

Determinação de Tensões em Estruturas de Concreto - A Célula Triaxial Modelo Furnas

J. L. Armelin, FURNAS; S. V. Fleury, FURNAS e J. D. Piovezani, FURNAS.

Resumo - Estruturas de concreto, como as barragens, podem estar submetidas a níveis de tensões por vezes superiores à própria resistência do concreto devido a fatores como patologias do concreto e alterações nas condições hidrogeológicas existentes na fundação. As operações para a determinação dessas tensões devem empregar métodos que exijam intervenções discretas nas estruturas, utilizando espaços exíguos, como é o caso de casas de força e galerias e a um custo adequado, para possibilitar a realização de um maior número de determinações. Um dos métodos que atendem esses requisitos é o da sobrefuração (overcoring), amplamente utilizado na determinação de tensões em maciços rochosos. Este artigo relata o desenvolvimento de uma célula triaxial adequada a essas determinações.

Palavras-chave—Tensões – Estruturas - Concreto.

I. INTRODUÇÃO

A célula triaxial para determinação de tensões em estruturas de concreto, em desenvolvimento no Departamento de Apoio e Controle Técnico – DCT.T de FURNAS - Goiânia, teve como modelo de partida a célula triaxial, designada defômetro tridimensional ou “stress tensor tube”, criada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, LNEC (Rodrigues et al. [1], Pinto [2] e Rocha et al. [3]).

Em seu desenvolvimento procurou-se superar algumas deficiências encontradas naquele modelo quando de sua utilização pela equipe técnica de FURNAS e, também, aumentar sua sensibilidade.

Paralelamente a esse desenvolvimento, modificou-se o sistema de transmissão e aquisição de dados que, atualmente, funciona acoplado à célula triaxial, no interior do furo, eliminando-se assim o cabo de transmissão dos dados, de utilização trabalhosa e demorada.¹

Complementarmente foi desenvolvido um programa de computador para a adequada ordenação dos dados adquiridos, evitando assim um trabalho manual demorado e que, freqüentemente, conduzia a erros. Esse programa pode

também calcular o tensor das tensões para meios admitidos como isotrópicos.

Melhorias no sistema de sobrefuração (overcoring) foram também introduzidas, adaptando-se algumas peças diamantadas, utilizando-se essencialmente os diâmetros usualmente empregados em sondagens.

II. EXPERIÊNCIA ANTERIOR

A experiência de FURNAS na aplicação do método da sobrefuração (overcoring) está calcada na utilização do terceiro tipo de célula triaxial desenvolvido pelo LNEC (Armelin et al. [4] [5] e Matos & Armelin [6]). Neste modelo o elemento sensível consiste em um tubo de resina EPÓXI com baixo módulo de elasticidade, tendo 27,2 cm de altura e diâmetro de 35 mm. A espessura da parede é de 2 mm e, no interior dessa parede estão coladas as rosetas, cada uma com três extensômetros com grades de 5 mm, dispostas segundo três geratrizes fazendo entre si ângulos de 0°, 90° e 225° respectivamente.

Em cada roseta os extensômetros estão arrançados de forma que um deles tenha seu eixo longitudinal disposto paralelamente ao eixo da célula, um segundo extensômetro com seu eixo disposto ortogonalmente ao primeiro e, um terceiro, disposto a 45° ou 135° em relação ao primeiro extensômetro (Figura 1).

Para simplificar cálculos, os extensômetros são colados com seus centros sobre cada uma das três geratrizes, abaixo e acima de uma dada seção transversal, o que, evidentemente, acarreta a introdução de uma pequena “hipótese simplificadora” que consiste em se poder considerar os unitários das direções, em cada roseta, pertencentes todos a um mesmo plano tangente ao cilindro, pela geratriz que define a roseta, isto é, que todos têm o mesmo azimute em relação ao referencial local. Esse arranjo não configura, exatamente, uma roseta.

Este tipo de célula contém três extensômetros paralelos ao eixo do cilindro, o que restringe o número de extensômetros dispostos segundo outras direções.

¹ Os autores agradecem a FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., por possibilitar o desenvolvimento e testes relatados, assim como sua divulgação.

J. L. Armelin – Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A

S. V. Fleury – Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A

J. D. Piovezani – Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A

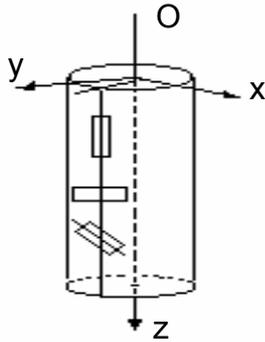


Figura 1: Visão esquemática da distribuição dos extensômetros elétricos de uma roseta em uma célula modelo LNEC.

