

CONFIDENCIAL



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ESTADO DE TENSÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

RELATÓRIO 14/90 – NFR

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NÃO CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS

Núcleo de Fundações Rochosas

Proc. 045/13/9243

ESTADO DE TENSÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

RELATÓRIO 14/90 – NFR

Lisboa, Novembro de 1989

Estudo subsidiado pelo PIDDAC

**I&D
BARRAGENS**

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA
e-mail: lnec@lnec.pt
www.lnec.pt

Digitalizado no Setor de Divulgação Científica e Técnica do LNEC

2022

ESTADO DE TENSÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

RESUMO

O presente trabalho aborda a origem do estado de tensão interna dos maciços rochosos e apresenta os factores que o influenciam.

Apresentam-se as técnicas e a aparelhagem correntemente utilizada na determinação do estado de tensão, bem como a interpretação dos ensaios mais comuns, dando-se maior relevo aos ensaios com macacos planos pequenos (SFJ) e com o extensômetro tridimensional (STT), efectuados correntemente pelo LNEC.

STATE OF STRESS OF ROCK MASSES

SYNOPSIS

This work deals with the origin of the internal state of stress of the rock masses, and presents the factors which influence it.

The techniques and equipments generally used in the determination of the state of stress, as well as the interpretation of the most common test types, namely the small flat jack (SFJ) and the stress tensor tube (STT) tests, performed by the LNEC, are also presented.

ETAT DE CONTRAINTE DES MASSIFS ROCHEUX

RESUME

Ce travail s'occupe de l'origine de l'état de contrainte naturelle du massif rocheux, et présente les phénomènes qui l'influencent.

On présente les techniques et l'appareillage couramment utilisés pour la détermination de l'état de contrainte, ainsi que l'interprétation des essais les plus communs, une attention spéciale étant donnée aux essais aux petits vérins plats (SFJ) et à l'extensomètre tridimensionnel (STT).

ÍNDICE

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - ORIGEM DO ESTADO DE TENSÃO	2
2.1 - Acção do peso próprio	2
2.2 - Tensões de origem tectónica	2
2.3 - Tensões residuais	4
3 - FACTORES QUE INFLUENCIAM O ESTADO DE TENSÃO	5
3.1 - Generalidades	5
3.2 - Heterogeneidade	5
3.3 - Topografia	5
3.4 - Acção da água	5
3.5 - Efeito das propriedades físicas	6
3.6 - Acção do homem	6
4 - MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO	6
4.1 - Introdução	6
4.2 - Determinação do estado de tensão em furos de sondagem com sobrecarotagem	7
4.3 - Determinação do estado de tensão em furos de sondagem sem sobrecarotagem	11
4.4 - Determinação da variação do estado de tensão em furos de sondagem	13
4.5 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas, em rasgos abertos no maciço	14
4.6 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas, utilizando macacos cilíndricos	15
4.7 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas com sobrecarotagem	16
4.8 - Determinação do estado de tensão em superfícies com li- bertação parcial do estado de tensão	16
5 - ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO .	16
5.1 - Medição em furos de sondagem com sobrecarotagem	16
5.1.1 - Vantagens do método	16
5.1.2 - Limitações do método	17
5.1.3 - Hipóteses de cálculo	17
5.2 - Medição em furos de sondagem sem sobrecarotagem	18
5.2.1 - Vantagens do método	18

	Pág.
5.2.2 - Limitações do método	18
5.2.2.1 - Fracturação hidráulica	18
5.2.2.2 - Fracturação mecânica	18
5.2.2.3 - Com abertura de rasgos nas paredes	18
5.2.3 - Hipóteses de cálculo	19
5.2.3.1 - Fracturação hidráulica	19
5.2.3.2 - Fracturação mecânica	19
5.2.3.3 - Com abertura de rasgos nas paredes	19
5.3 - Medições em superfícies planas	20
5.3.1 - Vantagens do método	20
5.3.1.1 - Com abertura de rasgos no maciço	20
5.3.1.2 - Com utilização de macacos curvos	20
5.3.1.3 - Com sobrecarotagem	20
5.3.1.4 - Com libertação parcial do estado de tensão	20
5.3.2 - Limitações do método	20
5.3.2.1 - Com abertura de rasgos no maciço	21
5.3.2.2 - Com a utilização de macacos curvos	21
5.3.2.3 - Com sobrecarotagem	21
5.3.2.4 - Com libertação parcial do estado de tensão.....	21
5.3.3 - Hipóteses de cálculo	21
5.3.3.1 - Com abertura de rasgos no maciço	21
5.3.3.2 - Com utilização de macacos curvos	22
5.3.3.3 - Com sobrecarotagem ou libertação parcial do estado de tensão	22
6 - ENSAIOS DESENVOLVIDOS PELO LNEC	22
6.1 - Ensaio em furos de sondagem com sobrecarotagem utilizaçã do o extensômetro tridimensional (STT).....	22
6.1.1 - Introdução	22
6.1.2 - Técnica do método	23
6.1.3 - Resultados dos ensaios	24
6.1.4 - Interpretação dos resultados	25
6.2 - Ensaio em superfícies planas (SFJ)	26
6.2.1 - Introdução	26
6.2.2 - Técnica do método	27
6.2.3 - Resultados dos ensaios	27
6.2.4 - Interpretação dos resultados	28
7 - ENSAIOS DE FRACTURAÇÃO HIDRÁULICA	28
7.1 - Introdução	28
7.2 - Técnica do método	29

	Pág.
7.3 - Interpretação dos resultados	29
8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
BIBLIOGRAFIA	32

1 - INTRODUÇÃO

As tensões existentes nos maciços rochosos podem ser de origem natural, como as devidas à acção da gravidade chamadas "tensões litostáticas" e as devidas a outras causas naturais, como por exemplo as de origem tectónica chamadas "tensões latentes", ou serem devidas à actividade humana, denominadas então "tensões induzidas". O conjunto das tensões litostáticas e das tensões latentes formam as "tensões virgens" ou "tensões iniciais" e será destas que se ocuparão os capítulos seguintes.

Desde a mais remota antiguidade que o Homem vem explorando os maciços rochosos para a obtenção de matérias primas, quer se trate de minérios, quer de materiais de construção.

Dado o carácter pouco profundo das escavações então efectuadas os problemas de sustimento foram resolvidos à custa da experiência obtida, não se pondo muito a questão da segurança, por estes trabalhos muito pesados serem geralmente efectuados por escravos.

Posteriormente, já no século XIX a construção das linhas de caminho de ferro obrigou à abertura de túneis onde a segurança era fundamental, sendo estes revestidos e a espessura do revestimento ditado mais pela experiência do que por outras considerações.

Recentemente a exploração de minas cada vez mais profundas, a execução de grandes barragens e albufeiras, de centrais subterrâneas, de abrigos e de grandes depósitos para fluidos e outros produtos, conduziu à necessidade do conhecimento prévio não só da geologia da região, mas também à determinação prévia do estado de tensão existente e à previsão do estado de tensão final, sendo determinantes estes dois valores no sustimento e no revestimento a empregar.

O conhecimento do estado de tensão dos maciços rochosos obriga a que se tenha acesso ao seu interior, por meio de furos de sondagem ou de galerias de prospecção, havendo métodos específicos de determinação do estado de tensão conforme o tipo de prospecção utilizada.

2 - ORIGEM DO ESTADO DE TENSÃO

2.1 - Acção do peso próprio

Se a Terra fosse perfeitamente esférica e formada por um material isotrópico, elástico linear e homogêneo, o peso próprio daria origem a uma "pressão litostática" de tensões principais σ_v e σ_h respectivamente vertical e horizontal, cujo valor era dado por:

$$\sigma_v = \rho g z \qquad \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v \qquad (1)$$

onde: ρ - peso específico do maciço rochoso,

g - aceleração da gravidade,

ν - coeficiente de Poisson do maciço rochoso,

z - profundidade.

Estes valores teóricos afastam-se regra geral da realidade pois os maciços rochosos não são isotrópicos, nem homogêneos nem elásticos lineares, além de que a superfície não é em geral horizontal.

Geralmente a tensão vertical não se afasta muito do valor teórico dado pela "pressão litostática", fig. 1, embora este afastamento possa ainda ser bastante importante para profundidades até cerca de 1000 m.

As tensões horizontais afastam-se muito mais do valor esperado, principalmente à superfície onde por vezes o seu valor é muito superior ao da "pressão litostática", fig. 2.

Em face do peso específico das rochas da crosta terrestre, o estado de tensão provocado pela acção da gravidade pode ser dado por:

$$\sigma_v = 0,027 z \text{ (MPa)} \qquad \sigma_h = 0,006 z \text{ (MPa)} \qquad (2)$$

Nestas expressões a profundidade z é dada em metros e o coeficiente de Poisson ν foi tomado igual a 0,18.

2.2 - Tensões de origem tectónica

O estado de tensão inicial dos maciços rochosos das regiões enrugadas é uma consequência da história tectónica da região. As forças tectónicas horizontais provocam deformações e roturas das

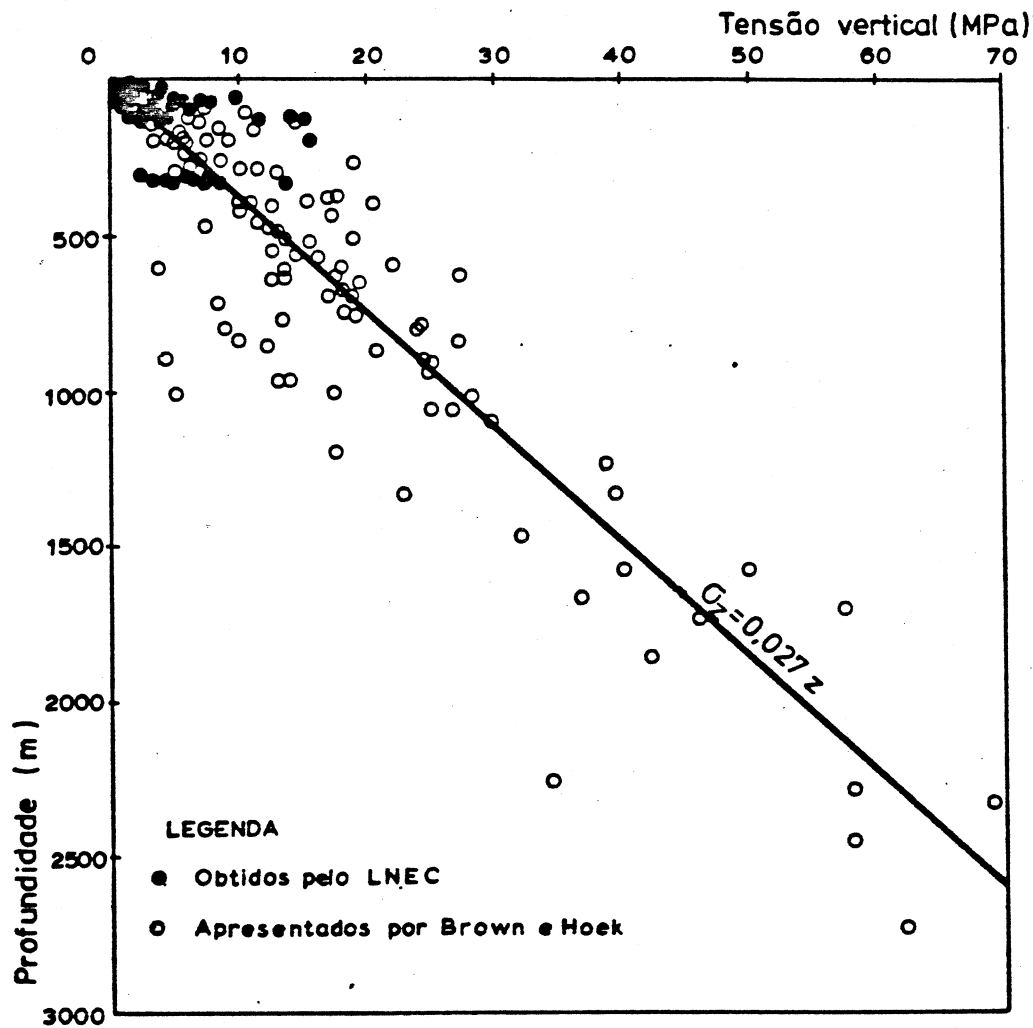


Fig. 1 - Variação da tensão vertical com a profundidade

partes superiores da crosta terrestre nas zonas enrugadas. Em face disto, nestas zonas a profundidades de 2 a 3 km, os maciços rochosos encontram-se submetidos a estados de tensão e de deformação para além do limite, dando origem a que para igual profundidade as tensões horizontais em zonas sísmicas enrugadas sejam cerca de 1,5 a 2 vezes inferiores às dos grandes escudos rochosos, muito antigos, já consolidados e estáveis.

