

# NOVA FORMA DO DEFÓRMETRO DESENVOLVIDO PELO LNEC PARA A DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS

## A New Development of the LNEC Stress Tensor Gauge

por\*

MANUEL ROCHA\*\*, ARNALDO SILVÉRIO, J. OLIVEIRA PEDRO e J. SINTRA DELGADO

RESUMO – Como nova forma do defórmetro “STG” desenvolvido pelo LNEC para a determinação do estado de tensão em maciços rochosos, propõe-se uma camada cilíndrica definida pelos diâmetros 31 mm e 35 mm, com extensómetros eléctricos de resistência incluídos a meia-espessura da parede. O recente defórmetro tubular de plástico, que se instala como o seu antecessor num furo de sondagem EX, reduz substancialmente a incidência das situações práticas em que a sobre-carotagem de libertação das tensões determina a rotura da ligação defórmetro-rocha. Deduzem-se e aferem-se experimentalmente expressões analíticas que habilitam a calcular o estado completo de tensão no maciço em estudo, a partir das nove extensões medidas com o defórmetro.

SYNOPSIS – A new development is presented of the LNEC Stress Tensor Gauge, in the form of a hollow cylinder 2 mm thick (I.D. 31 mm, O.D. 35 mm), with electrical resistance strain gauges embedded midway from the inside to the outside surface. The recent plastic gauge, to be installed like its solid forerunner in a standard EX borehole, is claimed to substantially reduce the incidence of practical situations where the gauge to rock bond fails on stress-relief overcoring. Analytical expressions are deduced and checked, which enable the complete state of stress in the studied rock mass to be determined from the nine strains measured with the gauge.

---

\* À data da realização do trabalho, os autores desempenhavam no LNEC, respectivamente, as funções de Director; Especialista, Chefe da Divisão de Obras Subterrâneas; Especialista, Chefe da Divisão de Estudos Especiais; e Estagiário para Especialista.

\*\* Presidente do Conselho Superior dos Laboratórios de Engenharia Civil, Professor do Instituto Superior Técnico. GEOTECNIA 12

## INTRODUÇÃO

Há cerca de oito anos que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) vem a conduzir medições de tensões em furos de sondagem abertos em maciços rochosos, utilizando um defórmetro de fabrico próprio, que é correntemente designado na literatura pela sigla STG, tomada da designação em língua inglesa “Stress Tensor Gauge”. Essa célula, uma espécie de “doorstopper” tridimensional incluindo pelo menos nove extensómetros eléctricos de resistência activos, é um cilindro maciço de plástico, de diâmetro 35 mm e comprimento vizinho de 40 cm, concebido para ser instalado num furo de sondagem EX (Rocha e Silvério, 1969).

Quando se pretende determinar o estado de tensão inicial, o defórmetro instalado no maciço tem que ser sobre-carotado. A técnica de libertação de tensões, que tem sido utilizada, consta dos passos seguintes: (i) abrir um furo de sondagem de diâmetro não menor do que 7,5 cm (furo NX), até à vizinhança do ponto onde é necessário conhecer o estado de tensão; (ii) a partir do fundo desse furo de acesso, abrir um furo de sondagem coaxial, de diâmetro 3,7 cm (furo EX) e comprimento aproximado 90 cm; (iii) colar o defórmetro cilíndrico à parede deste furo de alojamento, por meio de um produto adesivo adequado; (iv) fazer leituras iniciais sobre todos os extensómetros eléctricos activos que constam do defórmetro; (v) mantendo os extensómetros ligados, através de um cabo eléctrico comum, a um indicador de extensões instalado à superfície do terreno, realizar uma sobre-carotagem de libertação de tensões, i.e., prosseguir a abertura do furo de maior diâmetro em torno do defórmetro incluído, numa extensão vizinha de 100 cm; e (vi) fazer leituras finais, de modo a determinar as extensões provocadas pela libertação de tensões, das quais se infere o estado de tensão que existia no ponto ensaiado.