Para superar essas deficiências esta célula evoluiu para um novo modelo, com dez extensômetros dispostos segundo as direções dos eixos de simetria de terceira ordem do dodecaedro ou do icosaedro e com seus centros contidos em três seções transversais, espaçadas 10mm uma da outra e situadas na região central do cilindro, não havendo nenhum extensômetro paralelo ao eixo da célula [2]. Esse arranjo possibilita uma amostragem mais equilibrada do estado de tensão dada a igualdade do ângulo sólido correspondente a cada direção amostrada. Tem ainda a vantagem de permitir a determinação do estado de tensão completo desde que pelo menos seis dos dez extensômetros estejam funcionando.

Embora apresente inegáveis aperfeiçoamentos, o modelo ainda não incorpora o conceito de roseta de extensômetros, o que faz com que seja susceptível às heterogeneidades da rocha à escala dos seus cristais, uma vez que os extensômetros utilizados têm bases de medida com comprimento de 4mm e não estão agrupados em “um mesmo ponto”. Durante as operações de sobrefuração (overcoring) os extensômetros, por guardarem alguma distância entre si, não são sensibilizados ao mesmo tempo, amostrando assim, a cada instante do processo, diferentes estados de tensão, nem sempre de fácil superposição.

III. DESENVOLVIMENTO DA CÉLULA TRIAXIAL MODELO FURNAS

Na célula cujo desenvolvimento é aqui relatado, o elemento sensível também é constituído por um tubo de EPÓXI, porém com 1mm de espessura e 230mm de altura e diâmetro externo de 34,7mm, com relação altura/diâmetro igual a 6, eliminando-se assim o efeito das restrições das extremidades do tubo, restrições essas que são minimizadas uma vez que o tubo é fixado às peças rígidas através de material

extremamente deformável. Sobre a seção central do tubo situam-se as rosetas [4].

As dimensões do tubo foram definidas com base em uma modelagem numérica. As rosetas, por sua vez, são coladas na parte externa do tubo e protegidas contra a ação da umidade por uma delgada camada de EPÓXI. Cada roseta dispõe de quatro extensômetros elétricos de resistência sobrepostos a uma base comum, de forma que seus centros são coincidentes, definindo assim o centro da roseta. As três rosetas estão dispostas a $\theta = 0^\circ$, $\theta = 120^\circ$ e $\theta = 240^\circ$, com θ aumentando no sentido horário em torno da superfície cilíndrica do tubo quando a seção transversal é observada segundo uma vista de topo. Para evitar que mais de um extensômetro tivesse seu eixo disposto paralelamente ao eixo da célula, as rosetas situadas a $\theta = 120^\circ$ e $\theta = 240^\circ$ foram giradas de 30° e 15° , ambas no sentido horário, em torno do eixo que passa pelo seu centro e é perpendicular ao eixo da célula (Figura 2). No interior da célula está alojado um pequeno paralelepípedo de rocha, proveniente do maciço no qual a célula será utilizada, com um extensômetro colado em sua superfície para correção dos efeitos de variação da temperatura (dummy gage).

Nesta célula supõe-se instalado um *referencial cartesiano local*, Oxyz da seguinte maneira: origem O arbitrária com o eixo Oz coincidente com o eixo do tubo e unitário \hat{k} , apontando no sentido da extremidade inferior da célula, considerando-se que sua utilização será sempre na vertical descendente, e eixos Ox e Oy, de unitários \hat{i} e \hat{j} , arbitrariamente dispostos na seção transversal do tubo mas de forma tal que o sistema Oxyz seja direto (Figura 2).

Após a colagem de um extensômetro, o seu eixo torna-se um arco de circunferência ou de elipse. A tangente a esse arco pelo centro do extensômetro é a direção segundo a qual o extensômetro fornecerá a medição da elongação. Os eixos dos quatro extensômetros são concorrentes num ponto da parede do cilindro e, nesse caso, tem-se instalada ali uma roseta extensométrica. O ponto de concurso dos eixos dos extensômetros é o centro da roseta e, também, os centros dos extensômetros (Figura 2). Dessa forma, pode-se, efetivamente, introduzir o conceito de roseta de extensômetros uma vez que cada conjunto de quatro extensômetros está agrupado em torno de um “ponto” da parede da célula, diferentemente da célula anteriormente descrita em que os extensômetros tinham seus centros dispostos sobre uma geratriz da célula, porém estavam espaçados entre si.