Verifica-se que, para a mesma profundidade, são praticamente iguais as tensões em rochas de resistência semelhante. Isto só se verifica se se tratar do comportamento pós-rotura onde o nível das tensões horizontais depende da resistência do maciço rochoso e da profundidade a que ele se situa abaixo da superfície. Estas tensões são provocadas pelo movimento das placas, pelo magma e pela erosão. Todas estas acções quebram o equilíbrio hidrostático da crosta ter

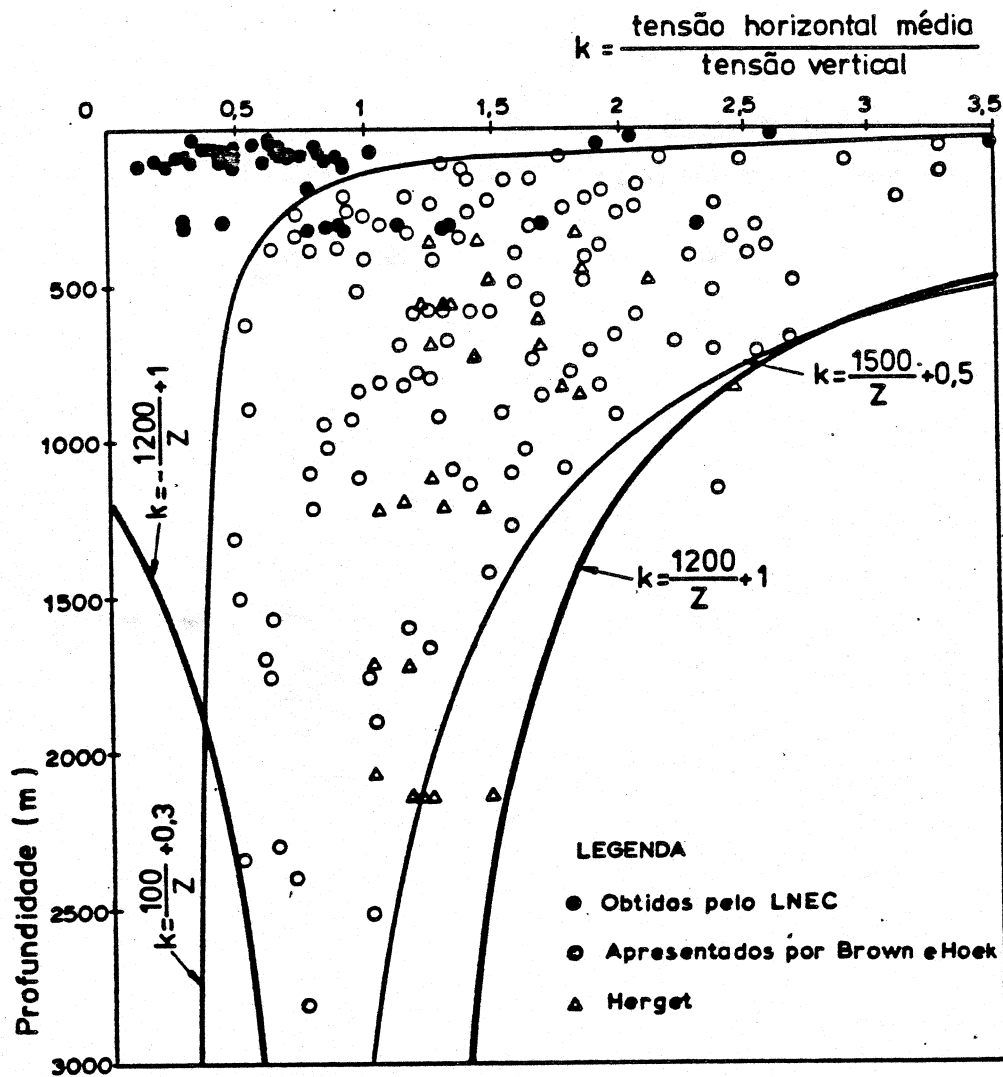


Fig. 2 - Variação da relação tensão horizontal média/tensão vertical com a profundidade

restre sobre o manto, provocando movimentos e tensões que são responsáveis por roturas e esmagamentos da crosta originando os sismos.

2.3 - Tensões residuais

As tensões residuais são tensões internas, provocadas pela fãbrica da própria rocha, existentes mesmo quando não actuam forças exteriores. Estas tensões podem identificar-se pela diferente recuperação das extensões em provetes de dimensões diferentes, ou por meio de raios X apresentando-se distorcida a rede cristalina dos vários grãos. Estas tensões internas provocam uma diminuição de resistência das rochas.

3 - FACTORES QUE INFLUENCIAM O ESTADO DE TENSÃO

3.1 - Generalidades

O estado de tensão inicial pode ser influenciado por uma série de factores que provocam alterações locais tornando-o muito variável de ponto para ponto, obrigando a grande número de determinações para se obter um valor médio representativo.

3.2 - Heterogeneidade

A heterogeneidade pode ser devida ao tipo de rocha, tendo cada uma das propriedades mecânicas diferentes, provoca o alívio das tensões nas rochas mais deformáveis e o aumento do estado de tensão nas mais rígidas.

Dentro de cada tipo de rocha a heterogeneidade aparece associada à alteração, que quanto maior for maior é a deformabilidade e menor a resistência da rocha, tendo efeito semelhante à heterogeneidade provocada pela existência de rochas de tipo diferente.

A compartimentação além de favorecer a alteração introduz também uma anisotropia que modifica a distribuição de tensões no maciço rochoso, com tendência a orientar as direcções principais do estado de tensão segundo direcções normais ou paralelas a famílias de diaclasamento do maciço.

3.3 - Topografia

A topografia conduz à concentração de tensões nos vales, ao aparecimento de tracções em zonas escarpadas ou em cavernas, e à rotação das direcções principais que tendem a ficar paralelas ou normais às encostas.

3.4 - Acção da água

A água altera o estado de tensão por variações do nível freático, aumentando ou diminuindo o peso específico das rochas e provocando a expansão ou a alteração de certos minerais constituintes das rochas. A sua circulação a temperaturas por vezes muito diferentes da da rocha circundante provoca variações de volume dos constituintes da rocha modificando portanto o seu estado de tensão. O conge-

lamento da água dos poros e das fissuras da rocha dá origem a tracções que além da modificação do estado de tensão podem conduzir à sua rotura e desagregação, em particular nos climas frios.

3.5 - Efeito das propriedades físicas

A diferente deformabilidade dos minerais constituintes das rochas faz com que o estado de tensão seja muito variável de mineral para mineral, com tendência para os mais rígidos serem submetidos a estados de tensão mais elevados do que os mais deformáveis.

A anisotropia tornando a deformabilidade variável com a direcção tem tendência a orientar o estado de tensão de modo a que as direcções principais se aproximem das direcções principais de deformabilidade.

A diferente resistência à rotura dos minerais pode conduzir a roturas localizadas dos mais fracos provocando uma redistribuição de tensões. Este fenómeno é particularmente importante na vizinhança de obras subterrâneas e de explorações mineiras.

O coeficiente de dilatação térmica difere de rocha para rocha e de mineral para mineral pelo que as variações de temperatura na zona superficial do maciço rochoso ou em obras subterrâneas conduzem a modificações do estado de tensão do maciço rochoso.

3.6 - Acção do homem

O homem provoca mudanças importantes do estado de tensão nos maciços rochosos com a execução de escavações e aterros, de barragens e albufeiras, de edifícios e pontes, de obras subterrâneas e explorações mineiras, conduzindo a variações muito importantes do estado de tensão virgem dos maciços rochosos.

No caso de enchimento de grandes albufeiras, a carga introduzida pode conduzir a uma alteração importante do equilíbrio da crosta terrestre provocando geralmente o aumento da sismicidade da zona.

4 - MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

4.1 - Introdução

A enorme variedade de aparelhos e de princípios utilizados torna difícil a análise dos aparelhos existentes, dos quais alguns não

devem ter passado da fase de estudo, sendo outros descritos de forma tão vaga que se torna difícil a sua inclusão dentro dos vários tipos de aparelhagem. Assim apresentar-se-ão os aparelhos melhor descritos ou mais utilizados em ensaios de campo.

Os vários aparelhos podem agrupar-se em face dos resultados obtidos, em aparelhos que permitem determinar o estado de tensão completo, em aparelhos que só determinam o estado de tensão radial ou o estado de tensão plano e aparelhos que só determinam a tensão numa única direcção. Dentro destes tipos de aparelhos há ainda aqueles que medem o estado de tensão existente e aqueles que medem apenas variações do estado de tensão. Em geral os aparelhos que medem o estado de tensão existente podem também ser utilizados na medição da sua variação, embora os construídos para esse fim tenham um comportamento muito mais estável ao longo do tempo.

As técnicas de ensaio podem agrupar-se em: ensaios em furos de sondagem com sobre-carotagem, ensaios em furos de sondagem sem sobre-carotagem, ensaios em furos de sondagem com abertura de rasgos na superfície do furo, ensaios em superfícies expostas com abertura de rasgos, ensaios em superfície com determinação directa do estado de tensão na superfície e ensaios em superfícies com descompressão parcial. Esta classificação parece ser a mais adequada por a interpretação dos resultados ser semelhante para cada técnica de ensaio.

Nos parágrafos seguintes, respeitantes a cada técnica de ensaio, os aparelhos apresentados são designados pelo nome de origem.

4.2 - Determinação do estado de tensão em furos de sondagem com sobre-carotagem

Nesta técnica de ensaio, que será descrita em pormenor no capítulo 6, introduz-se o aparelho para medição de tensões num furo de pequeno diâmetro fixando-o às paredes por meio de colagem ou por meios mecânicos. Após a fixação faz-se um outro furo de sondagem de maior diâmetro, concêntrico com o anterior, libertando assim o tarolo de rocha do estado de tensão a que estava sujeito, o que provoca deslocamentos no seu interior. Estes deslocamentos são medidos directa ou indirectamente pelo aparelho de medida colocado no interior do furo de menor diâmetro.

Utilizando este método e permitindo a determinação de estado de tensão completo indicam-se os seguintes aparelhos: "CSIRO HI Cell",

fig. 3, da Austrália; "SSPB-Hiltscher", fig. 4, e "LUT Gauge" da Suécia; "Hemispherical-ended Strain Cell" do Japão; "ANZSI Cell", fig. 5, da Nova-Zelândia; "STT", fig. 6, de Portugal; "Interfels Triaxial Probe" da Alemanha; "Leeman Strain Gauge" da África do Sul; a célula "Universit  de Li ge", fig. 7, da Bélgica; "USBM/BDG Cell" dos E.U.A; e o "T.S.R.M." da Itália.

