

ENSAIOS “IN SITU” NO DOMÍNIO DOS TÚNEIS EM MACIÇOS ROCHOSOS

In Situ Testing of Rock Masses for Tunnelling

por
ARNALDO SILVÉRIO*

RESUMO – Com vista a divulgar as capacidades do LNEC, como organismo de apoio aos projectistas de túneis, no domínio das medições “in situ” que interessam às fases de projecto e de acompanhamento/fiscalização das obras, descrevem-se os métodos desenvolvidos pelo Laboratório para a caracterização da deformabilidade e a apreciação da resistência dos maciços rochosos, bem como para a determinação do estado de tensão neles instalado.

Referem-se, em particular, a utilização do dilatómetro e de defómetros tridimensionais, em furos de sondagem, e o emprego de macacos planos de pequena espessura, em fendas abertas nos maciços rochosos.

SYNOPSIS – To make known the capabilities of LNEC to assist tunnel designers, in the domain of in situ measurements with a bearing on the steps of design and control/supervision of underground construction, a few methods are described, which have been developed by the Laboratório for characterizing the deformability and appraising the strength of rock masses, as well as for determining the states of stress occurring in them.

In particular, a discussion is presented of the use of the dilatometer and stress tensor gauges in boreholes, and of thin flat jacks in test slots cut in rock masses.

1 – INTRODUÇÃO

Nos artigos técnicos em que se descreve o projecto e execução de uma obra subterrânea de vulto (por exemplo, a comunicação apresentada por Dolcetta, em 1971, ao Simpósio da “American Society of Civil Engineers” sobre cavernas em maciços rochosos), as secções em que se encontra dividido o tópico ‘investigações preliminares sobre o maciço rochoso de escavação’ incluem, invariavelmente:

* Físico, especialista do LNEC, Chefe da Divisão de Obras Subterrâneas

(i) a caracterização da deformabilidade “in situ” e frequentemente em laboratório, (ii) a apreciação da resistência em laboratório e por vezes “in situ”, e (iii) a determinação do estado de tensão (original ou virgem). Assim, parece razoável fazer incidir sobre os pontos mencionados as notas, que seguem, relativas a ensaios “in situ” com interesse no domínio das obras subterrâneas – mais particularmente, no dos túneis.

Sem desrespeito pela limitação, que os organizadores da Reunião impuseram ao tema sujeito, referem-se, de passagem, alguns ensaios em laboratório, nomeadamente ensaios em compressão e em tracção, conduzidos geralmente até à rotura dos provetes. Alude-se, ainda, aos ensaios de dureza, meramente para registar que o interesse de que são objecto tem sido avivado por investigações em curso (nomeadamente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Illinois, EUA), que apontam a dureza total como parâmetro que reflecte adequadamente a ‘maquinabilidade’ das rochas, sendo correlacionável com a velocidade de avanço das máquinas escavadoras de túneis.

A grandeza dureza total é definida pelo produto $R\sqrt{A}$, onde R – (“rebound hardness”) dureza dinâmica – é a medida, na escala de Schmidt, da altura de ressalto do martelo Modelo L, disparado com determinada energia contra um provete de rocha; e A – (“modified abrasion hardness”) dureza abrasiva – é o recíproco da perda de massa, em gramas, de um provete submetido a ensaio normalizado de desgaste na máquina rotativa de Tabor.

Finalmente, para que a falta de uma rubrica mais pertinente não venha a justificar a sua completa omissão nas matérias que a Reunião aborda, acentua-se nesta oportunidade a relevância da observação continuada da obra, que os autores de língua inglesa compendiam no vocábulo “monitoring”: (i) a medição de deslocamentos do maciço de escavação – extensómetros instalados em furos de sondagem (“borehole extensometers”), geralmente de ancoragem múltipla, quer mecânicos (de barras, com leitura por deflectómetro adaptável à âncora de boca), quer eléctricos (de fios tendidos, com a âncora de boca munida de uma cabeça sensora, instrumentada com extensómetros eléctricos de resistência ou de indução); e medidores de convergência, de fita de invar, com leitura por deflectómetro; e (ii) a medição de esforços ou tensões em estruturas de suporte, principalmente elementos de entivações metálicas e varões de ancoragem – células, mais frequentemente instrumentadas com extensómetros eléctricos de resistência.

