}). Os resultados apresentados na Figura 3 evidenciam que a não consideração das extensões de tracção na direcção axial dos tarolos, pode originar erros consideráveis na determinação das constantes elásticas, principalmente nos valores obtidos para o coeficiente de Poisson ν . Com o aumento da relação E/E' observa-se uma diminuição dos valores de E^{iso} e um aumento dos coeficientes ν^{iso} . Os valores mais elevados de ν^{iso} obtidos para valores elevados do rácio E/E' estão de acordo com os resultados frequentemente obtidos nos ensaios biaxiais.

Nos conjuntos de cálculos seguintes foi assumido que o tarolo é constituído por uma rocha xistosa. No modelo numérico, a direcção definida pela normal ao plano de xistosidade corresponde ao eixo de simetria do material transverso-isotrópico e, como tal, forma um ângulo de β com a direcção axial do tarolo. Nos cálculos efectuados foram considerados dois valores do ângulo β : 15° e 30° . Nas Figuras 4 e 5 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade E^{iso} e do coeficiente de Poisson ν^{iso} obtidos para ângulos de $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$, respectivamente. Os gráficos apresentados evidenciam que para valores mais elevados do ângulo β , os valores de E^{iso} são afectados por erros maiores, sendo este efeito menos significativo para o coeficiente ν^{iso} .

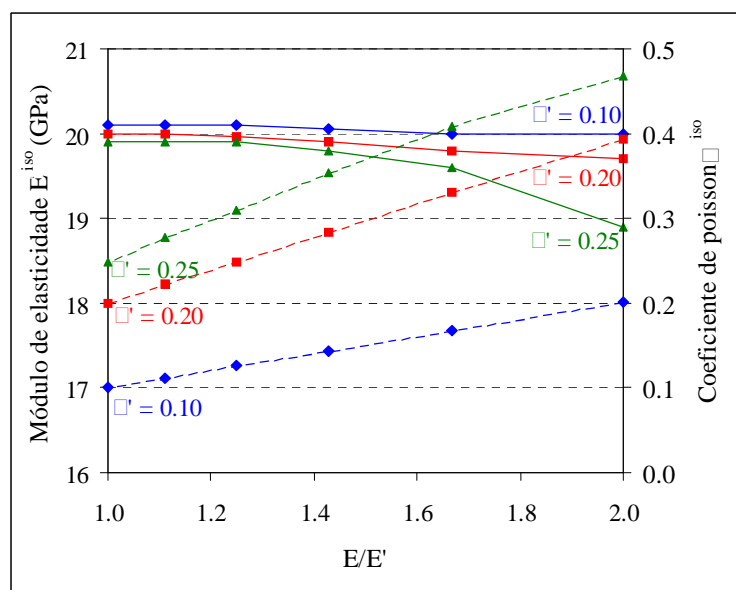


Figura 3 – Variação dos valores de E^{iso} e ν^{iso} com o rácio E/E' para $\beta=0^\circ$

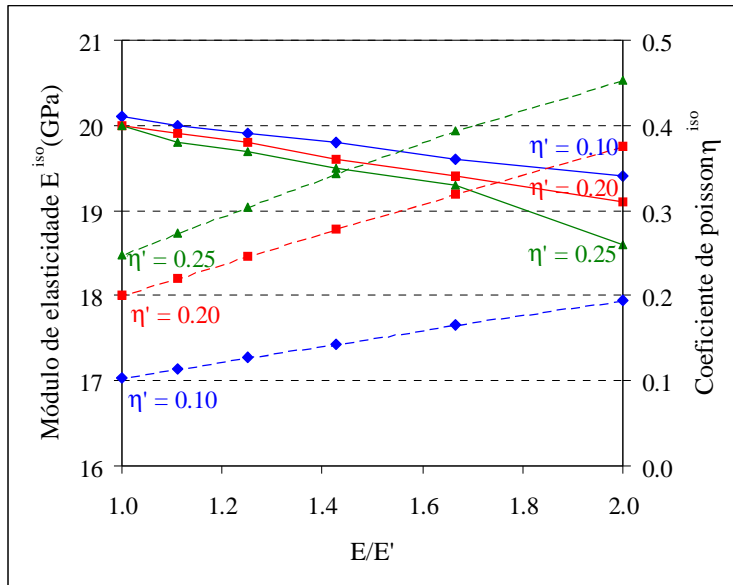


Figura 4 – Variação dos valores de E^{iso} e ν^{iso} com o rácio E/E' para $\beta=15^\circ$