Determinando o estado de tensão radial podem apontar-se os seguintes aparelhos: "CCD Moiré Fringe Method" da Austrália; "CERCHAR Cell", fig. 8, da França; "BDG (Borehole deformation gauge)", fig. 9, do Japão; "YG-73" da China; "Doorstopper", fig. 10, da África do Sul; "DPM (Drillhole prestressed meter)", fig. 11, e "RBP (R gid brass

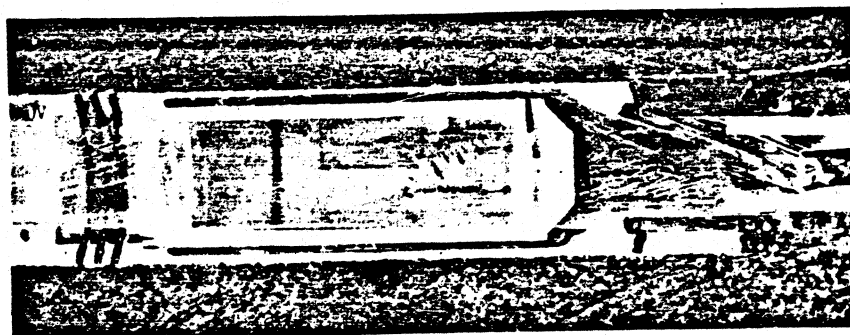
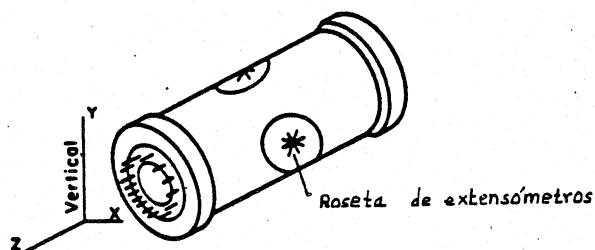


Fig. 3 - "CSIRO HI Cell"

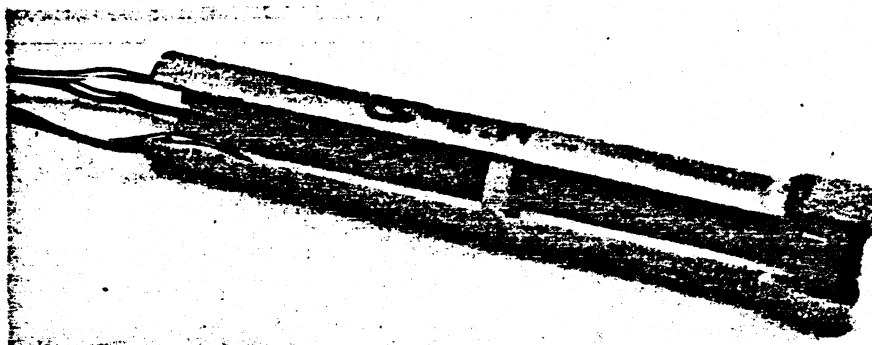


Fig. 4 - Extens metro "SSPB-Hiltscher" para ensaios horizontais ou inclinados

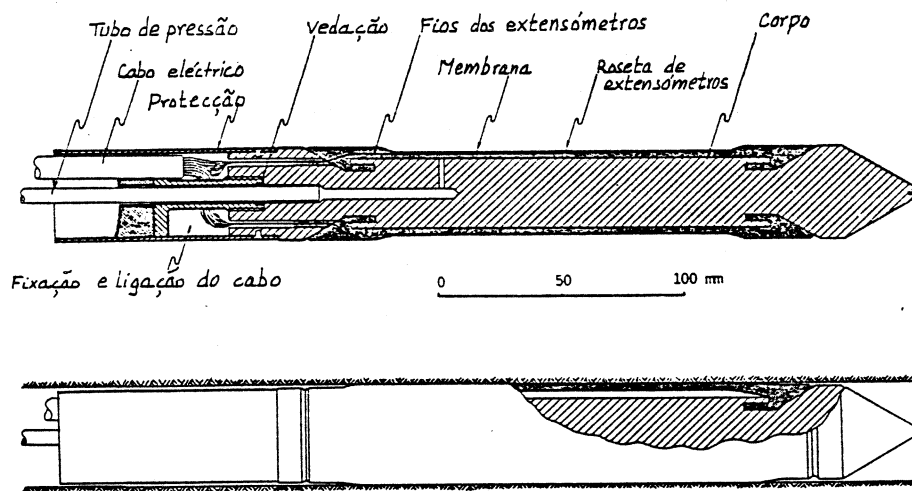


Fig. 5 - "ANZSI Cell", secção transversal e introduzida no furo

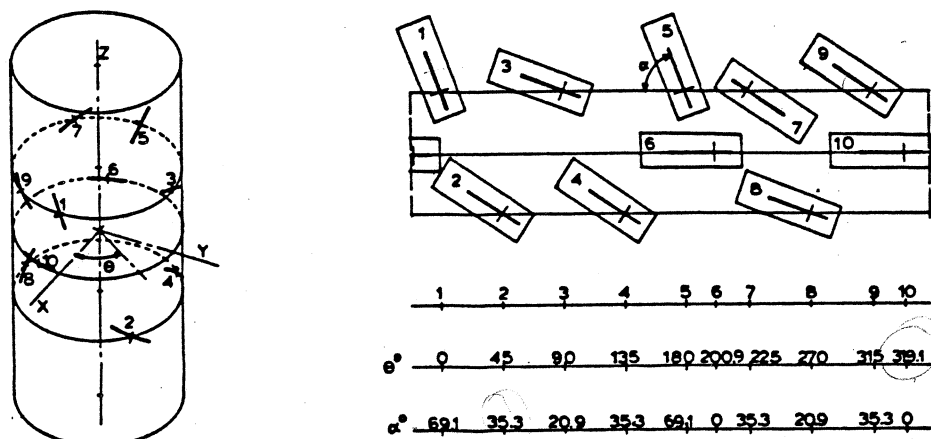


Fig. 6 - "STT", Localização e orientação dos extensómetros

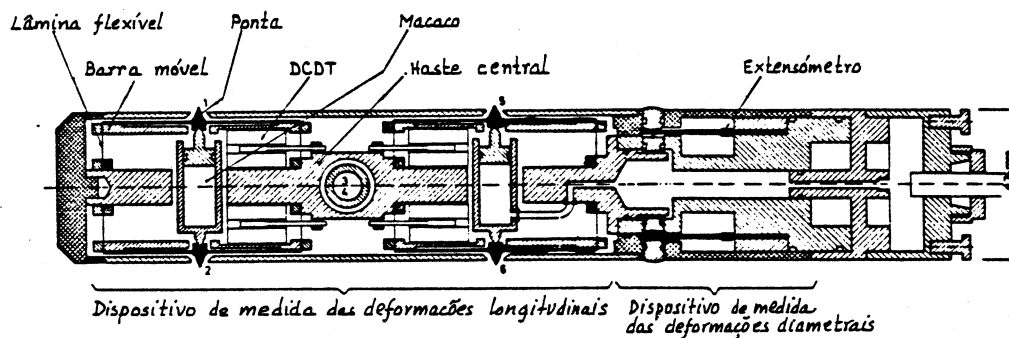


Fig. 7 - Célula "Universitè de Liège"

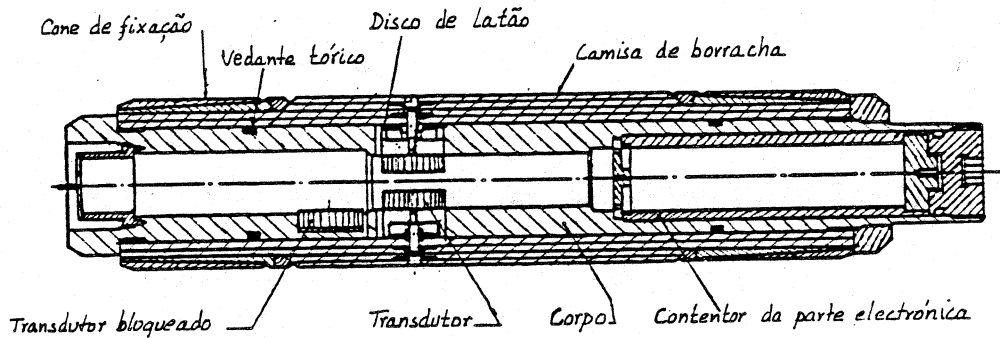


Fig. 8 - Esquema da "CERCHAR Cell"

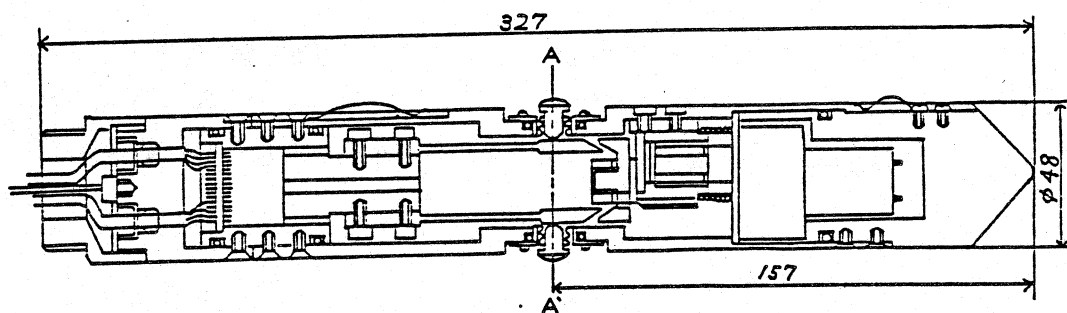


Fig. 9 - Componentes da célula "BDG"

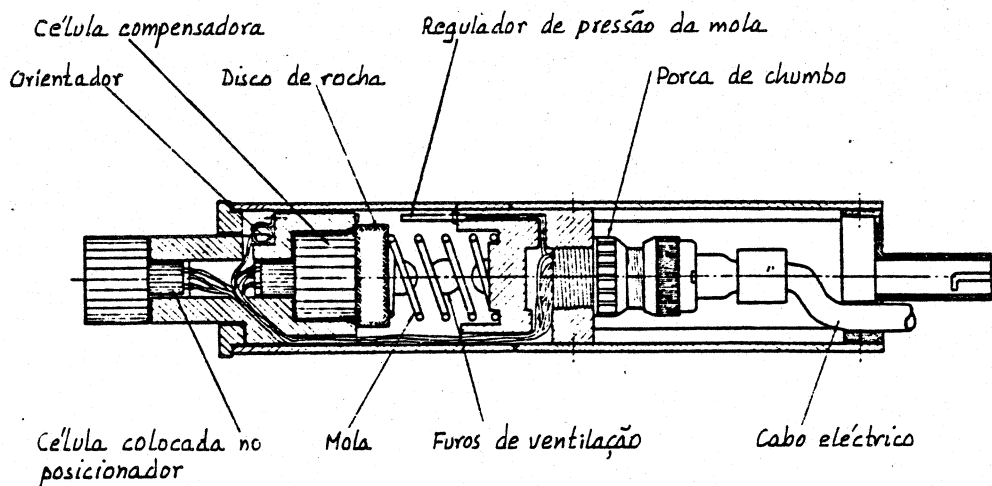


Fig. 10 - "Doorstopper" e posicionador

plug)" do Reino Unido; "IRAD Gauge", "NCB/MRE type 428", "BDG (Bore hole deformation gauge)", fig. 12, "Photoelastic biaxial strain gauge" e "Photoelastic soft inclusion gauge" dos E.U.A..