Não cabe na modéstia da presente revisão, nem teria sentido perante o nível de esclarecimento dos participantes na Reunião, empreender a descrição crítica

exaustiva dos métodos de ensaio actualmente disponíveis para conduzir, “in situ”, as investigações atrás enunciadas. São bem conhecidos, aliás, os textos a que pode recorrer-se para uma familiarização com tais métodos: por um lado, indicam-se deformabilidade – “Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock”, ASTM Special Technical Publication 477. Philadelphia 1970,

resistência – ROCHA, M. – “Mecânica das Rochas”, cap. IV. LNEC, Lisboa 1971,

estado de tensão – “Proceedings, International Symposium on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lisbon, May 19-21, 1969”. LNEC, Lisboa 1971;

por outro lado, citam-se os anais dos três congressos internacionais organizados pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, bem como os documentos que foram ou estão em vias de ser produzidos por três das comissões constituídas no âmbito da Sociedade, a saber, a ‘Comissão de Normalização de Ensaios em Laboratório e in Situ’, a ‘Comissão sobre Observação (“Monitoring”)’ e a ‘Comissão sobre o Comportamento de Túneis e outras Aberturas Permanentes’.

A exposição, que vai ser apresentada, incide essencialmente sobre os métodos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e tem em vista divulgar as capacidades do Laboratório como organismo de apoio aos projectistas de túneis, no domínio das medições “in situ” que interessam às fases de projecto e de acompanhamento/fiscalização da execução das obras.

2 – CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE

2.1 – *Nota sobre ensaios em laboratório*

Em regra, a caracterização da deformabilidade de um maciço rochoso não pode ser realizada mediante ensaios em laboratório, por não serem exequíveis a colheita e o ensaio de amostras suficientemente grandes para serem representativas do maciço no respeitante a compartimentação e heterogeneidade. No entanto, o conhecimento da deformabilidade da própria rocha, isto é, do material dos blocos definidos pelas superfícies de compartimentação, tem um múltiplo interesse: fornece o limite inferior das deformabilidades expectáveis do maciço; permite que seja tida em conta a influência da fracturação na deformabilidade, não só na interpretação dos resultados de ensaios “in situ”, mas também na previsão de tais resultados a partir de medições feitas no laboratório; e habilita a estudar

o papel de alguns parâmetros, como o grau de saturação e o tempo de actuação das solicitações, na deformabilidade do maciço. Aliás, é de notar que a deformabilidade de um maciço rochoso tende em geral para a deformabilidade da rocha, à medida que aumenta a profundidade.

Os parâmetros, que intervêm na caracterização da deformabilidade das rochas – constituição petrográfica, textura, estado de alteração e grau de saturação da rocha; forma e dimensões do provete; temperatura e tipo de solicitação impostos ao provete, considerados ao longo do seu tempo de actuação; e escalas de observação no espaço e no tempo –, dão a pauta para a nomenclatura dos ensaios de laboratório mais correntes: ensaios em compressão simples, ensaios em tracção simples e ensaios em solicitação triaxial, realizados quer em regime rápido quer em regime de fluência. É óbvio que, nos maciços em que se inserem, as rochas se encontram mais frequentemente submetidas a estados triaxiais de tensão; contudo, mesmo o comportamento das rochas sob solicitações uniaxiais evidencia fenómenos que têm interesse fundamental na mecânica dos meios rochosos.