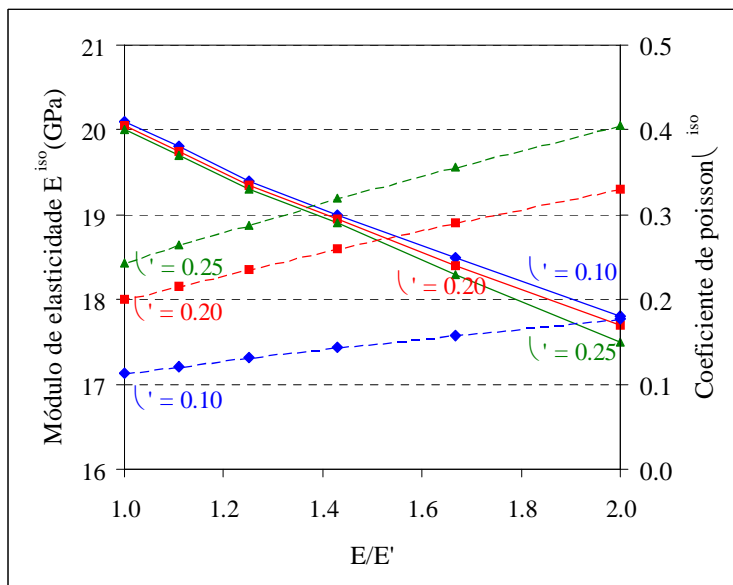


Figura 5 – Variação dos valores de E^{iso} e ν^{iso} com o rácio E/E' para $\beta=30^\circ$

Seguidamente, foi calculado o desvio quadrático médio que permite comparar as extensões obtidas com um modelo isotrópico ϵ_i^{iso} e obtidas com um modelo anisotrópico ϵ_i^{ani} . Este cálculo foi realizado para os três valores do ângulo β (0° , 15° e 30°), considerando-se um valor de 0.2 para o coeficiente ν' e um rácio E/E' com um domínio de variação entre 1.1 e 2.0 (Figura 6). Verifica-se que para $\beta=0^\circ$, o desvio quadrático médio é reduzido, uma vez que a menor rigidez na direcção axial do tarolo é devidamente simulada através da utilização de um valor mais elevado de ν^{iso} nesta direcção. No entanto, o desvio quadrático médio aumenta uma ordem de grandeza, para valores da relação E/E' compreendidos entre 1.1 e 2.0. Para valores do ângulo β diferentes de 0° , o desvio quadrático médio é consideravelmente mais elevado uma vez que nestes casos já não é possível calcular as constantes de um meio isotrópico equivalente que permita simular correctamente o efeito da anisotropia. O desvio quadrático médio varia entre 2×10^{-6} e 42×10^{-6} , sendo estes valores significativos quando comparados com os valores das extensões que são frequentemente medidos nos ensaios biaxiais.

Com o objectivo de reduzir as extensões de tracção durante a realização do ensaio biaxial convencional, foi recentemente desenvolvido no LNEC uma nova metodologia de execução deste ensaio, em que foi projectado equipamento que permite colocar a câmara biaxial, que aplica as tensões radiais, numa prensa hidráulica servo-controlada, possibilitando manter uma tensão axial constante, enquanto se executam os ciclos de carga-descarga do ensaio biaxial. A Figura 7 mostra a célula biaxial colocada na prensa de 5000 kN, a célula de força usada para medir a força axial, sendo o equipamento constituído ainda por um sistema hidráulico para aplicação da pressão radial e de um sistema de aquisição dedicado à medição das extensões na célula STT que se encontra no tarolo.