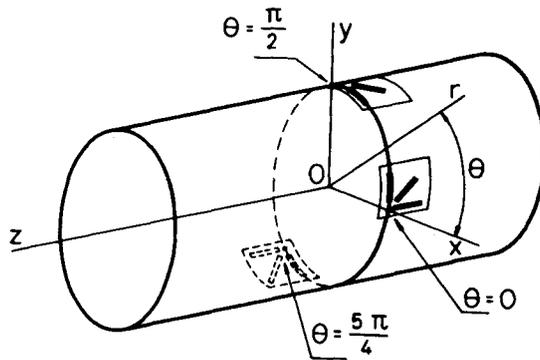
Como se requer que a ligação assegurada no passo (iii) se mantenha nos passos (iv) a (vi), investiu-se um esforço considerável na selecção do produto adesivo e no estabelecimento das suas melhores condições de utilização. A resina sintética fluida, de dois componentes, que se adoptou, tem duração em vaso (“pot life”) suficientemente longa para permitir a instalação do defórmetro orientado no furo de alojamento; polimeriza, tornando-se numa substância sólida cuja deformabilidade reproduz a do plástico do defórmetro; e, mesmo em meio húmido (designadamente, imersa em água), proporciona uma ligação defórmetro-rocha capaz de suportar as tensões

instaladas durante a sobre-carotagem. Por outro lado, o referido adesivo é conduzido até ao fundo do furo de alojamento num cartucho pregueado, ligado ao defórmetro; expelido quando as hastes de posicionamento da célula comprimem o cartucho, como um acordeão, contra o fundo do furo; e extrudido através do espaço anular compreendido entre o defórmetro e a parede do furo, o que começa por remover água e resíduos de sondagem eventualmente presentes e facultar superfícies limpas às quais mais facilmente adere o adesivo fresco.

Apesar de todos os cuidados, tem sido assaz frequente a rotura da ligação durante a sobre-carotagem, como consequência do facto de as tensões de compressão, que são predominantes nos maciços rochosos, instalarem tensões de tracção na ligação, quando são libertadas por sobre-carotagem. Ora, mesmo os adesivos seleccionados produzem ligações defórmetro-rocha cuja resistência não excede  $50 \text{ kgf/cm}^2$  ( $5 \text{ MN/m}^2$ ), conforme mostraram uns quantos ensaios da ligação, conduzidos à tracção sobre prismas de rocha e resina adesiva polimerizada. Portanto, a ligação rompe sempre que se torna sede de tensões induzidas de grandeza superior à indicada. Deve referir-se que sob as condições mais desfavoráveis, que ocorrem quando há libertação de uma compressão hidrostática num maciço rochoso de baixo módulo de deformabilidade, as tensões de tracção radiais que se instalam na ligação atingem mais de 90% da grandeza das tensões libertadas.

## DESCRIÇÃO DO NOVO DEFÓRMETRO

Embora tendo presente que raramente ocorrem tensões elevadas nos maciços rochosos muito deformáveis, o LNEC foi levado pelos mencionados insucessos a tentar alterar a geometria do defórmetro, com vista a reduzir as tensões de tracção instaladas na ligação. Para alcançar este objectivo sem alteração apreciável do esquema de operações estabelecido, substituiu-se o cilindro maciço por um cilindro oco e embeberam-se os extensómetros eléctricos de resistência a meia-distância entre as superfícies interna e externa do último. Para as dimensões adoptadas, a saber, D.I. 31 mm e D.E. 35 mm, mostrou o cálculo que as tensões radiais de tracção na ligação se mantêm aquém de 10% da grandeza das tensões libertadas, mesmo sob as condições mais desfavoráveis, a que já se fez referência.



*Fig. 1 – Geometria do defórmetro: configuração das rosetas e definição das coordenadas de referência*

A Fig. 1 é uma representação esquemática das três rosetas de extensómetros eléctricos que têm sido usadas, dispostas ao longo do equador do cilindro oco, a ângulos azimutais de  $0$ ,  $\pi/2$  e  $5\pi/4$ . Para precisar a definição destes ângulos, cada uma das rosetas é muitas vezes substituída por três extensómetros de pequena base independentes, centrados na mesma geratriz. Os nove extensómetros activos estão ligados a um cabo eléctrico, parcialmente embebido no plástico do cilindro para assegurar a perfeita estanquidade à água. Ao cabo está ainda ligado um extensómetro supranumerário, incluído numa camada de plástico de espessura 2 mm, aderente a um prisma da rocha, de dimensões aproximadas 5 cm x 1 cm x 1 cm. Este conjunto pende livremente dentro do corpo tubular do defórmetro, face aos extensómetros activos, que compensa de variações de temperatura ocorridas durante o ensaio.