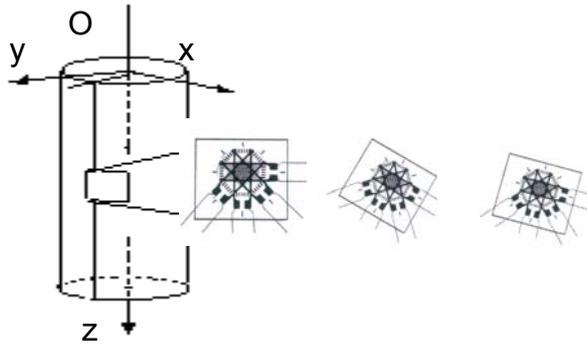


Figura 2: Visão esquemática da distribuição das rosetas na célula modelo FURNAS, notando-se a rotação imposta às mesmas.

Nas rosetas, os extensômetros fazem entre si ângulos múltiplos de 45° . Tudo se passa como se o “ponto” onde se vai determinar o tensor de deformações fosse um ponto do eixo da célula, que está muito “próximo” de todos os extensômetros. A direção “por esse ponto” - ou, o que é a mesma coisa, por um ponto próximo, pertencente à superfície lateral do cilindro - em relação à qual será medida a elongação - é definida por um vetor unitário \hat{n} que está contido no plano tangente ao cilindro. Podemos definir essa direção em relação ao referencial local, Oxyz, através de um azimute, que é o ângulo θ que define a geratriz do cilindro, e um mergulho, ϕ , que é o ângulo que \hat{n} faz com o plano xOy. Essa disposição parece ser interessante porque não admite extensômetros paralelos e permite uma coleta de dados bem distribuída na seção transversal.

A posição da célula em relação ao sistema global pode ser qualquer. Um dispositivo eletrônico foi desenvolvido com a

finalidade de se determinar o azimute do eixo Ox em relação ao norte magnético, o que permitirá, com operações topográficas adicionais, porém simples, determinar o norte magnético em relação ao referencial global.

A. TESTES “IN SITU”

Os testes *in situ* já realizados evidenciaram o aumento da sensibilidade da célula modelo FURNAS em relação à célula modelo LNEC. Esse aumento foi conseguido com a redução da espessura da parede da célula, de 2 mm no modelo LNEC, para 1 mm no modelo FURNAS. Os gráficos das Figuras 3 e 4 permitem a visualização desse ganho de sensibilidade uma vez que correspondem ao alívio das deformações através da sobrefuração (overcoring).

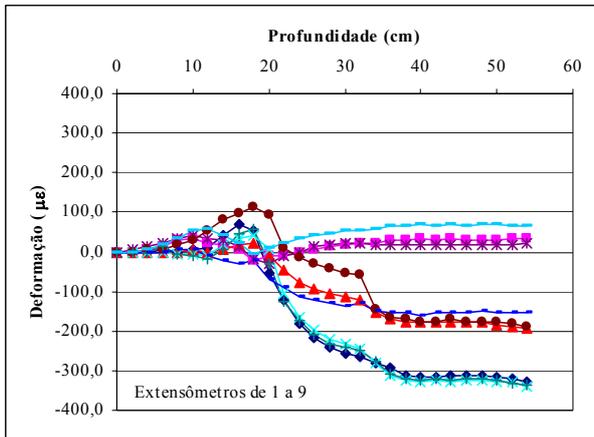


Figura 3: Célula modelo LNEC.

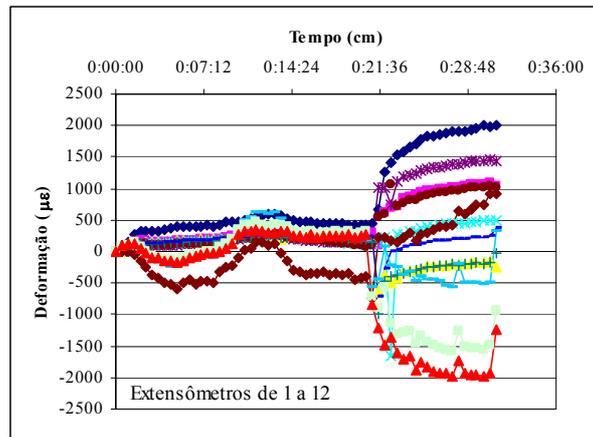


Figura 4: Célula modelo FURNAS.

Os gráficos em questão foram elaborados a partir de resultados de ensaios *in situ*, em um mesmo meio rochoso e como se pode observar, a sensibilidade da célula modelo FURNAS é cerca de seis vezes maior que a da célula modelo LNEC.

Digno de nota também é o fato de que na célula modelo LNEC o alívio das tensões não ocorre simultaneamente para todos os extensômetros uma vez que os mesmos não estão dispostos segundo uma roseta verdadeira e sim, segundo uma geratriz (Figura 3). No caso da célula modelo FURNAS

tal fato não se verifica, com os alívios ocorrendo todos ao mesmo tempo, como pode ser visto na Figura 4.

B. TESTES EM LABORATÓRIO

Estão previstos testes destinados à determinação do módulo de Young, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento em três blocos cúbicos, com 500 mm de aresta, simulando, cada um deles, o meio isotrópico, transversalmente isotrópico e ortotrópico, respectivamente. Nos três casos os

blocos estarão instrumentados com um arranjo triortogonal de extensômetros elétricos de resistência dispostos próximos ao centro de cada bloco.

Numa segunda etapa, três outros blocos, similares aos anteriores, serão moldados e submetidos a um estado de tensão triaxial. Neles serão instaladas, em uma posição qualquer, células modelo FURNAS, que terão seu desempenho avaliado através de ciclos de variações desse estado de tensão em ensaio de compressão triaxial

verdadeiro. Após esta fase inicial e com a fixação de um determinado estado de tensão, será executada a sobrefuração (overcoring). Os dados assim obtidos serão analisados por métodos analíticos e comparados com os resultados da modelagem numérica dos ensaios.

Um primeiro teste deste tipo já foi executado em um bloco transversalmente isotrópico (Figura 5), fornecendo os gráficos das Figuras 6 e 7.



Figura 5: Ensaio triaxial – Notar à direita o barrilete para execução da sobrefuração (overcoring).

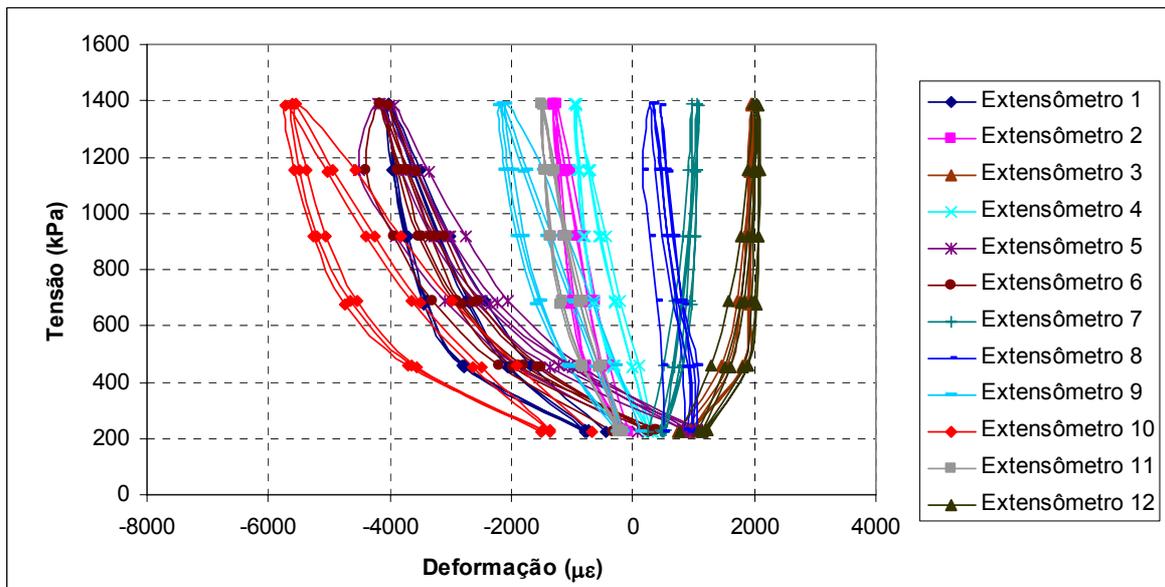


Figura 6: Ensaio triaxial – Ciclos de carregamento / descarregamento.