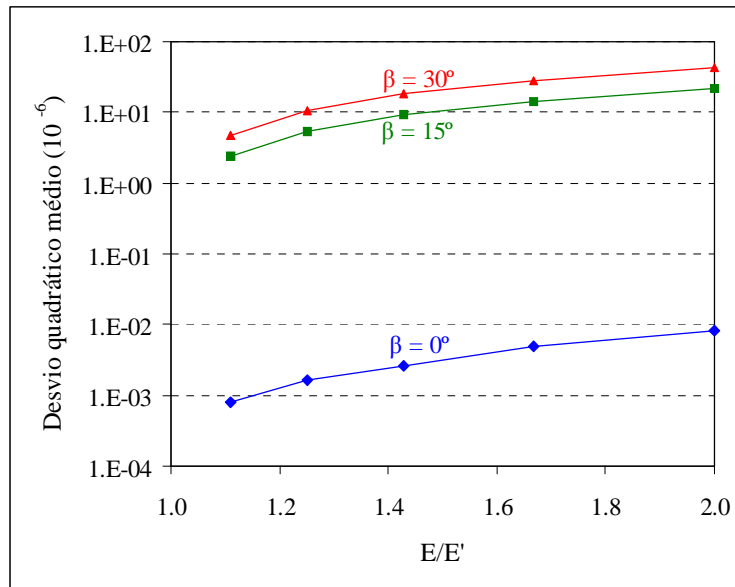


Figura 6 – Desvio quadrático médio das extensões para $\nu' = 0.2$



Figura 7 – Ensaio triaxial

3.2. Constantes anisotrópicas

A importância da consideração do comportamento anisotrópico dos maciços rochosos na área da Mecânica das Rochas tem sido demonstrada por diversos autores. Resultados apresentados por Amadei (1983), evidenciam que um rácio de 1.5 entre os módulos de elasticidade E e E' pode introduzir um erro de 33% no cálculo das tensões principais. Assim, diferentes metodologias têm sido desenvolvidas para a determinação das propriedades elásticas em rochas anisotrópicas (Amadei, 1996).

Um dos métodos mais utilizados para este efeito consiste na realização de ensaios de compressão uniaxial em três provetes, cada um com uma orientação diferente e conhecida do plano preferencial. Uma segunda metodologia consiste no carregamento diametral de amostras com a forma de discos (Pinto, 1979; Amadei, 1996; Chen *et al.*, 1998). Esta metodologia requer a preparação de amostras de dois tipos: umas em que os respectivos eixos coincidem com os eixos de anisotropia; e outras em que estes eixos são perpendiculares. A terceira metodologia consiste na aplicação de diferentes estados de tensão a um único tarolo de rocha (Talesnick *et al.*, 1995), em que cada carregamento aplicado permite obter determinados parâmetros de anisotropia. Esta metodologia é aplicável a rochas com comportamento transverso-isotrópico e requer que os eixos de anisotropia sejam coincidentes com os eixos do tarolo.

Nunes (2002) apresenta uma metodologia analítica para a determinação das constantes elásticas e da orientação do plano transverso-isotrópico a partir do ensaio biaxial realizado em tarolos sobrecarotados com células CSIR (Leeman, 1971). Esta metodologia utiliza as soluções de Lekhnitskii (1961) para a obtenção de uma solução aproximada do estado de tensão na superfície interior do tarolo, assumindo um comportamento isotrópico da rocha. O erro relativo envolvido nesta aproximação decresce com o aumento da rigidez do tarolo e com a diminuição do grau de anisotropia. Assumindo esta hipótese foram obtidas expressões com a forma sinusoidal para o cálculo das extensões tangenciais, axiais e de corte na superfície interior do tarolo. Esta metodologia permite determinar as 5 constantes elásticas e os 2 ângulos que definem a orientação do plano transverso-isotrópico a partir da geometria do tarolo, da pressão aplicada e das extensões medidas no ensaio biaxial.