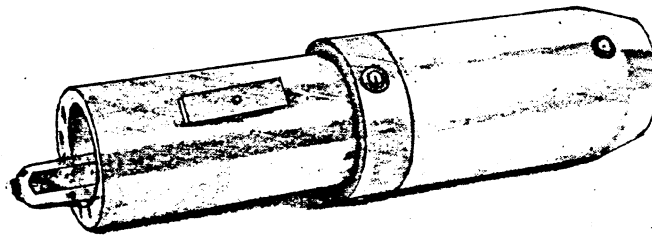


Fig. 11 - "DPM - Drillhole prestressed meter"

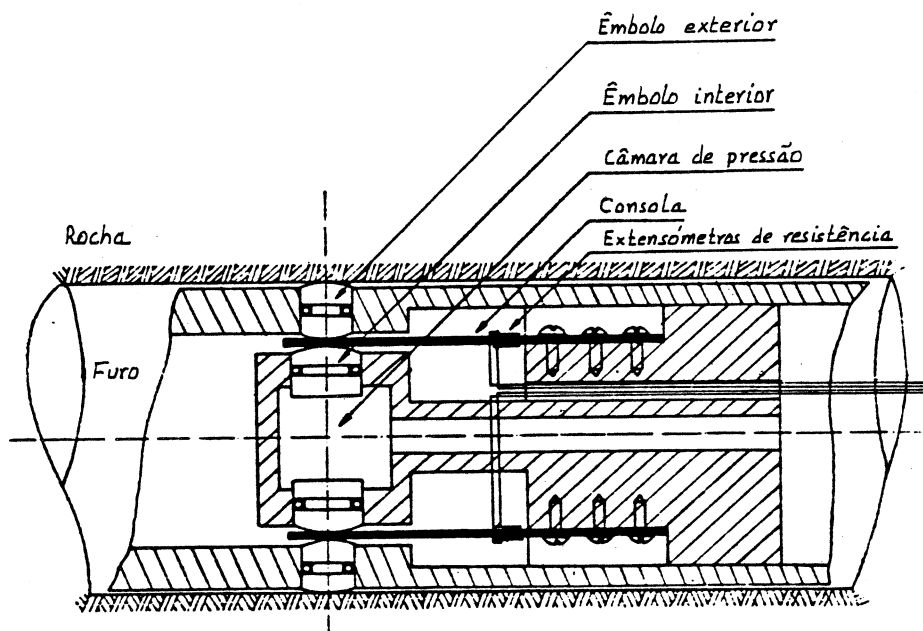


Fig. 12 - Corte do "BDG - Borehole deformation gauge"

4.3 - Determinação do estado de tensão em furos de sondagem sem sobre-carotagem

Ligadas a este método de ensaio existem as técnicas de fracturação hidráulica, ensaios de reabertura de diaclases, ensaios de fracturação mecânica, medição das variações do estado de tensão e outros tipos de ensaio de que se apresentam seguidamente alguns exemplos.

Os ensaios de fracturação hidráulica, fig. 13, são utilizados por vários países, tais como a França, a Itália, a Alemanha, a Suécia, a Noruega, o Reino Unido, os E.U.A., o Canadá, o Japão, a Índia e a Colômbia.

O método "H.P.T.F." desenvolvido em França utiliza um método semelhante ao da fracturação hidráulica adaptado a fracturas já exis-

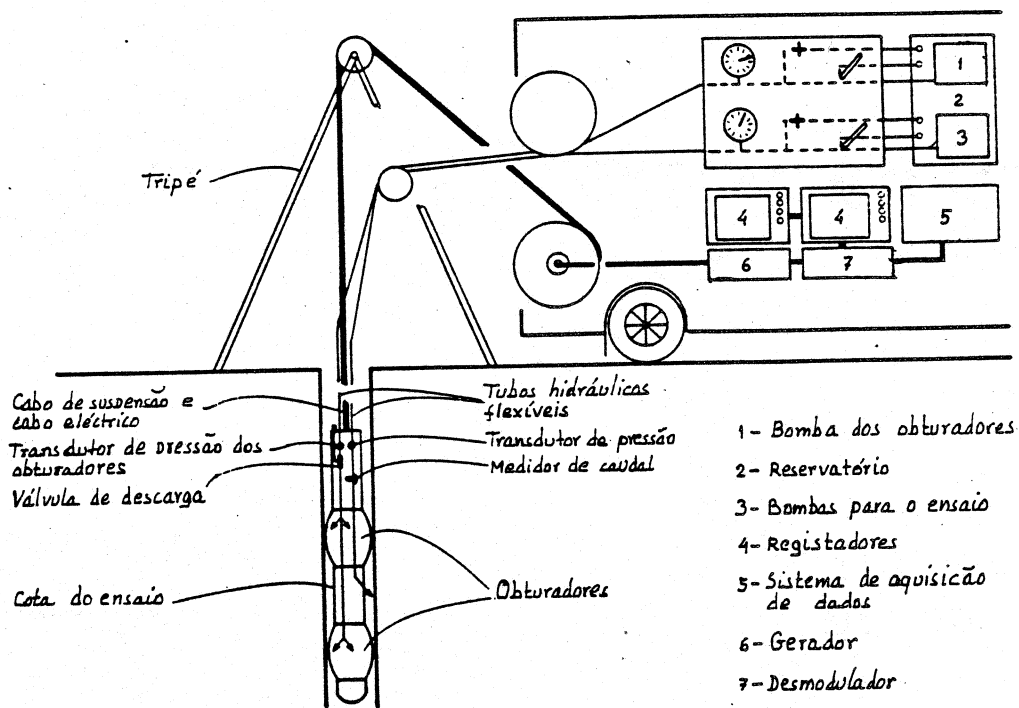


Fig. 13 - Esquema do ensaio de fracturação hidráulica

tentes no maciço rochoso.

O "Sleeve fracturing", fig. 14, desenvolvido na Suécia mede o estado de tensão radial com furos produzindo a rotura do maciço por meio de fracturação mecânica.

Vários outros aparelhos ou tipos de ensaio têm sido utilizados, tais como: o efeito "Kaiser", o "BPC Cell" e "CPC Cell" dos E.U.A. que utilizam o efeito viscoelástico das rochas e o "Borehole Slotter", fig. 15, da Austrália que determina a tensão normal a rasgos abertos na parede do furo de sondagem por meio de um disco diamantado.

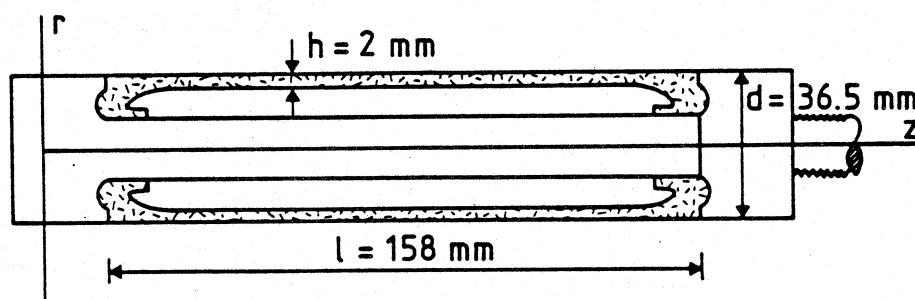


Fig. 14 - Geometria da membrana da "Sleeve fracturing"

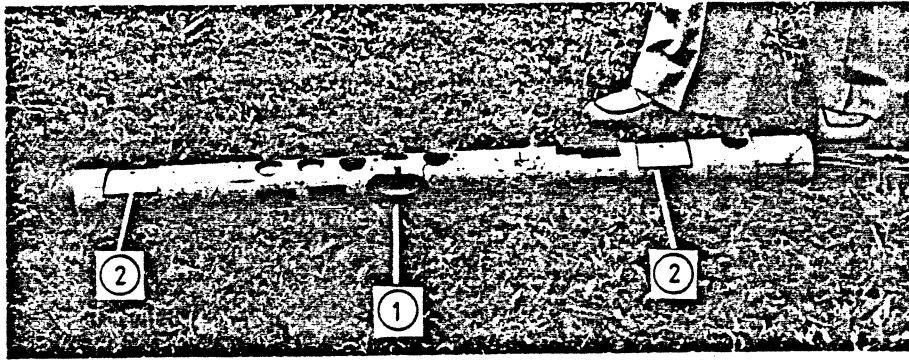


Fig. 15 - Protótipo da "Borehole slotter". (1) Serra de disco e (2) placas de fixação

4.4 - Determinação da variação do estado de tensão em furos de sondagem

Apesar de os aparelhos descritos nas alíneas anteriores permitirem em princípio medir variações do estado de tensão, outros aparelhos foram especialmente concebidos para o efeito, tais como: "CSIRO Yoke Gauge", fig. 16, da Austrália; "Hidraulic Pressure Cell" da Alemanha que utiliza o sistema Glotzl; "PAL Gauge", fig. 17, dos E.U.A.; e a cápsula pressiométrica da "CERCHAR" da França.

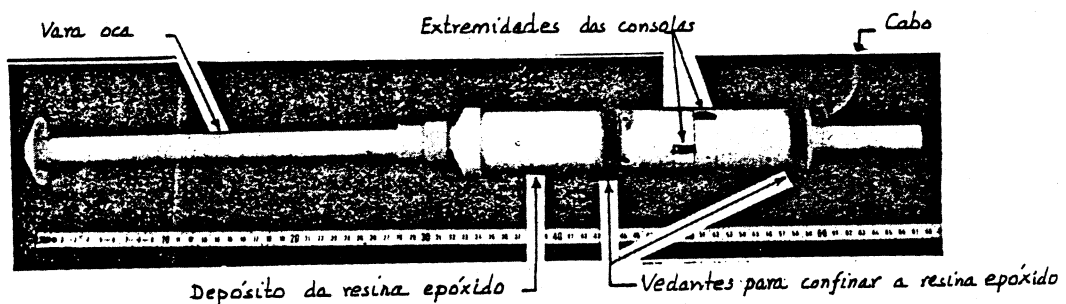


Fig. 16 - "CSIRO Yoke Gauge"

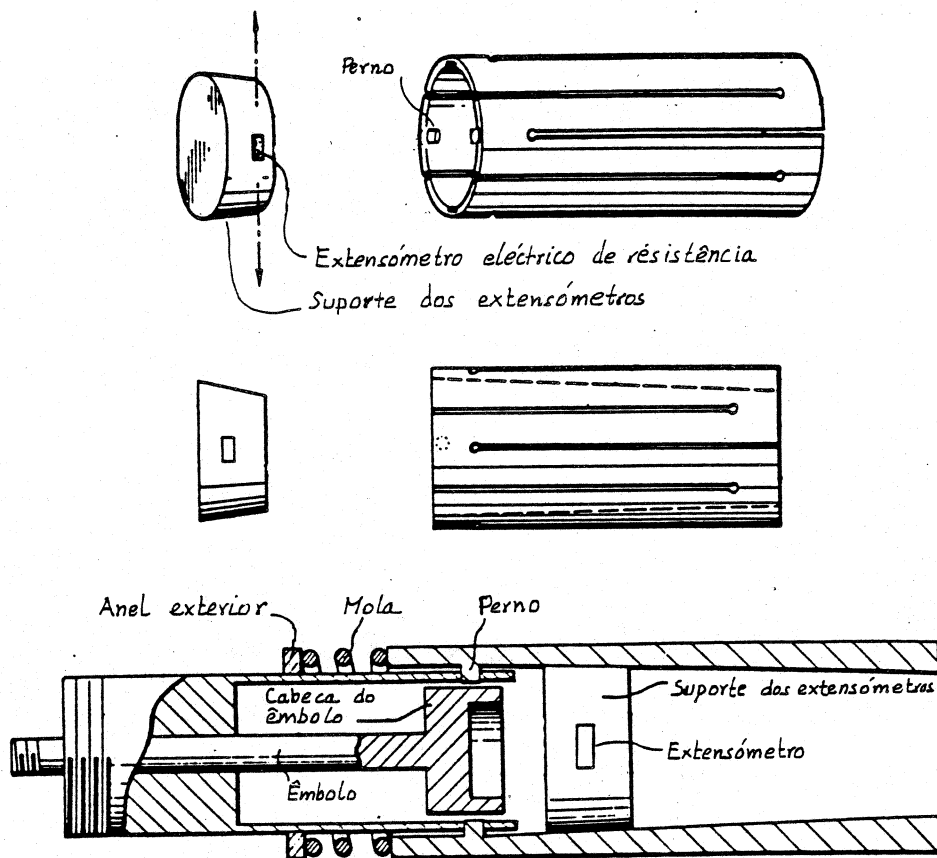


Fig. 17 - "PAL Gauge" e posicionador

4.5 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas, em rasgos abertos no maciço

Existem fundamentalmente dois métodos diferentes que se distinguem pelo processo de abertura dos rasgos. Estes podem ser abertos por meio da execução de uma série de furos complanares paralelos de eixos afastados de uma distância inferior ao seu diâmetro. Neste rasgo normal à superfície do maciço rochoso é introduzido e cimentado um macaco plano de tipo Freyssinet, fig. 18, de que existem vários tipos e dimensões.