## CÁLCULO DAS TENSÕES NO MACIÇO ROCHOSO

Ensaio preliminares, conduzidos em laboratório, mostraram que as rosetas de extensómetros do tubo não se comportam como se estivessem directamente aplicadas sobre a rocha da parede do furo. Isto significa que ao dispositivo em discussão não são aplicáveis as fórmulas gerais que Leeman e Hayes (1966) utilizaram para interpretar os resultados de determinações de estados de tensão obtidos com a sua célula de componentes múltiplos. Logo, houve que deduzir

expressões para as extensões na camada cilíndrica de plástico, devidas a um sistema de tensões na rocha circundante.

A hipótese básica do trabalho analítico empreendido foi a identidade dos deslocamentos que ocorrem num maciço rochoso em resultado da sobre-carotagem (i) do mero furo de alojamento, e (ii) do furo de alojamento com o defórmetro tubular incluído. Por outras palavras: para um dado estado de tensão actuando no maciço rochoso,  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ , as extensões na inclusão foram calculadas como extensões num revestimento de plástico a cuja superfície exterior tivessem sido impostos os deslocamentos que ocorreriam na parede do furo de alojamento se ele se mantivesse vazio. Além disso, tanto a rocha hospedeira como o plástico do defórmetro foram tratados como homogéneos, isotropos e elásticos lineares.

Para simplificar a tarefa empreendida, restringiu-se deliberadamente o estudo ao defórmetro específico em desenvolvimento. Por outro lado, teve-se presente que a resina adesiva seleccionada, cuja deformabilidade reproduz a do plástico do tubo, tem como efeito mecânico exclusivo o acréscimo de 2 mm do diâmetro externo do defórmetro tubular instalado. Assim, o sistema que efectivamente se tratou constava de um material rochoso de características elásticas  $E, \nu$ , com um furo de diâmetro 37 mm revestido de uma camada de espessura 3 mm de um plástico cujos módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson eram, respectivamente,  $E' = 29,5 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 (2,95 \text{ GN/m}^2)$  e  $\nu' = 0,409$ .

As extensões induzidas no revestimento por cada componente do estado de tensão foram calculadas separadamente e sobrepostas. Para as componentes  $\sigma_z, \tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$  obtiveram-se soluções exactas, enquanto que para as componentes  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  foram usadas soluções numéricas (método dos elementos finitos). Em ambos os casos, tomaram-se polinómios do terceiro grau como aproximações das funções definidoras da variação das extensões através da espessura do revestimento. No caso das soluções numéricas, tais funções foram obtidas por recurso ao método dos mínimos quadrados.

Referidos aos eixos coordenados associados ao cilindro na Fig. 1, sejam  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$  o estado de tensão ocorrente no maciço rochoso não perturbado pelo furo de ensaio,  $(r, \Theta, z)$  um ponto na camada de plástico, e

$$\rho = r - 15,5 \text{ (mm)}$$

a distância radial da superfície interna (livre) da camada ao ponto  $(r, \Theta, z)$ . As extensões no ponto  $(r, \Theta, z)$ , devidas ao estado de tensão  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ , foram calculadas como