No gráfico tensão x deformação da Figura 6, a tensão considerada foi a tensão principal intermediária σ_2 , atuando na direção Ox em um sistema de eixos ortonormado

conforme definido anteriormente. Foram apresentados apenas os três ciclos finais uma vez que o ciclo inicial foi considerado como um ciclo de acomodação do sistema de

aplicação das forças. Após o final do descarregamento em cada ciclo foi mantida uma tensão de 200 kPa, evitando-se assim o descarregamento total.

Através desta Figura nota-se que a célula apresenta uma boa repetibilidade, mesmo em se tratando de um meio transversalmente isotrópico.

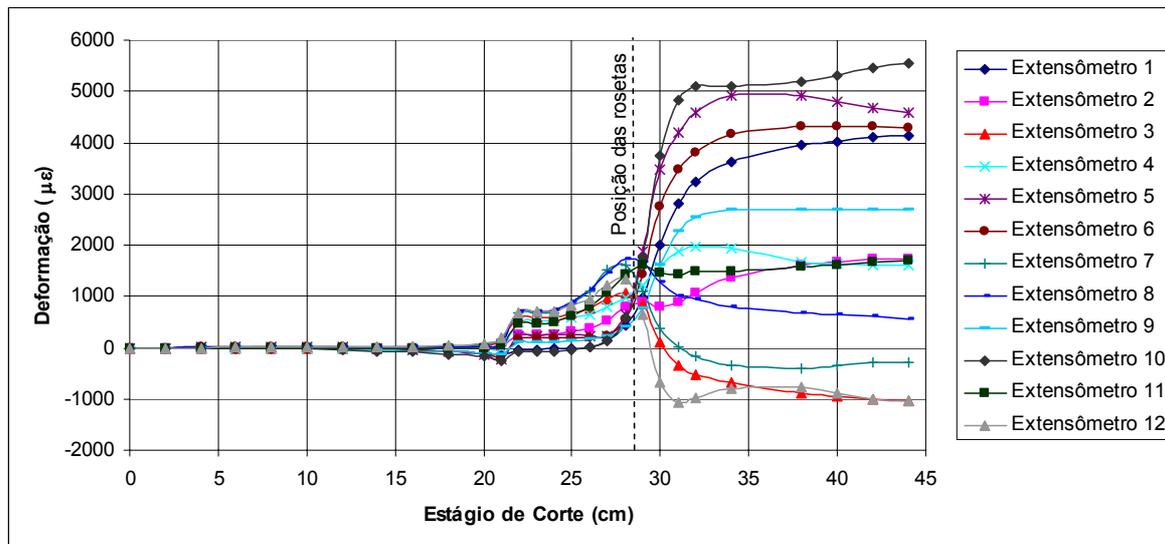


Figura 7: Ensaio triaxial – Deformações x distância.

No gráfico da Figura 7 são apresentadas as deformações indicadas pelos doze extensômetros *versus* a distância da ferramenta de corte até o ponto onde se localizavam as rosetas extensométricas, indicado pela linha tracejada vertical. Digno de nota é que no ponto correspondente a 20 cm de perfuração houve a necessidade de um descarregamento para ajuste da faixa de deformação de um dos extensômetros, com a célula acusando, de forma coerente, este evento.

Como já mencionado anteriormente por ocasião da realização do teste *in situ*, o alívio ocorre num mesmo momento para todos os extensômetros, com o alívio total ocorrendo a cerca de 6 centímetros após a passagem da ferramenta de corte pela posição das rosetas.

IV. OUTROS DESENVOLVIMENTOS

Paralelamente ao desenvolvimento da célula propriamente dita, foram pesquisados e desenvolvidos produtos e dispositivos para possibilitar o emprego dessa célula e, também, para minimizar os erros decorrentes de alguns processos obrigatórios dentro da seqüência necessária à realização dos testes.

A experiência tem evidenciado a dificuldade representada pela necessidade de colagem de células desse tipo em superfícies úmidas como é, freqüentemente, o caso dos furos destinados a esse tipo de determinação. Neste caso, após diversos testes em laboratório, foi identificado um tipo de resina EPÓXI, disponível no mercado nacional, que possibilita uma colagem rápida e eficiente nessas superfícies.

O primeiro modelo do módulo de aquisição de dados, que permite eliminar os cabos de condução dos sinais anteriormente utilizados, já teve seu desempenho avaliado com os testes realizados *in situ* e já estão sendo introduzidos alguns aperfeiçoamentos como o aumento do número de canais de 12 para 16, o que possibilitará, no futuro, o emprego de mais extensômetros, a substituição da bússola digital, de desempenho suspeito nesses casos, por um sistema a laser para o posicionamento da célula, a ampliação da capacidade de memória para possibilitar a dilatação do tempo de aquisição dos dados e o estabelecimento de um intervalo de apenas 15 segundos entre cada aquisição, em contraposição aos 30 segundos disponíveis atualmente. A Figura 8 mostra a célula triaxial acoplada ao módulo de aquisição de dados.