No outro método o rasgo é aberto por meio de um disco diamantado como no caso do SFJ, fig. 19, desenvolvido pelo LNEC que não necessita de ser cimentado no rasgo.

Estes dois tipos de aparelhagem permitem determinar apenas a tensão normal ao rasgo aberto na superfície do maciço rochoso, ou a sua variação ao longo do tempo.

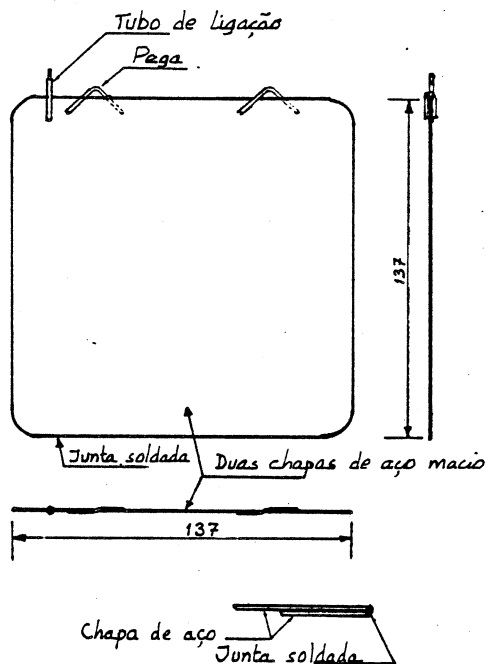


Fig. 18 - Macacos Freyssinet

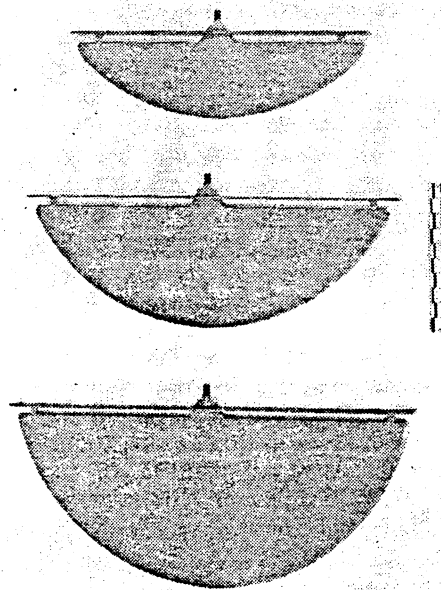


Fig. 19 - Macacos SFJ

4.6 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas, utilizando macacos cilíndricos

Este método de ensaio em que quatro macacos cilíndricos são introduzidos em furos de sondagem muito curtos abertos na superfície do maciço rochoso, fig. 20, permite determinar o estado de tensão plano na superfície, e tem sido utilizado principalmente na França.

Tal como o método anterior permite medir as variações do estado de tensão ao longo do tempo.

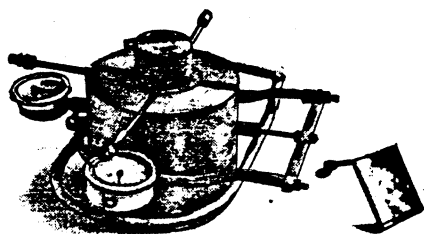


Fig. 20 - Macacos cilíndricos

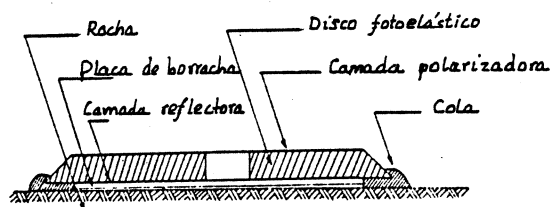


Fig. 21 - "BLH - Gauge type C100-10"

4.7 - Determinação do estado de tensão em superfícies planas com sobre-carotagem

Neste tipo de ensaio são colados extensômetros elétricos, discos fotoelásticos como o "BLH-Gauge type C100-10", fig. 21, ou bases de medida, procedendo-se posteriormente à abertura de um furo de sondagem com o comprimento suficiente para se dar a libertação completa do estado de tensão no tarolo.

Este tipo de ensaio permite também, antes da abertura do furo, a determinação da variação do estado de tensão com o tempo.

4.8 - Determinação do estado de tensão em superfícies com libertação parcial do estado de tensão

Este tipo de ensaio, desenvolvido em França, consiste na abertura de um furo de sondagem curto com medição do seu diâmetro em várias direcções e repetir essas medidas após a abertura sucessiva de outros quatro furos de maior diâmetro abertos na vizinhança, fig. 22.

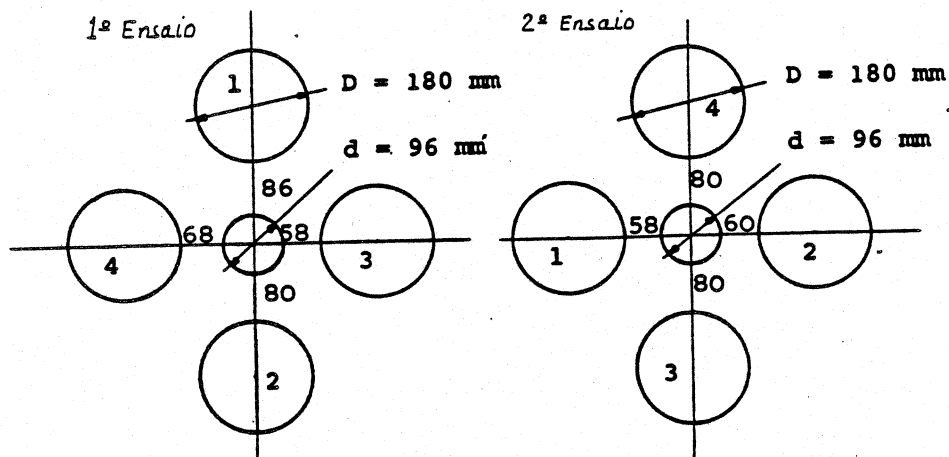


Fig. 22 - Posicionamento dos furos para libertação parcial das tensões

5 - ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

5.1 - Medição em furos de sondagem com sobre-carotagem

5.1.1 - Vantagens do método

Este método permite o acesso fácil ao interior do maciço rochoso até profundidades da ordem da centena de metros.

Algumas das técnicas permitem com um único ensaio determinar com

pletamente o estado de tensão num ponto do maciço rochoso, e outras o estado de tensão radial no furo de sondagem.

5.1.2 - Limitações do método

As determinações do estado de tensão por meio deste método têm as seguintes limitações:

- as determinações têm carácter pontual;
- é difícil fazer leituras precisas dos aparelhos durante a sobre-carotagem devido às variações de temperatura, que regra geral demora algumas horas a estabilizar após a execução da sobre-carotagem;
- dificuldade na colagem ou fixação do aparelho no interior do furo e manter esta ligação durante e após a sobre-carotagem;
- a heterogeneidade da rocha ao nível do cristal pode pôr problemas de interpretação dos resultados;
- a execução do ensaio é muito demorada e são delicadas as operações de sobre-carotagem;
- a existência de diaclases ou fissuras na zona do furo, pode dificultar a interpretação dos resultados ou provocar a rotura do tarolo durante a sobre-carotagem;
- dificuldade na obtenção das constantes elásticas necessárias para a interpretação dos resultados quando não é possível a realização do ensaio biaxial após a retirada do tarolo;
- dificuldade de interpretação dos resultados, pois nem sempre as leituras dos extensómetros são compatíveis;
- variação das propriedades da cola durante o ensaio;
- dificuldade na orientação do aparelho a grande profundidade;
- os métodos que medem apenas deslocamentos radiais necessitam a abertura de três furos com orientações diferentes que passem pelo mesmo ponto se se quiser obter o estado de tensão completo.

5.1.3 - Hipóteses de cálculo

Na interpretação dos resultados a rocha é geralmente considerada homogénea, isotrópica e de comportamento elástico linear.

5.2 - Medição em furos de sondagem sem sobre-carotagem

5.2.1 - Vantagens do método

Estes métodos, especialmente o da fracturação hidráulica permitem atingir muito maiores profundidades que o anterior, atingindo -se os milhares de metros de profundidade. Além disso são de execução bastante rápida e os ensaios de fracturação hidráulica não têm carácter pontual.

5.2.2 - Limitações do método

5.2.2.1 - Fracturação hidráulica

- Influência das tensões tangenciais na abertura da fenda longitudinal;
- incerteza na interpretação dos resultados obtidos;
- variação da permeabilidade e penetração do fluido na rocha;
- dificuldade na orientação do estado de tensão.

5.2.2.2 - Fracturação mecânica

- Dificuldade na detecção da abertura da fenda, dado o seu carácter progressivo;
- influência das tensões tangenciais na abertura da fenda longitudinal;
- incerteza na interpretação da curva pressões-deslocamentos;
- em cada ensaio só se determina o valor de uma tensão.

5.2.2.3 - Com abertura de rasgos nas paredes

- Necessidade do conhecimento das constantes elásticas;
- dificuldade na medição dos deslocamentos;
- carácter pontual das determinações;
- cada ensaio só determina o valor de uma tensão.

5.2.3 - Hipóteses de cálculo

5.2.3.1 - Fracturação hidráulica

- A rocha têm comportamento elástico linear, é isotrópica e impermeável;

- uma das tensões principais é paralela ao eixo do furo, geralmente vertical;

- o plano de fracturação é normal à menor tensão principal perimetral;

- o início da fracturação dá-se quando a pressão iguala a menor tensão perimetral, adicionada à resistência da rocha à tracção;

- a pressão que mantém a fractura aberta é igual à tensão normal nesse plano;

- a pressão que reabre a fractura é igual à tensão perimetral na parede;

- a pressão que se mantém no interior do furo sem passagem de caudal é a pressão nos poros.

5.2.3.2 - Fracturação mecânica

- A rocha é homogênea, têm comportamento elástico linear e é isotrópica;

- o plano de fracturação é normal à menor tensão principal perimetral;

- quando se dá uma quebra no aumento da pressão foi vencida a menor tensão perimetral adicionada à resistência da rocha à tracção;

- a pressão para a qual a fenda reabre é a tensão perimetral menor.

5.2.3.3 - Com abertura de rasgos nas paredes

- A rocha têm comportamento elástico linear, é isotrópica e é homogênea;

- a tensão tangencial no rasgo não influencia os deslocamentos normais à fenda.

5.3 - Medições em superfícies planas

5.3.1 - Vantagens do método

5.3.1.1 - Com abertura de rasgos no maciço

- Acesso directo à zona a ensaiar;
- não é necessário o conhecimento das características elásticas da rocha.