A aplicabilidade da equação empírica de Saint Venant para a determinação do módulo de distorção é crucial nesta metodologia. Comparativamente com os valores do módulo de distorção obtidos em ensaios de torção, a equação de Saint Venant subestima estes valores em cerca de 40 % (Talesnick e Ringel, 1999). Estes autores propõem a introdução de um factor de correcção na equação de Saint Venant, baseado na diferença relativa entre os valores de E e E' . Barden (1963) demonstra por meios analíticos que para estados planos de tensão, o valor do módulo de distorção G' obtido pela equação [4] é um valor exacto. Uma vez que estas são as condições reais de carregamento nos ensaios biaxiais em tarolos de rocha, a equação [4] pode ser utilizada para estimar de modo razoável o módulo de distorção. No entanto, devem ser consideradas na análise dos resultados do ensaio as incertezas inerentes à estimativa deste parâmetro.

Actualmente, encontra-se em desenvolvimento no LNEC uma nova metodologia para estimar as constantes elásticas de meios transverso-isotrópicos a partir das extensões medidas em ensaios biaxiais/triaxiais, ou com tensão axial constante. Nesta metodologia, o modelo numérico de elementos finitos é utilizado numa rotina de retroanálise de modo a minimizar uma função representativa do erro entre as extensões medidas no ensaio e as extensões calculadas por meio do modelo.

4. ESTADO DE TENSÃO

Nesta secção pretende-se avaliar a influência do grau de anisotropia dos maciços rochosos na determinação do estado de tensão e analisar os erros que resultam da consideração de um modelo isotrópico para a representação do comportamento do maciço. É apresentado um exemplo em que se consideram os valores das constantes elásticas determinados para um maciço de rocha migmatítica, descrito por um modelo transverso-isotrópico com o plano de isotropia coincidente com o plano de xistosidade.

O módulo de elasticidade numa direcção que forma um ângulo γ com o eixo de anisotropia, $E(\gamma)$, é obtido através da seguinte equação (Wittke, 1990):

$$\frac{1}{E(\gamma)} = \frac{\sin^4 \gamma}{E} + \frac{\cos^4 \gamma}{E'} + \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu'}{E'} \right) \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma \quad [5]$$

Foram utilizados os resultados de 11 ensaios de compressão uniaxial em provetes de rocha orientados segundo diferentes ângulos com os planos de xistosidade, para determinar por regressão não-linear as constantes elásticas seguintes que caracterizam o comportamento transverso-isotrópico da rocha (Muralha, 2008): $E=55$ GPa, $E'=19$ GPa, $\nu=0.19$, $\nu'=0.14$, $G'=16$ GPa. Na Figura 8 apresenta-se a variação de $E(\gamma)$ com o ângulo γ , definida a partir destes valores.

O modelo numérico apresentado na secção 2 foi utilizado para a realização de sete simulações numéricas do ensaio biaxial, calculando-se as extensões nos extensómetros resultantes da aplicação de uma pressão radial unitária no tarolo da rocha e das constantes elásticas apresentadas anteriormente. Em cada simulação foi utilizado um valor diferente do ângulo β entre os eixos de anisotropia e os eixos do tarolo (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90°).

A partir das extensões obtidas por este modo, utilizou-se novamente o modelo numérico para o cálculo dos valores das constantes elásticas de um meio isotrópico equivalente (E^{iso} e ν^{iso}) para os sete valores de β considerados (Figura 8). Os resultados obtidos estão de acordo com os apresentados na secção anterior. Assim, para $\beta=0^\circ$ o valor de E^{iso} é semelhante ao valor de E e o coeficiente ν^{iso} é elevado. À medida que o ângulo β aumenta, enquanto o valor de E^{iso} decresce até $\beta=90^\circ$, o coeficiente ν^{iso} decresce abruptamente até valores de β inferiores a 60° .