O estudo do comportamento das rochas sob solicitação triaxial tem-se

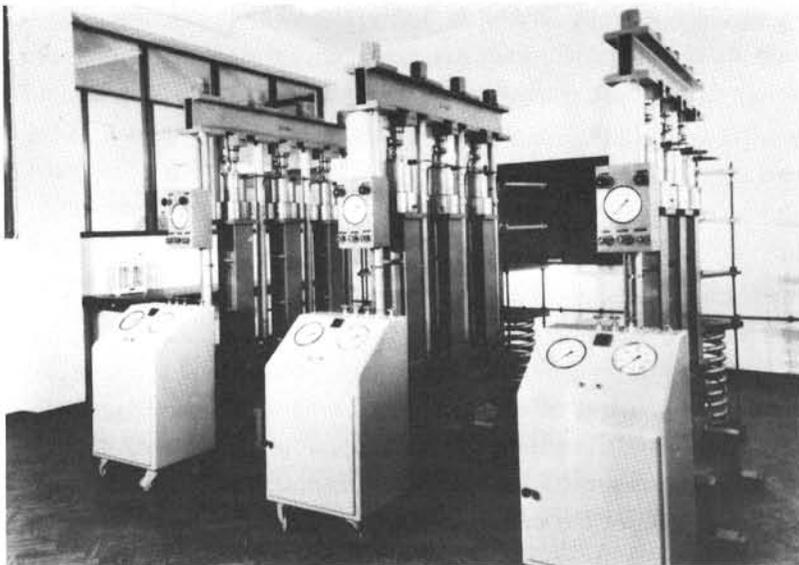


Fig. 1

apoiado, quase exclusivamente, em ensaios realizados à maneira dos clássicos ensaios triaxiais da mecânica dos solos: aplica-se, por meio de um líquido, uma pressão lateral ao provete, e sobrepõe-se a esta solicitação uma compressão axial. O Laboratório dispõe de câmaras metálicas (veja-se a Fig. 1), que permitem a aplicação de pressões de confinamento até 1000 kgf/cm^2 (100 MN/m^2) a provetes cilíndricos cujo diâmetro não exceda 7,5 cm. Usando um dispositivo automático como o que se apresenta na Fig. 1, podem manter-se constantes tanto a pressão lateral como a pressão axial, com o objectivo de estudar o comportamento da rocha em regime de fluência, por exemplo ao longo de meses.

A medição das deformações dos provetes submetidos a ensaios triaxiais constitui mais um delicado problema, para cuja resolução têm contribuído novos tipos de extensómetros eléctricos de resistência.

2.2 – *Ensaio “in situ”*

Perante a necessidade de fazer intervir na caracterização mecânica dos maciços rochosos volumes de material estruturalmente representativos à escala da obra, e que não tenham sido significativamente perturbados pela inevitável abertura das vias de acesso aos locais de ensaio, desenvolveu o LNEC um método que permite ensaios relativamente rápidos e tem como peça fundamental uma bateria de macacos planos de pequena espessura alojados em fendas no maciço em estudo. Por outro lado, tendo presente o grande interesse em avaliar a deformabilidade dos maciços rochosos ao longo de furos de sondagem, desde as fases iniciais dos estudos geomecânicos suscitados pelas obras, o Laboratório projectou também um dilatómetro, cujo aspecto mais original é a capacidade de operar nos furos assaz estreitos, que a prospecção geológica deixa em geral disponíveis nos locais das obras.

2.2.1 – *Caracterização da deformabilidade através de ensaios em furos de sondagem. Dilatómetro*

O dilatómetro do LNEC satisfaz às condições seguintes: (i) é adequado para diâmetros de ensaio de 76 a 82 mm e profundidades até 200 m na vertical, e continua operacional em furos que contenham água; (ii) aplica pressões radiais até 200 kgf/cm^2 (20 MN/m^2); e (iii) mede a menos de $1 \mu\text{m}$ os deslocamentos radiais da parede do furo de ensaio, segundo quatro direcções diametrais angularmente afastadas de 45° . O aparelho pode ser usado num furo aberto em qualquer direcção, embora a extensão ensaiável do furo se reduza à medida que a direcção se aproxima da horizontal.