5.3.1.2 - Com utilização de macacos curvos

- Acesso directo à zona a ensaiar;
- não é necessário o conhecimento das características elásticas da rocha;
- permite determinar com um único ensaio o estado de tensão na superfície do maciço rochoso.

5.3.1.3 - Com sobrecarotagem

- Acesso directo à zona a ensaiar;
- permite determinar com um único ensaio o estado de tensão na superfície do maciço rochoso.

5.3.1.4 - Com libertação parcial do estado de tensão

- Acesso directo à zona a ensaiar.

5.3.2 - Limitações dos métodos

Este método de ensaio apresenta limitações relacionadas com o método em si, e limitações específicas de cada tipo de ensaio.

As limitações do método são:

- Influência da forma da câmara no estado de tensão, tornando por vezes difícil determinar o estado de tensão inicial;
- descompressão da superfície devida ao método de abertura da câmara de ensaio;

- carácter pontual de cada determinação.

Cada tipo de ensaio tem, além destas, outras limitações que a seguir se indicam.

5.3.2.1 - Com abertura de rasgos no maciço

- Em cada rasgo só se mede uma tensão normal;

- para se obter o estado de tensão na superfície é necessário abrir pelo menos quatro rasgos com atitudes diversas em locais suficientemente afastados para não haver interferências no estado de tensão, e suficientemente próximos para que o estado de tensão seja o mesmo, fig. 26;

- dificuldade na medição de tensões de tracção, não sendo sempre possível a extrapolação da curva de ensaio.

5.3.2.2 - Com a utilização de macacos curvos

- Os quatro macacos curvos não repõem exactamente o estado de tensão inicial;

- dificuldade na medição de tensões de tracção.

5.3.3.3 - Com sobrecarotagem

- Necessidade de determinação das constantes elásticas para a obtenção do estado de tensão.

5.3.2.4 - Com libertação parcial do estado de tensão

- Necessidade de determinação das constantes elásticas para a obtenção do estado de tensão;

- dificuldade na interpretação dos resultados.

5.3.3 - Hipóteses de cálculo

5.3.3.1 - Com abertura de rasgos no maciço

- A pressão que restabelece as leituras iniciais é a tensão normal ao rasgo;

- o deslocamento normal ao rasgo não é influenciado pela tensão tangencial na fenda.

5.3.3.2 - Com utilização de macacos curvos

- As pressões que restabelecem as leituras iniciais são diretamente proporcionais às tensões normais no furo.

5.3.3.3 - Com sobrecarotagem ou libertação parcial do estado de tensão

- A rocha é homogênea, isotrópica e elástica-linear.

6 - ENSAIOS DESENVOLVIDOS PELO LNEC

6.1 - Ensaio em furos de sondagem com sobrecarotagem utilizando o extensômetro tridimensional (STT)

6.1.1 - Introdução

O desenvolvimento de vários extensômetros tridimensionais de tipo "inclusão deformável" e, a sua utilização em diversos estudos, permitiu que a nível mundial se tenha encarado o problema da determinação do estado de tensão nos maciços rochosos, uma vez que os resultados obtidos se afastavam na maior parte dos casos dos estados de tensão esperados tomando em consideração a actuação exclusiva da pressão litostática.

Em face da importância do problema, o LNEC desenvolveu um tipo de aparelho designado por STT (Stress Tensor Tube), com o qual tem realizado grande número de ensaios tanto no país como no estrangeiro.

Este aparelho era inicialmente formado por um cilindro maciço de araldite com nove extensômetros colocados no seu eixo em atitudes diversas, mas devido à sua rigidez excessiva, à ocorrência de alterações dos extensômetros e do empenamento da superfície durante o período de endurecimento da resina, foi substituído por um cilindro oco com 2 mm de espessura de parede e 25 cm de comprimento, tendo coladas na sua superfície média três rosetas de três extensômetros a 45° , sendo finalmente substituído por um outro de idêntica espessura, com 20 cm de comprimento e tendo no plano médio dez extensômetros colocados de acordo com as normais às faces de um icosaedro, tomando o aspecto indicado na fig. 6, onde se mostra a planificação da zona central do STT.

Esta disposição permite uma boa amostragem de todas as direcções, havendo quatro leituras superabundantes, com diminuição do risco de insucesso do ensaio por avaria de alguns extensómetros, sendo suficiente o funcionamento de seis quaisquer para se obter o estado de tensão completo considerado.

6.1.2 - Técnica do método

Este método é basicamente um método de libertação das tensões de um tarolo cilíndrico contendo no seu interior o extensómetro tridimensional, fig. 23.

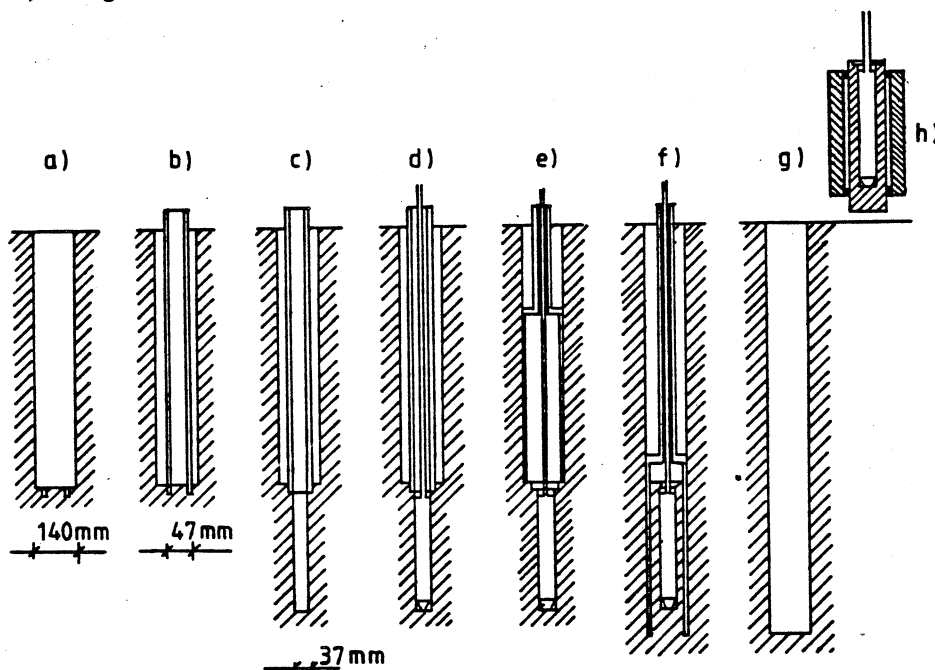


Fig. 23 - Técnica do método "STT"

O método comporta essencialmente as seguintes fases:

a) - Abertura de um furo de sondagem de grande diâmetro (140 mm) até à proximidade do ponto onde se quer determinar o estado de tensão (cerca de 25 cm acima);

b) e c) - abertura de um furo de sondagem de pequeno diâmetro (37 mm) com um comprimento de 40 cm, a partir do fundo do furo anterior e perfeitamente centrado com ele;

d) - colagem à parede do furo de pequeno diâmetro do extensómetro tridimensional convenientemente orientado;

e) - leitura inicial dos extensómetros eléctricos contidos no STT após o endurecimento ou polimerização da cola;

f) - sobre-carotagem do tarolo, contendo o STT, até uma profundidade que garanta o alívio total das tensões a que está submetido (40 cm abaixo do ponto de medida) e leitura final dos extensômetros eléctricos contidos no STT, após estabilização das leituras;

g) - retirada do tarolo de sondagem contendo o STT;

h) - ensaio em câmara biaxial do tarolo de sondagem contendo o extensómetro tridimensional.

6.1.3 - Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios com o STT apresentam o aspecto indicado na fig. 24, onde estão representadas as leituras obtidas nos extensómetros de uma roseta com o avanço da sobre-carotagem, verificando-se a existência de três zonas distintas, uma inicial em patamar antes da libertação das tensões, uma zona intermédia de grande variação das leituras correspondente à libertação das tensões e uma zona final de estabilização das leituras com a temperatura após a conclusão da sobre-carotagem.

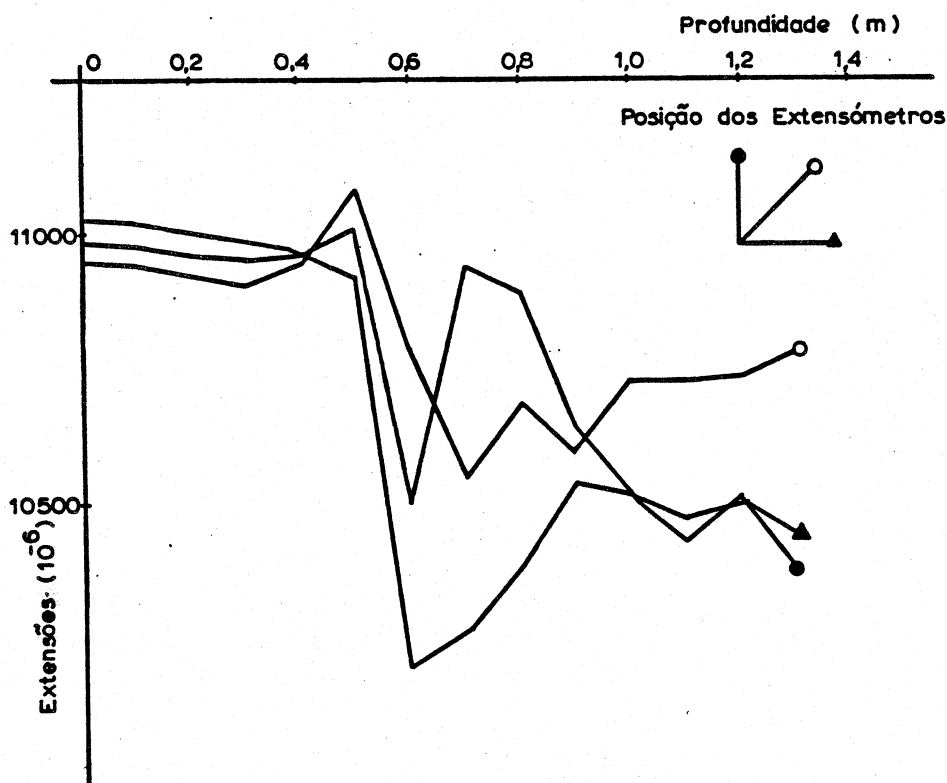


Fig. 24 - Resultados dos ensaios "STT"

6.1.4 - Interpretação dos resultados

No ponto do maciço rochoso onde se encontra colocado o STT, o estado de tensão extrínseco é definido pelas tensões, σ_x , σ_y , σ_z , τ_{yz} , τ_{zx} e τ_{xy} , e a extensão medida segundo uma direcção qualquer pode ser escrita sob a forma:

$$\varepsilon = \varepsilon_z \sin^2 \alpha + \varepsilon_\theta \cos^2 \alpha + \gamma_{\theta z} \sin \alpha \cos \alpha \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \left[M_1 (\sigma_x + \sigma_y) + N (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - M_2 \sigma_z + 2N \tau_{xy} \sin 2\theta \right]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[-\nu (\sigma_x + \sigma_y) + \sigma_z \right] \quad (4)$$

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

onde:

E - módulo de elasticidade da rocha;

ν - coeficiente de Poisson da rocha;

θ - ângulo formado pela normal ao extensômetro com o eixo dos xx;

α - ângulo formado pela direcção do extensômetro com o plano xy;

$$M_1 = 1,204165 + 0,083507\nu$$

$$M_2 = 0,083507 + 1,204165\nu$$

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

$$N = -2,444020 (1 - \nu^2)$$

(5)

Os valores de M_1 , M_2 , M_3 e N são função das características elásticas e das dimensões do STT.