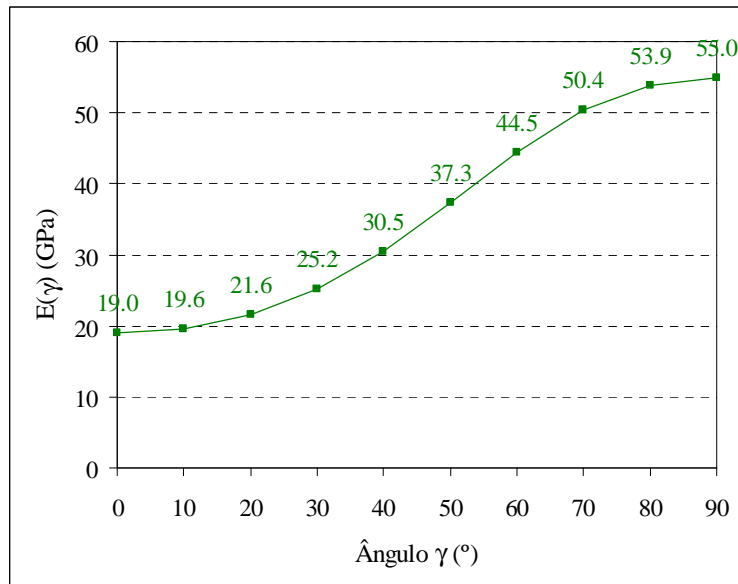


Figura 8 – Variação de $E(\gamma)$ com o ângulo γ

Seguidamente, considerou-se um maciço transverso-isotrópico com as mesmas constantes elásticas e com um estado de tensão inicial σ^0 . As extensões que teoricamente deveriam ser medidas no ensaio de sobre-carotagem ε^{oc} foram calculadas por meio da equação [2]. A partir destas extensões e das constantes elásticas de um meio isotrópico equivalente (Figura 9), foi calculado o estado de tensão inicial para cada valor de β considerado.

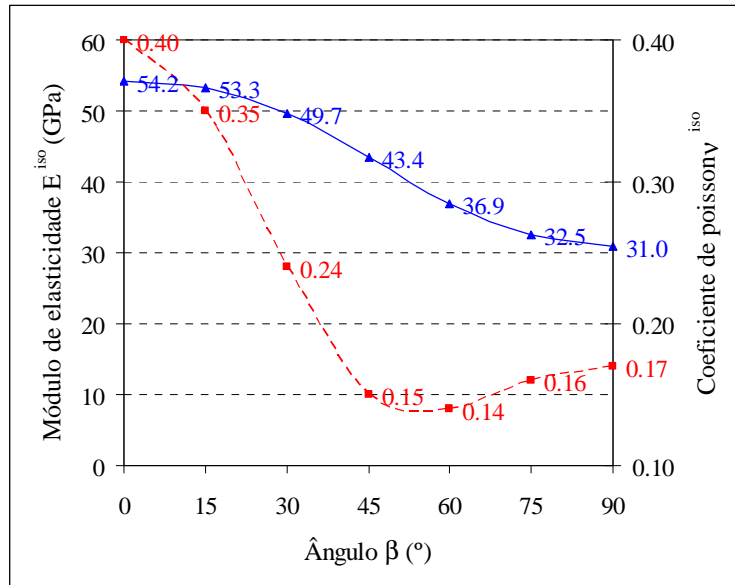


Figura 9 – Variação de E^{iso} e ν^{iso} com o ângulo β

No Quadro 1 são apresentadas as componentes do estado de tensão inicial σ^0 (z é o eixo vertical, x é orientado para Este, e y para Norte) e as componentes do tensor das tensões obtidas com um meio isotrópico equivalente. Na Figura 10 apresenta-se a projecção estereográfica do hemisfério inferior das direcções principais de tensão, assinalando-se a cheio o estado de tensão σ_0 .