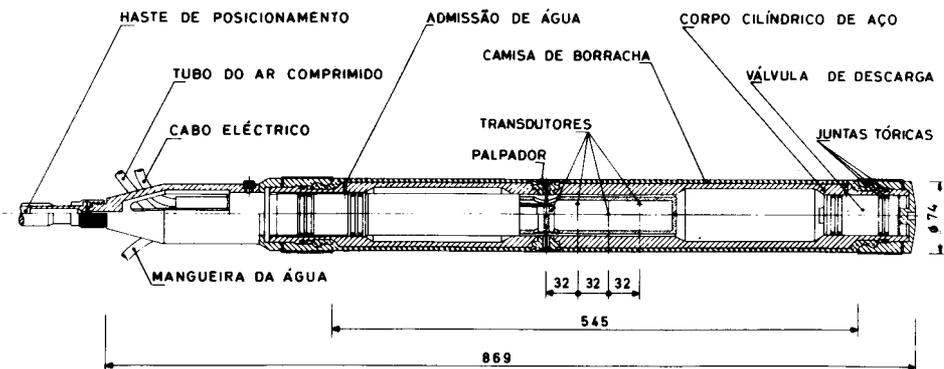


Fig. 2

Na Fig. 2 apresenta-se esquematicamente o dilatômetro, em corte longitudinal. O diâmetro externo do aparelho na zona que aplica a pressão de ensaio é 70 mm, o que corresponde a uma folga de 6 mm em relação ao diâmetro mais frequente de um furo de sondagem NX (76 mm). Bombeando água para o espaço compreendido entre a camisa flexível e o corpo rígido do dilatômetro, impõe-se à parede do furo uma pressão radial uniforme num troço de altura maior que o sêxtuplo do diâmetro. Concluído o ensaio em cada ponto, a própria bomba de água acciona uma válvula de descarga, através da qual se esco a água retida pela camisa, ficando o dilatômetro liberto e em condições de ocupar no furo outra posição de ensaio.

Oito palpadores, solidários com a camisa a intervalos azimutais de 45°, acompanham a parede do furo de ensaio, nos seus deslocamentos radiais. Os dois palpadores opostos, que pertencem a cada plano diametral, estão centrados em secções rectas distantes de 15 mm; para palpadores afastados angularmente de 45° a distância correspondente é 40 mm. Cada palpador está ligado com rigidez axial ao núcleo magnetizado de um transdutor de deslocamentos, de alcance 5 mm. A sensibilidade global do aparelho traduz-se por uma variação de 2 divisões sobre o instrumento de leitura, quando é de 1 μ m o deslocamento radial a medir.

A Fig. 3 mostra o equipamento de ensaio, com excepção das hastes de posicionamento, de aço, que instalam o dilatômetro dentro do furo de sondagem e definem tanto a sua profundidade como o seu azimute na posição de ensaio.



Fig.3

Nos diagramas de carga típicos, que constam das Fig. 4, 5 e 6, as ordenadas são pressões aplicadas pela camisa do dilatómetro; em abcissas representam-se as decorrentes deformações diametrais, numa das quatro direcções de medição. Encarando o maciço rochoso ensaiado como um meio homogéneo, isótropo e elástico, deduzem-se daqueles diagramas módulos de deformabilidade

$$E = (1+\nu) d e$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do maciço, d é o diâmetro do furo de ensaio e e representa a taxa (secante) de variação da pressão aplicada com a decorrente deformação diametral do furo, lida sobre cada diagrama para o domínio de pressões de ensaio com interesse.

Em paralelo com os ensaios clássicos de deformabilidade, em que se usam macacos hidráulicos de tipo convencional, os ensaios com dilatómetro revelam frequentemente grandes deformações iniciais, devidas sobretudo a descontinuidades estruturais dos materiais ensaiados. A mesma causa pode ser invocada a respeito da magnitude da deformação residual do primeiro ciclo de carga, assim como do decrescimento desta grandeza nos ciclos sucessivos.