A partir destas expressões obtêm-se a extensão segundo a direcção de cada extensômetro. Uma vez conhecidos estes valores pode-se, pelo método dos mínimos quadrados, determinar o estado de tensão inicial mais provável.

Para a determinação das constantes elásticas aplica-se numa câmara biaxial um estado de tensão dado por:

$$\sigma_x = \sigma_y = p \quad \text{e} \quad \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0 \quad (6)$$

tomando as expressões de ε_θ , ε_z e $\gamma_{\theta z}$ os valores:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{2p}{E} M_1 \quad ; \quad \varepsilon_z = - \frac{2\nu p}{E} \quad ; \quad \gamma_{\theta z} = 0 \quad (7)$$

pelo que:

$$\varepsilon = \frac{2p}{E} (M_1 \cos^2 \alpha - \nu \sin^2 \alpha) \quad (8)$$

Uma vez feito o ensaio biaxial e lidas as extensões, num máximo de dez e num mínimo de duas, obtêm-se, também pelo método dos mínimos quadrados, os valores das constantes elásticas E e ν , que se são então utilizados nas expressões (4) e (5).

Todos os cálculos precedentes admitiram um comportamento isotrópico, elástico e linear do tarolo. No caso deste comportamento não ser linear, é possível uma correcção deste efeito se os valores das constantes elásticas, obtidas no ensaios biaxial, corresponderem aos valores secantes no domínio da variação de tensões que o protete sofreu durante a sobrecarotagem, isto é, se a pressão aplicada no ensaio biaxial for da ordem de grandeza das tensões iniciais a que a rocha esteve sujeita.

6.2 - Ensaio em superfícies planas (SFJ)

6.2.1 - Introdução

Além da determinação do estado de tensão em furos de sondagem, o LNEC desenvolveu um método que permite a determinação do estado de tensão em superfícies planas. Este ensaio baseia-se no método de restabelecimento da tensão normal ao rasgo aberto na superfície do maciço, não necessitando o conhecimento das constantes elásticas da rocha.

Os rasgos são abertos por meio de um disco diamantado com 60cm. de diâmetro, montado numa estrutura onde se desloca por meio de dois parafusos sem-fim com cremalheira. Este conjunto é fixado à superfície da rocha por meio de chumbadouros, e o disco accionado por meio de um motor eléctrico ou a ar comprimido, sendo o movimento transmitido por meio de veios e cardans, fig. 25.

A superfície de ensaio tem de ser previamente alisada e preparada de modo a ficar plana e permitir a fixação de toda a aparelhagem.

Para a determinação do estado de tensão numa superfície terão

de se abrir no mínimo três rasgos formando uma roseta plana, sendo de toda a conveniência a abertura de um quarto rasgo para verificação da compatibilidade dos resultados, fig. 26.

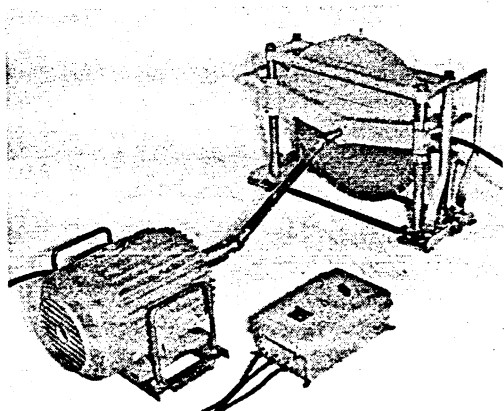


Fig. 25 - Motor e disco diamantado para abertura dos rasgos

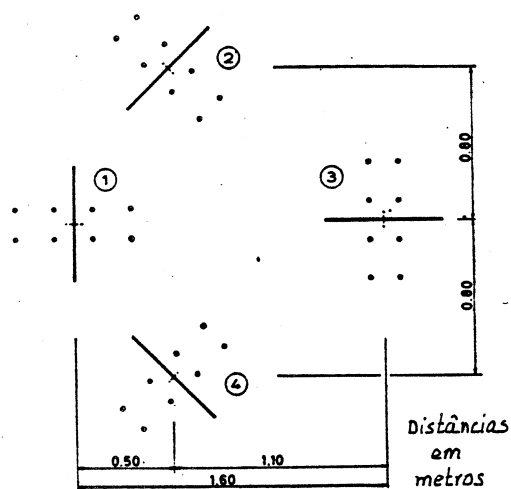


Fig. 26 - Roseta de rasgos para ensaios SFJ

O estado de tensão pode ser medido com diferentes profundidades do rasgo, existindo macacos planos para as profundidades de 11, 17 e 24 cm, fig. 19.

6.2.2 - Técnica do método

O método de ensaio consiste essencialmente (fig. 27) em:

a) - Colocação na superfície a estudar de pares de bases de medida normais ao rasgo a abrir, e medição com elongômetro das distâncias entre elas, fig. 28;

b) - abertura com o disco diamantado de um rasgo entre as bases de medida e medição da distância entre elas;

c) - colocação de um macaco plano de forma apropriada que preenche o rasgo e introdução de óleo sobre pressão no macaco com medição das distâncias entre as bases de medida para vários escalões de pressão do óleo.

6.2.3 - Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios têm o aspecto indicado na fig. 29. As várias leituras dos deslocamentos e das pressões correspondentes definem, regra geral, uma recta, que pode ser determinada pelo método dos mínimos quadrados, permitindo assim obter a pressão de can-

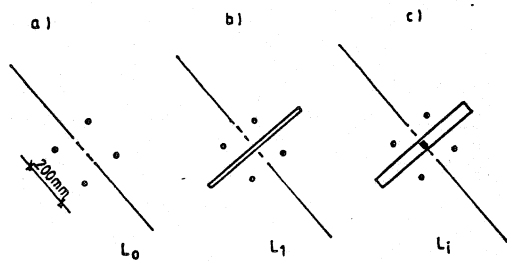


Fig. 27 - Técnica do método SFJ

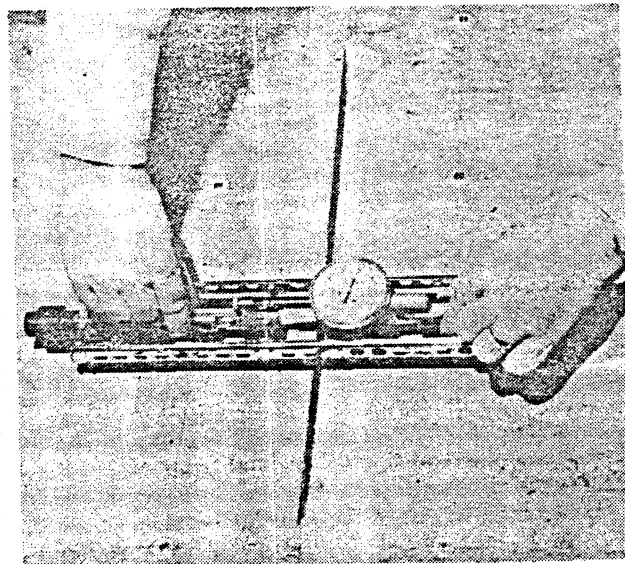


Fig. 28 - Medição com elongômetro

celamento P_0 que corresponde à leitura inicial L_0 .

6.2.4 - Interpretação dos resultados

Uma vez que o macaco não preenche completamente o rasgo aberto, a tensão normal ao rasgo obtém-se por meio da expressão:

$$\sigma = p_0 \frac{s}{S} \quad (9)$$

onde:

- σ - tensão normal ao rasgo,
- p_0 - pressão de restabelecimento da leitura inicial,
- s - área útil do macaco plano,
- S - área do rasgo aberto no macaco rochoso.

7 - ENSAIOS DE FRACTURAÇÃO HIDRÁULICA

7.1 - Introdução

Este tipo de ensaio, efectuado em furos de sondagem que já ultrapassaram os 5000 m de profundidade, per

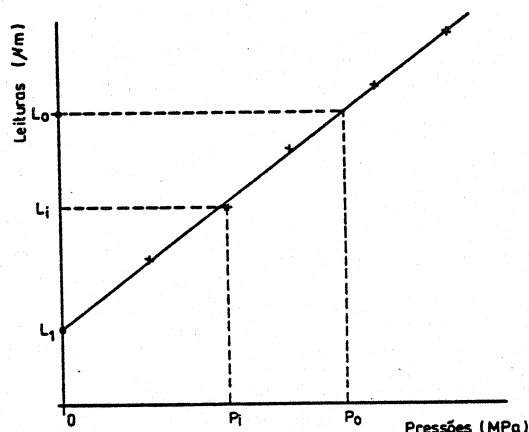


Fig. 29 - Resultados dos ensaios SFJ

mite o acesso a zonas do maciço rochoso inatingíveis pelos métodos tradicionais, justificando assim o aparecimento de um capítulo que lhe é inteiramente dedicado, embora o LNEC não tenha ainda realizado qualquer ensaio utilizando este método.

7.2 - Técnica do método

Nos ensaios de fracturação hidráulica sela-se uma zona do furo de sondagem por meio de obturadores e injecta-se um fluido hidráulico sob pressão, até se atingir uma pressão tal que provoque a rotura da parede do furo, aumentando assim o caudal do fluido injectado.

Parando a injeção do fluido a pressão vai descendo lentamente até ao fechamento da fractura continuando a pressão a baixar até se estabilizar, fig. 30.

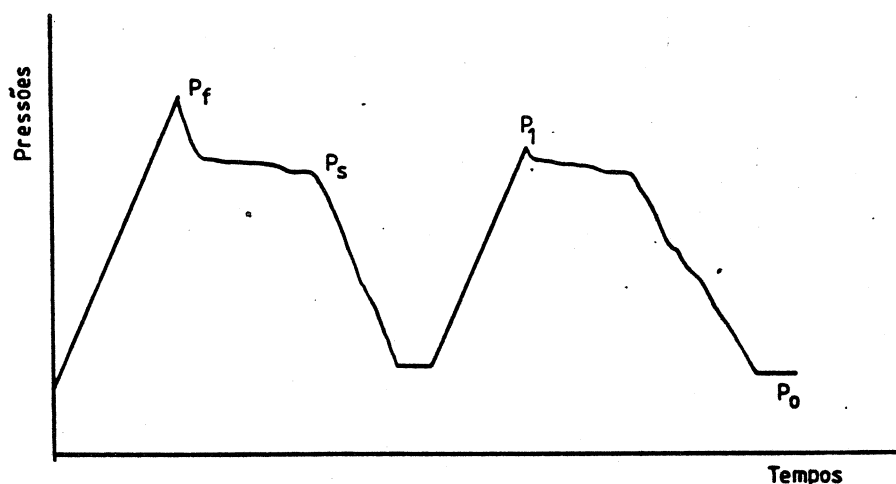


Fig. 30 - Resultados dos ensaios de fracturação hidráulica

Aumentando novamente a pressão, o caudal absorvido aumenta bruscamente logo que se reabra a fissura. Mantém-se a injeção do fluido durante algum tempo e volta a reduzir-se o caudal a 0 e deixa-se a pressão baixar até se estabilizar novamente.

Os ciclos de injeção e não injeção de fluido podem repetir-se o número de vezes julgado necessário.

7.3 - Interpretação dos resultados

Um furo de sondagem, submetido a um fluido sob pressão, abrirá uma fenda de tracção quando a tensão perimetral desenvolvida pe

la pressão, p , do fluido, exceder a tensão na parede do furo e, a resistência à tracção, T_o , da rocha.

Num furo vertical aberto num maciço rochoso contínuo apresentando tensões principais vertical e horizontais, a fractura dar-se-á na horizontal se:

$$p > \sigma_v + T_o \quad (10)$$

ou na vertical se:

$$p > \sigma_t + T_o \quad (11)$$

sendo σ_v a tensão vertical e σ_t a menor das tensões perimetrais.