$$\begin{aligned}\epsilon_r' &= M_1(\sigma_x + \sigma_y) + N_1(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\Theta - M_2\sigma_z + 2N_1\tau_{xy}\sin 2\Theta \\ \epsilon_\Theta' &= M_1'(\sigma_x + \sigma_y) + N_2(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\Theta - M_2'\sigma_z + 2N_2\tau_{xy}\sin 2\Theta \\ \epsilon_z' &= M_3'(\sigma_x + \sigma_y) + M_3\sigma_z \\ \gamma_{r\Theta}' &= N_3(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\Theta - 2N_3\tau_{xy}\cos 2\Theta \\ \gamma_{\Theta z}' &= N_4(\tau_{yz}\cos \Theta - \tau_{zx}\sin \Theta) \\ \gamma_{zr}' &= N_4'(\tau_{yz}\sin \Theta + \tau_{zx}\cos \Theta)\end{aligned}$$

onde

$$\begin{aligned}M_1 &= [(0,20589 - 1,13124S) + v(0,32479 + 0,46268S)]/E \\ M_1' &= [(0,20589 + 1,13124S) + v(0,32479 - 0,46268S)]/E \\ M_2 &= [(0,20589 - 1,13124S)v + (0,32479 + 0,46268S)]/E \\ M_2' &= [(0,20589 + 1,13134S)v + (0,32479 - 0,46268S)]/E \\ M_3 &= 1/E \\ M_3' &= -v/E \\ N_1 &= (1 - v^2) R/E \\ N_2 &= (1 - v^2) T/E \\ N_3 &= (1 - v^2) G/E \\ N_4 &= 2,35021 (1 + v) (1 - S) /E \\ N_4' &= 2,35021 (1 + v) (1 + S) /E \\ S &= 1 - 0,12903 \rho + 0,01249 \rho^2 - 0,00107 \rho^3 \\ R &= 1,99153 - 0,45924 \rho + 0,09937 \rho^2 - 0,00987 \rho^3 \\ T &= -2,87410 + 0,52370 \rho - 0,10184 \rho^2 + 0,00822 \rho^3 \\ G &= -1,24033 \rho + 0,18849 \rho^2 - 0,01559 \rho^3\end{aligned}$$

Como primeiro passo na verificação destas expressões, pode aplicar-se a lei de Hooke às componentes do estado de extensão em  $\rho = 0$  (superfície interna da camada de plástico) para mostrar que, desprezando aproximações numéricas, as correspondentes tensões resultam de facto nulas na superfície livre do plástico. Por outro lado, pode notar-se que em  $\rho = 3$  mm (fronteira plástico-rocha) as componentes do estado de extensão  $\epsilon_\Theta'$ ,  $\epsilon_z'$  e  $\gamma_{\Theta z}'$  reproduzem muito aproximadamente as conhecidas extensões que se desenvolvem na parede do furo de alojamento, quando este é aberto através do maciço rochoso sob tensão (por exemplo, Leeman e Hayes, *loc. cit.*).

As expressões acima são usadas, com  $\rho = 1$  mm, para computar as extensões nos três pontos de medição, como funções lineares das tensões libertadas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$ . Desde que àquelas extensões se atribuem os nove valores determinados num ensaio, obtém-se um sistema linear de nove equações a seis incógnitas, cuja resolução pelo método dos mínimos quadrados fornece os valores mais prováveis das componentes do estado de tensão,  $\sigma_x$  a  $\tau_{zx}$ . Finalmente, podem calcular-se as tensões principais no maciço rochoso, definidas em grandeza e direcção respectivamente pelos valores próprios e vectores próprios da matriz das componentes do estado de tensão.

Para assistir à execução de todos os passos referidos estabeleceu-se um programa de cálculo automático.

## AFERIÇÃO DO MÉTODO

A fim de apreciar a validade das expressões deduzidas, bem como a eficiência da célula modificada, realizaram-se ensaios em laboratório sobre cilindros de rocha de altura 90 cm e diâmetro 12 cm, em cada um dos quais se abriu um furo axial de diâmetro 37 mm onde se alojou um defórmetro tubular.

Os provetes, de mármore, gnaïsse ou basalto, eram envolvidos numa manga de plástico, confinados lateralmente numa câmara de pressão e carregados axialmente numa máquina de ensaios de compressão. Os programas de carga principiavam com uma compressão uniaxial, uma compressão lateral, ou ainda uma compressão hidrostática em redor do provete, na qual este era solicitado por tensões iniciais tão elevadas quanto a resistência da rocha permitia. A tensão máxima de ensaio precedia, na primeira carga, o endurecimento da resina adesiva, e era mantida até que se tivesse estabelecido a ligação defórmetro-rocha. O provete era então descarregado, por decrementos, a uma taxa média que pretendia simular o ritmo da libertação de tensões durante a sobre-carotagem *in situ*, e submetido a uns poucos ciclos de carga-descarga para mais completa apreciação da ligação.