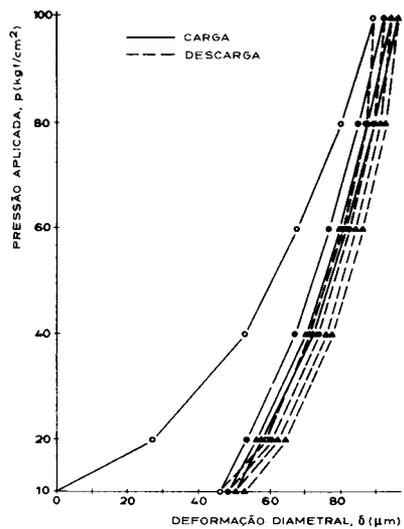


Fig. 4

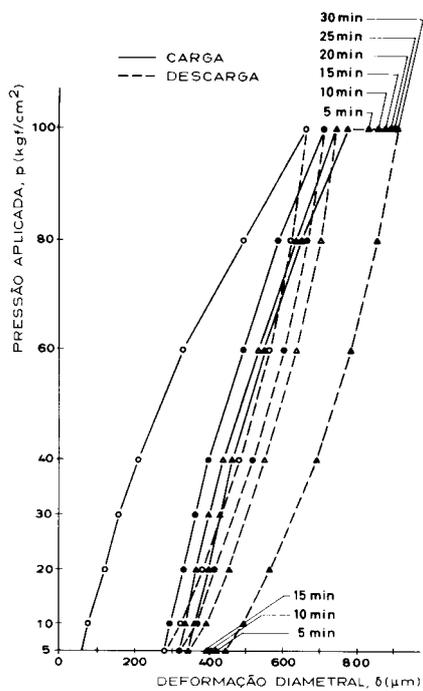


Fig. 5

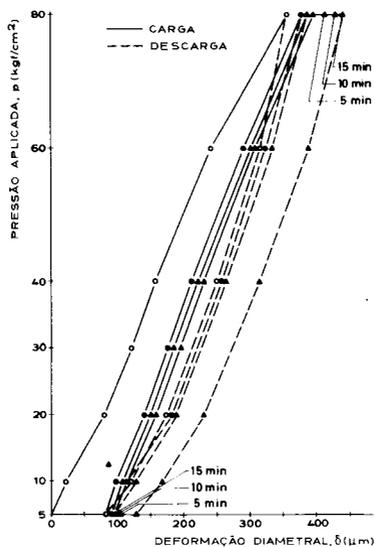


Fig. 6

Os diagramas 'p contra δ ' são, em geral, curvas com a concavidade orientada no sentido da pressão crescente; contudo, tal pode não ocorrer no ramo ascendente dos ciclos de histerese, particularmente no do primeiro. Também são assaz frequentes curvas em forma de S, reflectindo o comportamento plástico-elástico-plástico, familiar entre os materiais rochosos. As Fig. 4, 5 e 6 ilustram precisamente os três tipos de diagramas. A primeira refere-se a uma profundidade vizinha de 57 m, numa formação de metassiltito e ardósia; as outras duas respeitam a ensaios pouco profundos, conduzidos a menos de 1 m da superfície de um terreno xistente de baixo do módulo de deformabilidade.

Como é óbvio, a forma dos diagramas de carga é influenciada pelos pormenores do programa do ensaio, que se fazem depender da natureza do maciço em apreço. Quando se ensaia um maciço rochoso facilmente deformável, atribuem-se valores pequenos às pressões máximas dos ciclos de carga e devotam-se intervalos de tempo curtos à apreciação da fluência do maciço carregado, i.e., do progresso da deformação do maciço sob pressão aplicada constante. Pelo contrário, há maciços rochosos aos quais é necessário aplicar pressões elevadas – pressões máximas da ordem de 100 ou 200 kgf/cm² (10 ou 20 MN/m²), por exemplo – para obter deformações que o dilatómetro possa medir com precisão adequada.