Se forem σ_H e σ_h as tensões horizontais máxima e mínima e p_o a pressão nos poros, a rotura vertical do maciço dar-se-á para a pressão p_f , fig. 30, dada por:

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H - p_o + T_o \quad (12)$$

Quando se baixa a pressão do fluido deixa de haver escoamento quando a pressão atinge o valor:

$$p_s = \sigma_h \quad (13)$$

Baixando ainda mais a pressão do fluido verifica-se que ela estabiliza quando se atinge a pressão p_o nos poros.

Aumentando novamente a pressão do fluido a fissura reabre para a pressão p_r em que recomeça a absorção do fluido, ou seja para:

$$p_r = 3\sigma_h - \sigma_H - p_o \quad (14)$$

então ter-se-á em face de (12) e (14):

$$T_o = p_f - p_r \quad (15)$$

pelo que, atendendo também à expressão (13), se obtém:

$$\sigma_H = 3p_s - p_r - p_o \quad (16)$$

Estudos teóricos e ensaios de laboratório mostraram que no caso de se utilizarem obturadores de borracha, a fracturação se inicia sempre na vertical, e, na direcção normal à tensão horizontal

menor, mesmo que a tensão vertical seja a menor de todas as tensões, embora a fractura começada na vertical vá mudando de atitude até se tornar horizontal.

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em face do exposto nos capítulos anteriores, verifica-se que existe uma grande dificuldade no conhecimento do estado de tensão dos maciços rochosos, em regra muito variável de ponto para ponto, devido ao grande número de factores que o influenciam.

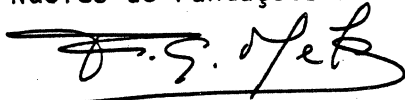
Com excepção dos ensaios de fracturação hidráulica, todas as determinações do estado de tensão são pontuais pelo que o conhecimento global do estado de tensão em zonas bem definidas do maciço rochoso, implica geralmente um grande número de determinações, tanto maior quanto maiores forem a heterogeneidade do maciço e a variação do estado de tensão.

Quanto ao tipo de ensaio, de aparelhagem a utilizar e número de medições a fazer, varia de caso para caso, e, geralmente, só depois de efectuados os primeiros ensaios se poderá estabelecer um programa que permita obter resultados concludentes.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Dezembro de 1989.

VISTOS

O Engenheiro Chefe
do Núcleo de Fundações Rochosas

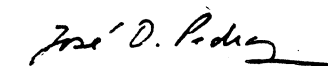

Fernando Guedes de Melo

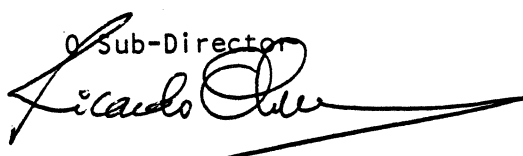
AUTORIA



José Loureiro Pinto
Engº Civil, Investigador-Coordenador

O Engenheiro Chefe do Departamento


José Oliveira Pedro

O Sub-Director

Ricardo Oliveira

BIBLIOGRAFIA

- Aytmatov, I.T. - On virgin stress state of a rock mass in mobile folded areas. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 55-59.
- Batchelor, A.S.; Pine, R.J. - The results of in situ stress determinations by seven methods to depths of 2500 m in the Carnmenellis granite. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 467-478.
- Berthier, M.R.M. - Mesures de contraintes exécutées pour Électricité de France dans ses galeries des Alpes Françaises. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 520-539.
- Blackwood, R.L.; Buckingham, C. - A remotely operated borehole deformation gauge for monitoring stress change in rock. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 369-374.
- Bock, H. - In-situ validation of the bore hole slotting stressmeter. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 261-270.
- Bonnechère, F. - La cellule "Université de Liège" de mesure des déformations d'un forage. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 300-306.
- Bonnechère, F.; Fairhurst, C. - Determination of the regional stress field from "doorstopper" measurements. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stress in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 307-333.
- Chambon, C.; Revalor, R. - Statistic analysis applied to rock stress measurements. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 397-410.
- Charlez, Ph.; Saleh, K.; Despax, D.; Julien, Ph. - A new way to determine the state of stress and the elastic characteristics of rock massive. Proc. Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 313-322.
- Cooling C.M.; Hudson, J.A. - The importance of in situ rock stress in repository design. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 647-656.

- Cornet, F.H. - Stress determination from hydraulic tests on preexisting fractures - the H.T.P.F. method. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 301-312.
- Duncan-Fama, M.E. - Analysis of a solid inclusion in situ stress measuring device. Proc. 4th Congress I.S.R.M.. Montreux, 1979. A.A.Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 113-120.
- Enever, J.R.; Chopra, P.N. - Experience with hydraulic fracture stress measurements in granite. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, Centek Publishers, 1986, pp. 411-420.
- Fairhurst, C. - In-situ stress determination - an appraisal of its significance in rock mechanics. Proc. Rock Stress and Rock Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 3-17.
- Fangquan Li - In situ stress measurements, stress state in the upper crust and their application to rock engineering. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 69-77.
- Haimson, B.C.; Herrick, C.G. - Borehole breakouts - a new tool for estimating in situ stress?. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 271-280.
- Hallbjörn, L. - Rock stress measurements performed by Swedish State Power Board. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986, Centek Publishers, pp. 197-205.
- Hayashi, M.; Kanagawa, T.; Hibino, S.; Motozima, M.; Kitahara, Y. - Detection of anisotropic geo-stresses trying by acoustic emission, and non-linear rock mechanics on large excavating caverns. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 211-218.
- Herget, G. - Changes of ground stresses with depth in the Canadian shield. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 61-68.
- Herget, G. - Stresses in Rock. A.A. Balkema, Rotterdam, 1988.

- Hiltscher, R.; Martna, J.; Strindell, L. - The measurement of triaxial rock stresses in deep boreholes and the use of rock stress measurements in the design and construction of rock openings. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp, 227-234.
- Hobbs, N.B.; Clarke, D.A. - Residual stress measurements by the drill hole prestressed meter and the rigid brass plug. 1st Congress I.S.R.M., LNEC, Lisboa 1966, Vol. 11, pp. 3-7.
- Hughson, D.R.; Crawford, A.M. - Kaiser effect gauging: A new method for determining the pre-existing in-situ stress from an extracted core by acoustic emissions. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 359-368.
- Hustrulid, W. - An analysis of several borehole techniques for determining stress and modulus. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 249-258.
- Karfakis, M.G. - Hydraulic fracturing stress measurements in anisotropic rocks: a theoretical analysis. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 157-166.
- Klein, R.J.; Barr, M.V. - Regional state of stress in Western Europe. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 33-44.
- Kohlbeck, F.; Scheidegger, A.E. - Low-cost monitoring of strain changes. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 189-195.
- Lang, P.A.; Thompson, P.M.; Ng, L.K.W. - The effect of residual stress and drill holes size on the in situ stress determined by overcoring. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 687-694.
- Leeman, E.R. - The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography). Proc. Int. Symp. on the Determination of Stress in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp 200-229.
- Leeman, E.R. - The CSIR "doorstopper" and triaxial rock stress measuring instruments. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 578-616.

- Leijon, B.A. - Application of the LUT triaxial overcoring technique in Swedish mines. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 569-579.
- Ljunggren, C.; Stephansson, O. - Sleeve fracturing - A borehole technique for in-situ determination of rock deformability and rock stresses. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 323-330.
- Lo, K.Y.; Lukajic, B.; Yuen, C.M.K.; Hori, M. - In-situ stresses in a rock overhang at the Ontario Power Generating Station, Niagara Falls. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 343-352.
- Lu, P.H. - A new method of rock stress measurement with hydraulic borehole pressure cells. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986: Centek Publishers, pp. 237-245.
- Manca, P.P.; Siotto, G.; Trois, P. - Essais en Laboratoire avec l'ag pareillage T.S.R.M. avant son emploi in situ. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 389-396.
- Mills, K.W.; Pender, M.J. - A soft inclusion instrument for in situ stress measurement in coal. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 247-251.
- Mills, K.W.; Pender, M.J.; Depledge, D. - Measurement of in situ stress in coal. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 543-549.
- Nai-Hsien Mao - A new approach for calibration and interpretation of IRAD GAGE vibrating-wire stressmeters. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 499-508.
- Natau, O.; Lempp, Ch.; Borm, G. - Stress relaxation monitoring pressed hard inclusions. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 509-514.
- Nishimatsu, Y.; Koide, H.; Koizumi, S. - On the accuracy and evaluation of rock stress measurements in the Kanto-Tokai region, Japan. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 489-498.

- Pan, L.Z. - On ground stress measurement by borehole deformation method using a pre-pressed multiprobe unit of contact type. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 149-156.
- Park, D.W. - Development of a new borehole stress-meter and installation tool. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 217-225.
- Perez-Saiz, A.; Soriano-Peña, A.; Gomez-Arruche, J. - Measurements of natural stresses in rock masses in Spain. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 525-530.
- Pinto, J.L.; Cunha, A.P. - Rock stress determinations with the STT and SFJ techniques. Memória N° 706, LNEC, Lisboa 1988.
- Pratt, H.; Schrauf, T.; Hustrulid, W.; Simonson, E. - A large scale in situ study to determine temperature, deformation and stress fields associated with heater experiments in crystalline rock. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 539-544.
- Roberts, A. - "In situ" stress determination in rock masses. A review of progress in the application of some techniques. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 265-279.
- Rocha, M.; Baptista-Lopes, J.J.; Neves da Silva, J. - A new technique for applying the method of the Flat Jack in the determination of stresses inside rock masses. Memória N° 324, LNEC, Lisboa, 1969.
- Rocha, M.; Silvério, A. - A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses. Memória N° 329, LNEC, Lisboa, 1969.
- Rummel, F. - Stresses and tectonics of the upper continental crust - a review. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 177-186.
- Saxena, P.C.; Mokhashi, S.L.; Rame Gowda, B.M. - Rock stress measurements at Nagjhari tunnels, Kalinadi hydro-electric project, India. Proc. 4th Congress I.S.R.M., Montreux, 1979. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 589-594.

- Silveira, A.F. da - Stress measurements. Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, LNEC, Lisboa, 1969, pp. 37-40.
- Stephansson, O.; Sarkka, P.; Myrvang, A. - State of stress in Fennoscandia. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp.21-32.
- Sugawara, K.; Obara, Y.; Kaneko, K.; Aoki, T. - Hemispherical-ended borehole technique for measurement of absolute rock stress. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 207-216.
- Suzuki, K. - Fundamental study on the rockstress measurement by borehole deformation method. Proc. 1st Congress I.S.R.M, LNEC, Lisboa, 1966, pp. 35-39.
- Swolfs, H.S.; Savage, W.Z. - Topographic modification of in situ stress in extensional and compressional tectonic environments. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 89-98.
- Tinchon, L. - Evolution des contraintes naturelles en fonction de la profondeur et de la tectonique aux Houilleres du Bassin de Lorraine. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 111-120.
- Voight, B. - Restspannungen im Gestein. Proc. 1st Congress I.S.R.M., LNEC, Lisboa, 1966, pp. 45-50.
- Voight, B. - Beziehung zwischen grossen horizontalen Spannungen im Gebirge und der Tektonik und der Abtragung. Proc. 1st Congress I.S.R.M., LNEC, Lisboa, 1966, pp. 51-56.
- Walton, R.J.; Worotnicki, G. - A comparison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 479-488.
- Wang Lianjie; Liao Chunting; Ding Yuanchen; Ou Mingyi - The type YG-73 piezomagnetic stress gauge for rock stress measurement. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 227-235.

Zoback, M.D.; Mastin, L.; Barton, C. - In-situ measurements in deep boreholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts, and stoneley wave polarization. Proc. Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1986. Centek Publishers, pp. 289-299.



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt