

A NOVA CÉLULA STT E A SUA INTERPRETAÇÃO

The new STT cell and its interpretation

por
JOSÉ GABRIEL CHARRUA-GRAÇA*

RESUMO – Apresenta-se a nova célula STT para medição de tensões em maciços rochosos e o sistema de interpretação dos resultados.

SYNOPSIS – The new STT cell, for measuring the state of stress in rock masses, is presented as well as the system for the interpretation of its results.

1 – INTRODUÇÃO

O método de medição de tensões designado por STT (de Stress-Tensor-Tube) foi desenvolvido inicialmente no LNEC na década de 60 e posteriormente aplicado em variados estudos do que resultou uma experiência de utilização relativamente extensa.

O método consiste essencialmente na inserção de uma inclusão no maciço, por colagem da célula num furo de pequeno diâmetro (37 mm) inicialmente feito, e posterior sobrecarotagem com diâmetro largo (120 mm), fazendo-se a leitura das deformações da célula com a libertação das tensões.

As operações encontram-se esquematizadas na Fig. 1.

A célula inicialmente concebida, era um cilindro maciço de resina epoxi que continha embebida e disposta ao longo do seu eixo uma série de 10 extensómetros orientados segundo a Fig. 2.

A demasiada rigidez desta célula, verificada experimentalmente pelo LNEC, e que estudos teóricos posteriores [FAMA (1979)] confirmaram, levou a que se fizesse a sua substituição por um tubo da mesma resina com uma parede de espessura 2 mm, sendo os extensómetros colocados na semi-espessura desta parede segundo 3 rosetas de 3 extensómetros (Fig. 3).

* Engenheiro Civil – Investigador Principal do Núcleo de Fundações Rochosas do LNEC.

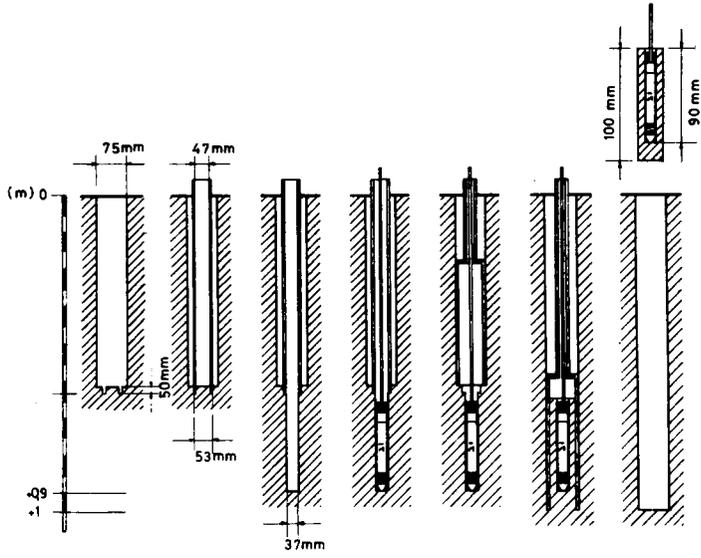


Fig. 1

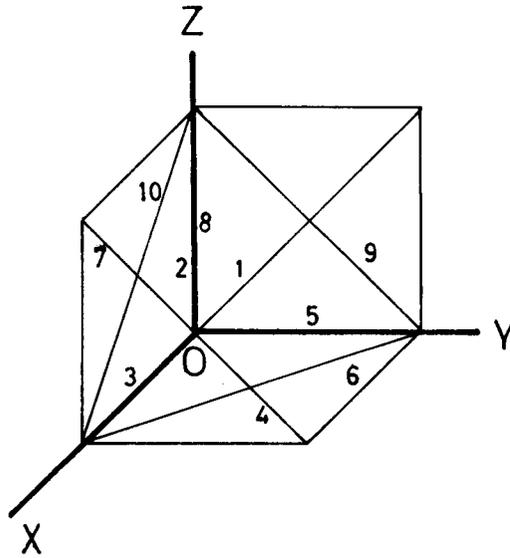


Fig. 2

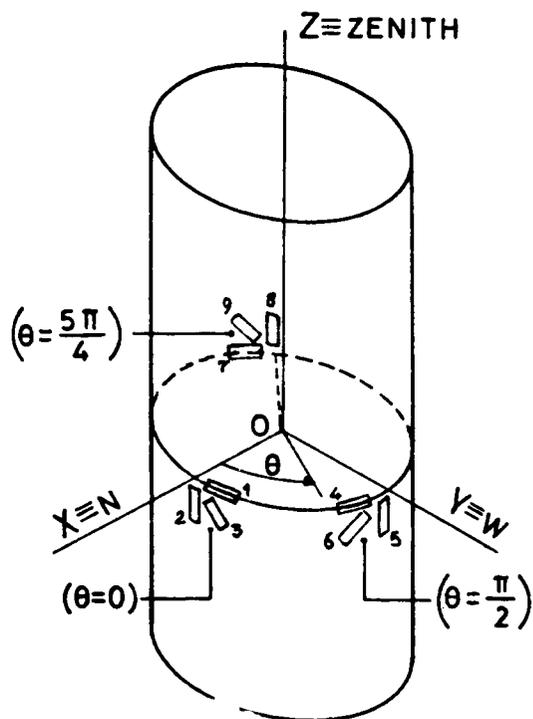


Fig. 3

2 – A NOVA CÉLULA

A disposição dos extensómetros atrás referida apresentava a forte desvantagem de introduzir na amostragem do estado de deformação uma anisotropia acentuada. Com efeito segundo o eixo oz tinham-se duas observações superabundantes e uma superabundante segundo o plano xy .

LOUREIRO PINTO estudou uma optimização de distribuição dos extensómetros e concluiu que utilizando 10 extensómetros, a disposição ideal seria segundo as faces dum icosaedro regular centrado na origem. A descrição de um tal tipo de célula foi feita posteriormente [CHARRUA-GRAÇA (1982)], mas só agora se procedeu à construção das primeiras células para utilização corrente.

Na Fig. 4 encontra-se representada a distribuição dos extensómetros num esquema planificado, e com as coordenadas angulares θ e α , de cada um, referentes respectivamente à direcção x e ao plano xy .

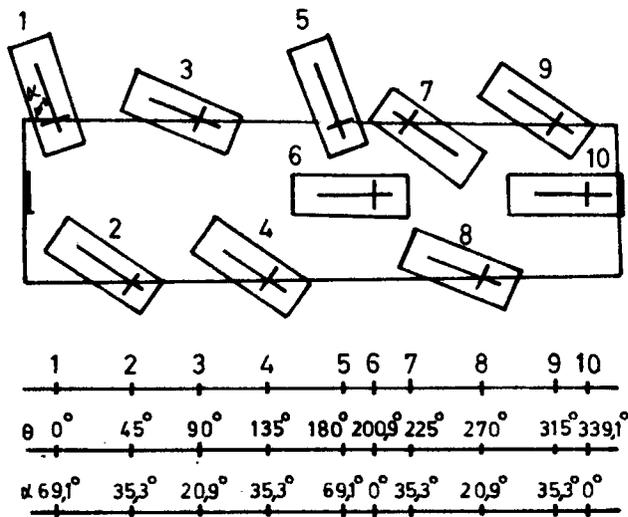


Fig. 4

Para além desta alteração, também a nova célula tem um comprimento muito inferior à anterior. Naquela o comprimento total era de 47 cm, e agora é de apenas 25 cm.

Tal redução de comprimento diminuirá o risco de insucesso devido ao encontro de descontinuidades. Com efeito, quanto menor for o comprimento, menor a probabilidade de ao longo dele se encontrar na rocha a que a célula é colada uma descontinuidade que possa originar deformação excessiva da célula durante a operação de sobrecarotagem.

3 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Em estudo anterior, OLIVEIRA PEDRO (1974), já tinha sido mostrado que um estado de tensão

$$P_x \ P_y \ P_z \ P_{yz} \ P_{xz} \ P_{xy}$$

produz num extensómetro qualquer (θ, α) uma extensão

$$\epsilon = \epsilon_z \sin^2 \alpha + \epsilon_\theta \cos^2 \alpha + \gamma_{\theta z} \sin \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

com

$$\epsilon_{\theta} = M'_1 \frac{P_x + P_y}{E} + N_2 \cos 2\theta \frac{P_x - P_y}{E} - M'_2 \frac{P_z}{E} + 2N_2 \sin 2\theta \frac{P_{xy}}{E}$$

$$\epsilon_z = -\nu \frac{P_x + P_y}{E} + \frac{P_z}{E}$$

$$\gamma_{\theta z} = M_3 \left(\cos \theta \frac{P_{yz}}{E} - \sin \theta \frac{P_{xy}}{E} \right)$$

sendo

$$M'_1 = 1,204165 + 0,083507\nu$$

$$M'_2 = 0,0835071 + 1,204165\nu$$

$$M_3 = 4,424179 (1 + \nu)$$

$$N_2 = -2,44402 (1 - \nu^2)$$

Aplicando a expressão (1) aos extensômetros da célula teremos

$$\epsilon \begin{cases} E \epsilon_1 = a P_x + b P_y + c P_z + d P_{yz} \\ E \epsilon_2 = e (P_x + P_y) + f P_z + d (P_{yz} - P_{xz}) + g P_{xy} \\ E \epsilon_3 = h P_x + i P_y + j P_z - d P_{xz} \\ E \epsilon_4 = l (P_x + P_y) + f P_z - d (P_{yz} + P_{xz}) - g P_{xy} \\ E \epsilon_5 = a P_x + b P_y + c P_z - d P_{yz} \\ E \epsilon_6 = l P_x + m P_y + n P_z + g P_{xy} \\ E \epsilon_7 = e (P_x + P_y) + f P_z - d (P_{yz} - P_{xz}) + g P_{xy} \\ E \epsilon_8 = h P_x + i P_y + j P_z + d P_{xz} \\ E \epsilon_9 = e (P_x + P_y) + f P_z - d (P_{yz} + P_{xz}) - g P_{xy} \\ E \epsilon_{10} = l P_x + m P_y + n P_z - g P_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

em que

$$a = -0,157861 - 0,883310\nu + 0,311178\nu^2$$

$$b = 0,464494 - 0,883310\nu - 0,311178\nu^2$$

$$c = 0,883310 - 0,153317\nu$$

$$d = -1,474726 (1 + \nu)$$

$$e = 0,802777 - 0,389005\nu$$

$$f = 0,389005 - 0,802777\nu$$

$$\begin{aligned}
g &= - 3,258693 (1 - \nu)^2 \\
h &= 3,183691 - 0,200197 \nu - 2,132842 \nu^2 \\
i &= - 1,081994 - 0,200197 \nu + 2,132842 \nu^2 \\
j &= 0,200197 - 1,050848 \nu \\
l &= 0,617500 - 0,083507 \nu + 1,821665 \nu^2 \\
m &= 3,025830 - 0,083507 \nu + 1,821665 \nu^2 \\
n &= 0,083507 - 1,204165 \nu
\end{aligned}$$

Sendo o sistema de equações anterior superabundante, dado ter mais quatro equações que as necessárias para uma solução bem determinada, o melhor processo resolutivo, por permitir obter a solução mais provável é a aplicação do método dos mínimos quadrados.

Escrevendo matricialmente o sistema (2) virá

$$[P] [A] = [B]^T$$

em que [P] é o vector das tensões

[A] a matriz 6×10 dos coeficientes

e [B] o vector das extensões multiplicado pelo módulo de deformabilidade

O sistema obtido por aplicação dos mínimos quadrados será

$$[B] [C] = [D]^T$$

em que [C] é uma matriz 6×6 de coeficientes, cujo termo geral é

$$C_{kl} = \sum_{j=1}^{10} a_{kj} a_{lj}$$

e [D] é um vector com o termo geral

$$d_k = \sum_{j=1}^{10} a_{kj} b_j$$

É fácil programar, mesmo para uma calculadora portátil, esta solução do sistema, bastando, para que se tenha sempre a solução mais provável, mesmo em caso de faltarem observações de algumas das extensões (até ao máximo de 4), anular as linhas da matriz [A] correspondentes às extensões não observadas.

4 – DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS

Como já foi referido anteriormente [CHARRUA-GRAÇA (1982)], para uma avaliação correcta do estado de tensão é necessário o conhecimento das constantes elásticas (nomeadamente do coeficiente de Poisson) com uma precisão superior à normalmente alcançada com os ensaios de compressão simples. A solução encontrada foi a da realização de ensaios biaxiais sobre o tarolo de rocha contendo a célula (Fig. 5).

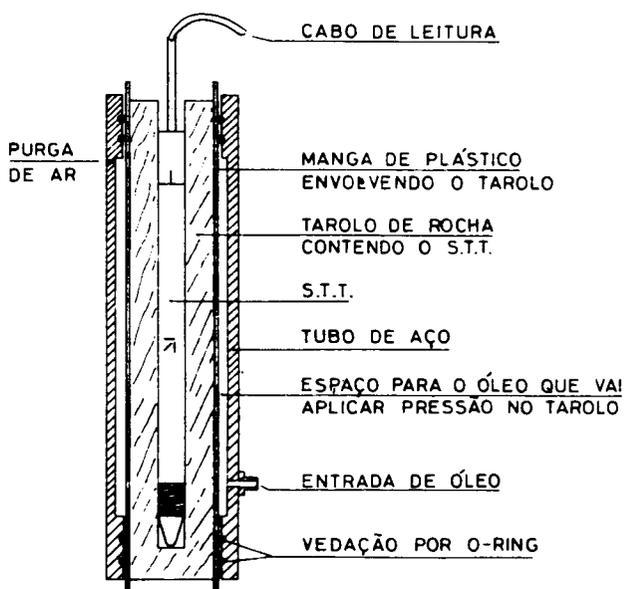


Fig. 5

Também no cálculo das constantes elásticas se pode utilizar o sistema de equações 2) simplificado para $P_x = P_y = P$ e $P_z = P_{yz} = P_{xz} = P_{xy} = 0$

ficaria então

$$\begin{aligned} & - 1,76462 \nu P + \epsilon_1 E = 0,306633 P \\ & - 0,77801 \nu P + \epsilon_2 E = 1,605554 P \\ & - 0,400394 \nu P + \epsilon_3 E = 2,601697 P \\ & - 0,77801 \nu P + \epsilon_4 E = 1,605554 P \\ & - 1,76462 \nu P + \epsilon_5 E = 0,306633 P \\ & - 0,1670 \nu P + \epsilon_6 E = 2,40833 P \\ & - 0,77801 \nu P + \epsilon_7 E = 1,605554 P \\ & - 0,400394 \nu P + \epsilon_8 E = 2,601697 P \\ & - 0,77801 \nu P + \epsilon_9 E = 1,60554 P \\ & - 0,1670 \nu P + \epsilon_{10} E = 2,40833 P \end{aligned}$$

Também a este sistema se deverá aplicar o método dos mínimos quadrados para obtenção da solução mais provável.

O Núcleo de Fundações Rochosas do LNEC dispõe de programas para calculadora HP41c que permitem resolver estes problemas, no campo, incluindo programas que aplicam o método dos mínimos quadrados a sistemas de equações até 10 equações e 6 incógnitas, bem como programas para determinação de valores próprios e vectores próprios de matrizes até 6.^a ordem.

5 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos colegas GROSSMANN, N.F. que sugeriu o método resolutivo deste sistema e LOUREIRO-PINTO, J. que corrigiu os cálculos que se apresentam.

BIBLIOGRAFIA:

- CHARRUA-GRAÇA, J.G. (1982) — Determination of the state of stress in rock masses by the «stress-tensor-tube» Method (STT) — 14th Int. Cong. ICOLD — RIO.
- FAMA, M.E. DUNCAN (1979) — Analysis of a solid inclusion in situ stress measuring device — 4th Int. Cong. ISRM — Montreux
- OLIVEIRA PEDRO, J. (1974) — Estudo das deformações de um cilindro plástico colocado no interior dum maciço rochoso — Rel. Int. Divisão de Estudos Especiais. LNEC.