Figura 8: Célula triaxial acoplada ao módulo de aquisição de dados.

Com relação aos equipamentos destinados à sobrefuração (overcoring), encontram-se em fabricação, por uma empresa nacional, coroas com diâmetro HX (98,9 mm) com perfil escalonado. Estas terão como função diminuir a pressão exercida pela face da coroa sobre a rocha à sua frente durante a sobrefuração de forma que o bulbo de pressões assim gerado não afete os extensômetros elétricos da célula triaxial durante as determinações. Esta alteração deve-se ao fato de o diâmetro HX, adotado agora como padrão, ser menor do que o diâmetro SW (200 mm), tradicionalmente empregado, o que acarreta uma proximidade maior entre a ferramenta de sobrefuração e as rosetas da célula, o que pode gerar dados espúrios.

Para testar o desempenho das coroas HX escalonadas quando comparadas com as coroas HX normais, estão previstos testes de sobrefuração em dois blocos cúbicos de argamassa, com 50 cm de aresta, isotrópicos, ambos instrumentados com a célula triaxial aqui descrita.

V. CONCLUSÕES

O desenvolvimento dessa nova célula triaxial teve o objetivo de superar algumas deficiências encontradas no modelo anteriormente utilizado por FURNAS, apresentando as seguintes melhorias:

- Possibilita doze diferentes direções de medida em lugar das sete da célula anteriormente utilizada;
- O ângulo sólido sob o qual o estado de tensão é amostrado em cada roseta é igual para as três rosetas dado que cada uma delas é constituída por uma única base, com quatro grades extensométricas iguais e superpostas;
- A célula é mais sensível em função da menor espessura da parede;
- O alívio das tensões ocorre num único instante, para os doze extensômetros;
- A célula é mais curta, exigindo, portanto, menor comprimento de sobrefuração, acarretando um

menor tempo para a operação, com menor custo;

- Utiliza equipamentos de sondagem dentro dos padrões rotineiramente empregados;
- Com a utilização do módulo de aquisição de dados acoplado à célula sua instalação torna-se mais rápida em função da eliminação dos cabos de aquisição de dados e das hastes de posicionamento;
- Para meios admitidos como isotrópicos, é possível a obtenção rápida do tensor de tensões.

Como ponto para avaliação durante as futuras utilizações destaca-se a determinação das incertezas de medição atribuíveis à célula.

VI. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., por possibilitar o desenvolvimento e testes relatados, assim como sua divulgação. Os agradecimentos se estendem também ao Técnico Nilvane Teixeira Porfirio pelas sugestões e dedicação com que conduziu os trabalhos.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RODRIGUES, F. P.; GRAÇA, J.G.C.; PINTO, J.L.; PEDRO, J.O.; FERREIRA, M.J.E.; GROSSMAN, N.F. (1983) – Desenvolvimentos Recentes no Domínio da Mecânica das Rochas - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC – Lisboa, 292 pp.
- [2] PINTO, J. L. (1990) – Novo Tipo de Aparelhagem para a Execução de Ensaios com o Defômetro Tridimensional (STT) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC – Relatório Interno – Lisboa, 13 pp.

- [3] ROCHA, M.; SILVÉRIO, A.; PEDRO, J.O.; DELGADO, C. (1974) – A New Development of the LNEC Stress Tensor Gauge - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC – Lisboa, 1974 – 11 pp.
- [4] ARMELIN, J.L.; FLEURY, S.V.; ASSIS, A.P., (2003) – Desenvolvimento de Célula Triaxial para a Determinação de Tensões *In Situ* – 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas – ABMS/ITA – São Paulo, 8 pp.
- [5] ARMELIN, J.L.; CAPRONI JR., N.; MATOS, M.M. (1994) – Análise Comparativa de Resultados de Instrumentação para Medição de Tensões Originais em Maciços Rochosos - 1º Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas – ABMS/CBMR – Foz do Iguaçu, 7 pp.
- [6] MATOS, M.M.; ARMELIN, J.L. (1994) – Tensões Originais do Maciço Rochoso de Serra da Mesa. – 1º Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas – ABMS/CBMR – Foz do Iguaçu, 6 pp.