Quadro 1 – Estados de tensão obtidos com um modelo isotrópico equivalente (MPa)

	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{zx}
σ^0	2.90	4.60	7.50	1.10	1.80	1.50
$\sigma (\beta=0^\circ)$	6.09	8.07	24.10	1.28	2.16	1.80
$\sigma (\beta = 15^\circ)$	5.59	6.95	21.79	1.20	1.83	2.89
$\sigma (\beta = 30^\circ)$	4.43	5.04	15.78	0.98	1.57	3.63
$\sigma (\beta = 45^\circ)$	3.80	3.89	10.00	0.77	1.37	3.44
$\sigma (\beta = 60^\circ)$	3.42	3.36	6.31	0.64	1.19	2.54
$\sigma (\beta = 75^\circ)$	3.00	3.08	4.59	0.55	1.09	1.64
$\sigma (\beta = 90^\circ)$	2.61	2.99	4.06	0.49	1.12	1.05

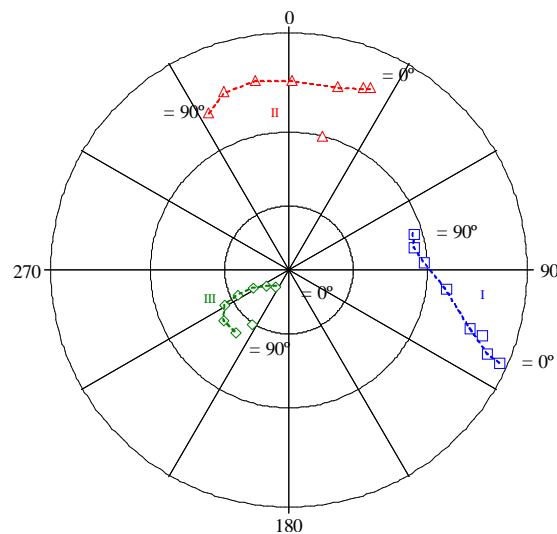


Figura 10 – Tensões e direcções principais obtidas com um modelo isotrópico

Na Figura 11, apresenta-se a magnitude das tensões principais σ_I , σ_{II} e σ_{III} e o traço I_1 do tensor das tensões.

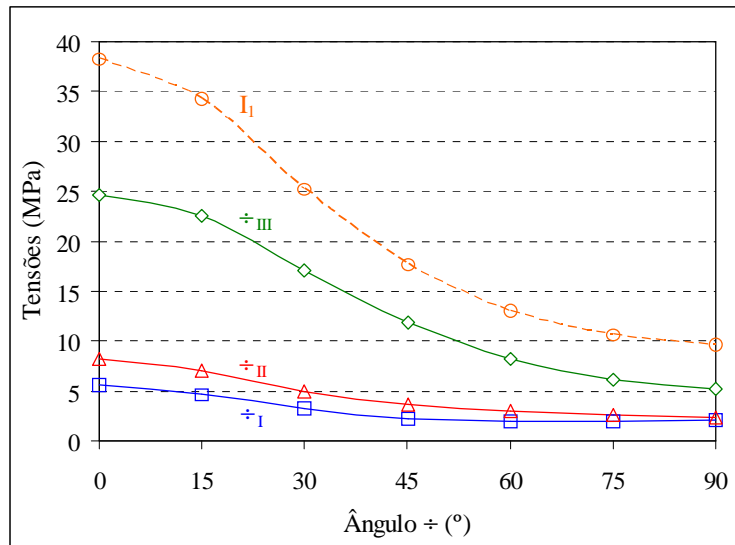


Figura 11 – Variação das tensões principais e do traço do tensor das tensões com o ângulo β

As figuras apresentadas evidenciam que, quer a magnitude, quer a orientação das tensões, variam consideravelmente com o ângulo β . Os valores obtidos são significativamente influenciados pelo estado de tensão aplicado no ensaio biaxial e pelo ângulo β entre os eixos de anisotropia e os eixos do tarolo. Os valores elevados de E^{iso} obtidos a partir de ensaios biaxiais para valores reduzidos de β originam tensões mais elevadas, adquirindo especial relevância, as tensões σ_{zz} na direcção axial do tarolo.

5. CONCLUSÕES

A realização de ensaios biaxiais para a determinação das constantes elásticas em tarolos de rocha tem a vantagem de permitir identificar estas constantes nos mesmos tarolos que foram sujeitos a sobre-carotagem (Talesnick *et al.*, 1995). No entanto, em alguns tipos de rocha, nomeadamente em rochas xistosas, são originadas extensões de tracção que propiciam o desenvolvimento de microfissuras normais ao eixo dos tarolos. Foram realizadas várias simulações numéricas do ensaio biaxial para analisar a influência dessas extensões nos valores obtidos para as constantes elásticas. Os resultados desses cálculos permitiram concluir que a não consideração deste efeito pode introduzir erros consideráveis na determinação das constantes elásticas, principalmente, no cálculo do coeficiente de Poisson. De modo a evitar o desenvolvimento destas deformações na direcção axial dos tarolos durante a realização do ensaio biaxial convencional, foi desenvolvida uma nova metodologia de ensaio para a determinação das constantes elásticas nos tarolos de rocha.

Foi apresentada uma descrição dos métodos existentes para a determinação das constantes elásticas em maciços anisotrópicos. Face à vantagem do ensaio biaxial para a determinação das constantes elásticas em tarolos de rocha e à dificuldade no estabelecimento de uma formulação que permita interpretar os resultados deste ensaio em tarolos constituídos por rochas anisotrópicas, foi desenvolvida uma metodologia de retroanálise que permite estimar as cinco constantes elásticas e os dois ângulos que definem o comportamento de um material transverso-isotrópico.

Foi analisado o efeito da anisotropia na determinação do estado de tensão em maciços rochosos, bem como o erro introduzido mediante a consideração de um modelo isotrópico. Concluiu-se que a adopção de um modelo isotrópico pode introduzir erros consideráveis no cálculo das tensões. Concluiu-se também que para pequenos valores do ângulo entre o eixo do tarolo e o eixo de anisotropia, existe um aumento considerável das tensões, principalmente na direcção axial.

REFERÊNCIAS

- Amadei, B. 1983. *Rock anisotropy and the theory of stress measurements*. Lecture notes in engineering. Springer, Berlin.
- Amadei, B. 1996. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 33: 293-325.
- Barden, L. 1963. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil. *Géotechnique* 13: 198-210.
- Chen, C.S., Pan, E. e Amadei, B. 1998. Determination of the deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35: 43-61.
- Leeman, E.R. 1971. The CSIR doorstopper and triaxial rock stress measuring instruments. *Rock Mechanics* 3: 25-50.
- Lekhnitskii, S.G. 1963. Theory of elasticity of an anisotropic elastic body, em Brandstatter, J.J. (ed.). *Holden-day series in mathematical physics*. San Francisco, Holden Day Inc..
- Muralha, J. 2008. *Ensaio de caracterização geomecânica do maciço rochoso da nova central da barragem de Bemposta*. Relatório LNEC 296/2008-NFOS, Lisboa.
- Nunes, A.L.L.S. 2002. A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39: 257-273.
- Pedro, O. e França, V. 1972. *Estudo das deformações de um cilindro de plástico colocado num maciço rochoso ("Strain Tensor Tube")*. Relatório LNEC, Lisboa.
- Pinto, J.L. 1979. Determination of the elastic constants of anisotropic bodies by diametral compression tests. *Proceedings of the Fourth International Congress on Rock Mechanics*, Montreux, pp. 359-363.
- Pinto J.L. 1983. *Deformabilidade dos maciços rochosos*. Programa de investigação para obtenção do grau de Investigador Coordenador. LNEC, Lisboa.
- Rocha, M. e Silvério, A. 1969. A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses. *Géotechnique* 19: 116-132.
- Talesnick, M.L., Lee, M.Y. e Haimson, B.C. 1995. On the determination of elastic material parameters for transverse isotropic rocks from a single test specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28: 17-36.
- Talesnick, M.L. e Ringel, M. 1999. Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36: 627-639.
- Wittke, W. 1990. *Rock mechanics. Theory and applications with case histories*. Springer-Verlag, Berlin.