As componentes do estado de extensão na camada de plástico foram medidas com os extensómetros eléctricos embebidos, enquanto que as deformações da rocha hospedeira tinham sido medidas previamente com rosetas de extensómetros eléctricos de resistência coladas às superfícies internas e externas dos provetes. Na Fig. 2, em que se exemplificam os resultados obtidos sobre

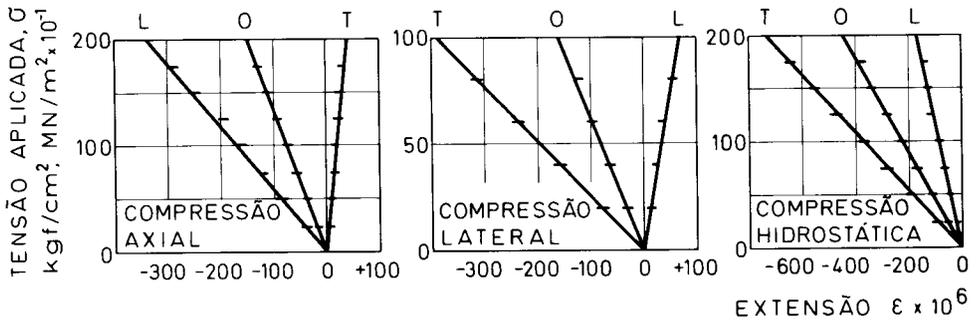


Fig. 2 – Ensaio de compressão de cilindros de diorito ( $E = 652 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 = 65,2 \text{ GN/m}^2$ ,  $\nu = 0,20$ ): extensões calculadas (diagramas rectilíneos) e intervalos das extensões medidas (barras), representados, contra as tensões impostas, para extensómetros do defórmetro com as orientações longitudinal (L), transversal (T) e a  $45^\circ$  (obliqua, O).

cilindros de diorito, representam-se conjuntamente os intervalos das extensões medidas e os diagramas rectilíneos das extensões impostas, derivados das expressões estabelecidas.

Noutro conjunto de ensaios em laboratório, actualmente em curso, incluem-se defórmeters tubulares em prismas de rocha de altura 84 cm, com bases quadradas de área  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ , os quais se ensaiam como foi descrito num artigo anterior (Rocha e Silvério, *loc. cit.*). Nos provetes, o furo de alojamento é longitudinal (entre os centros das bases), transversal (entre os centros de faces laterais opostas) ou oblíquo (no plano definido pelas direcções anteriores e à distância angular  $45^\circ$  de cada uma delas). Tem-se verificado uma concordância satisfatória entre os estados de tensão impostos e medidos.

O método está a ser aplicado a problemas práticos, tanto no País como no estrangeiro.

## CONCLUSÕES

Na medida em que é muito menos rígido que o seu antecessor, o cilindro oco reduz substancialmente a incidência das situações práticas em que a sobre-

carotagem de libertação das tensões determina a rotura da ligação célula-rocha. Por outro lado, o defórmeter tubular não levantou dificuldades de instalação que não tivessem sido resolvidas durante o desenvolvimento do defórmeter maciço. Assim, a nova forma deve ser creditada como um aperfeiçoamento ao método e preferida à anterior em todas as aplicações que envolvam sobre-carotagem de libertação de tensões.

Presentemente, a prescrição do defórmeter maciço está restrita a observações a longo prazo de estados de tensão de compressão, de grandeza crescente.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LEEMAN, E. R. e D. J. HAYES – *A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole*, Proc., 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. 2, 1966, pp 17-24.
- ROCHA, M. e A. SILVÉRIO – *A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses*, Géotechnique, Vol. 19, No. 1, 1969, pp 116-132.