Os últimos requerem períodos de ensaio longos, sempre que se investiga o comportamento do maciço em regime de fluência. No plano 'deformações diametrais contra tempos', da Fig. 7 (compare-se à Fig. 5), implantaram-se resultados obtidos com o dilatômetro, em fluência sob a pressão aplicada 100 kgf/cm² (10 MN/m²). Pode notar-se que o furo de ensaio, aberto através de um maciço xistoso na direcção perpendicular à xistosidade, teve deformações diametrais apreciáveis em intervalos de tempo da ordem de 30 min. Aliás, os diagramas patenteiam que a deformabilidade por fluência depende da orientação da carga em relação ao maciço rochoso ensaiado, nomeadamente, que o domínio a que pertencem as direcções diametrais 2 e 3 exhibe maior deformabilidade que o domínio que contém as direcções 1 e 4.

A circunstância de o dilatômetro aplicar uma pressão radial uniforme à parede do furo de ensaio e medir deslocamentos ao longo de várias direcções diametrais sugere a utilização do aparelho no estudo da anisotropia dos maciços rochosos, quanto à deformabilidade. Nesta linha de acção, pode adoptar-se a equação de uma quártica fechada, para descrever o lugar geométrico das extremidades dos vectores que representam os módulos de deformabilidade do maciço rochoso ensaiado, nas direcções equatoriais de medição que convergem no 'ponto de ensaio' sobre o eixo do furo de sondagem.

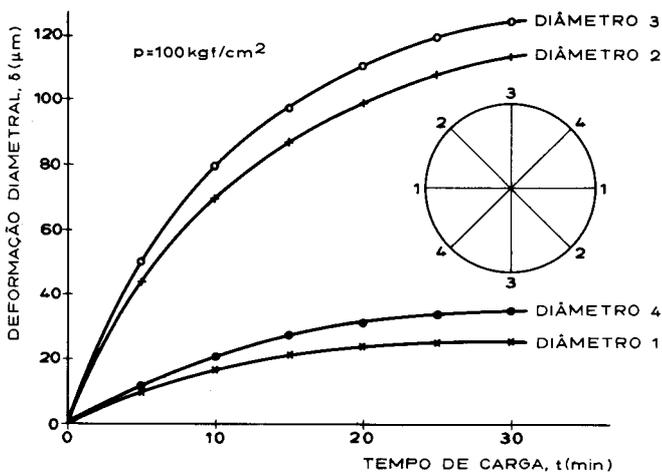


Fig. 7

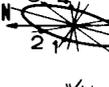
PROFUNDIDADE (m)	ELIPSE DE ANISOTROPIA E (10 ³ kgf/cm ²)	SEMI-EIXOS DA ELIPSE (10 ³ kgf/cm ²)	COEFICIENTE DE ANISOTROPIA	PROFUNDIDADE (m)	ELIPSE DE ANISOTROPIA E (10 ³ kgf/cm ²)	SEMI-EIXOS DA ELIPSE (10 ³ kgf/cm ²)	COEFICIENTE DE ANISOTROPIA
38,00		211 150	1,41	67,20		306 190	1,61
41,50		276 184	1,50	70,70		371 287	1,29
45,10		290 173	1,68	78,50		593 126	4,71
48,00		289 164	1,76	80,60		253 188	1,35
55,00		243 135	1,80	85,20		269 212	1,27
62,60		403 182	2,21	89,00		300 245	1,22

Fig.8

Quando não há evidência de superfícies que induzam anisotropia, as figuras de anisotropia que se obtêm são elipses ou círculos – cónicas nas quais as quárticas podem, efectivamente, degenerar. Como exemplo, a Fig. 8 mostra as elipses mais prováveis dos módulos de deformabilidade, determinadas pelo método dos mínimos quadrados, para um furo profundo num maciço rochoso compacto essencialmente constituído por siltito. Os valores, inscritos na figura como coeficientes de anisotropia, são as meras razões dos semi-eixos de cada elipse.

Pelo contrário, o computador tem produzido quárticas, quando alimentado com dados provenientes de maciços rochosos que exibem planos de xistosidade ou estratificação, ou sistemas de diaclases. As ilustrações dessas formas, que na Fig. 9 se compendiam com as das cónicas anteriormente referidas, suscitam o esclarecimento de que é fácil obter medidas correspondentes a mais do que quatro direcções diametrais: basta realizar dois ensaios em cada ponto considerado, rodando o dilatómetro, entre o primeiro ensaio e o segundo, por exemplo do ângulo azimutal 22° 30'.

Quando o objectivo imediato de um programa de trabalhos com o dilatómetro é a atribuição de um valor médio a cada zona do maciço rochoso em estudo, os

ensaios devem ser continuados até à estabilização do módulo de deformabilidade médio sobre cada zona. Alcançada esta situação, obtém-se prontamente o quadro da variação da deformabilidade com a profundidade no maciço. Então, tendo na devida conta a geologia do local, é muitas vezes possível extrapolar a profundidades não atingidas com o dilatómetro os resultados facultados pelo aparelho.

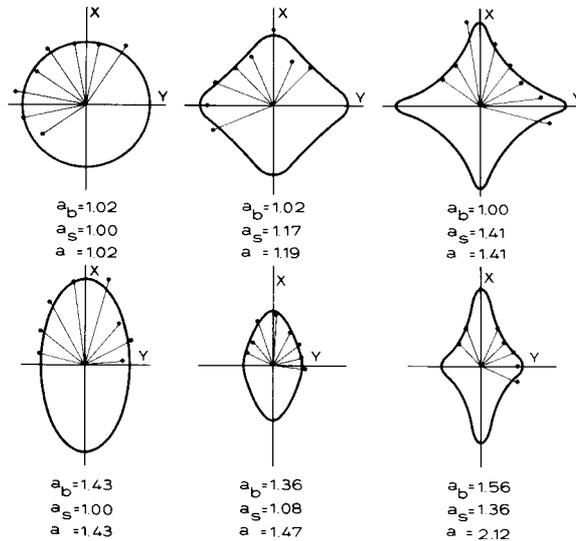


Fig. 9

A Fig. 10 apresenta os resultados de um programa de ensaios, conduzido em sete furos de sondagem com vista a colher informação sobre o maciço rochoso de escavação de uma central hidroeléctrica subterrânea e respectiva galeria de fuga. Nos furos disponíveis, cuja profundidade não excedia 94,50 m, os troços mais profundos forneceram resultados de ensaio absolutamente satisfatórios. Por outro lado, a prospecção prévia tinha mostrado que o maciço rochoso, constituído por metassiltito e ardósia com intercalações calcárias, melhorava em qualidade mecânica com a profundidade. Assim, pareceu legítimo concluir que, à profundidade das estruturas projectadas, não era provável a ocorrência de dificuldades causadas pela deformabilidade do maciço. Com aspecto diferente, reúnem-se na Fig. 11 outros dois diagramas 'profundidades contra deformabilidades', nos quais foram

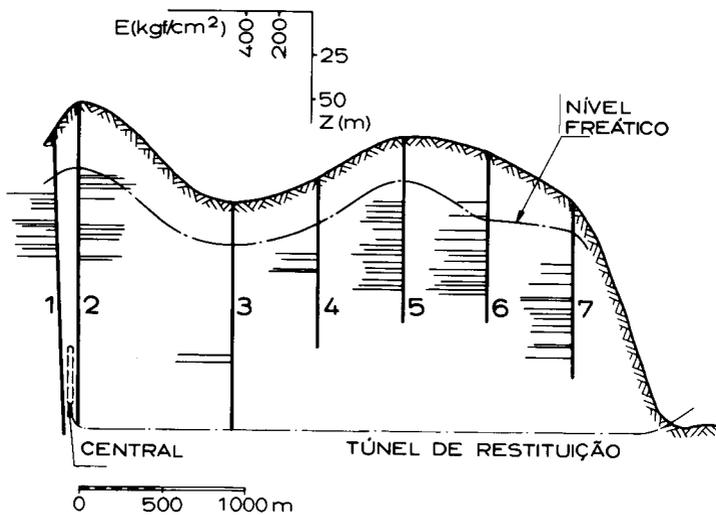


Fig.10

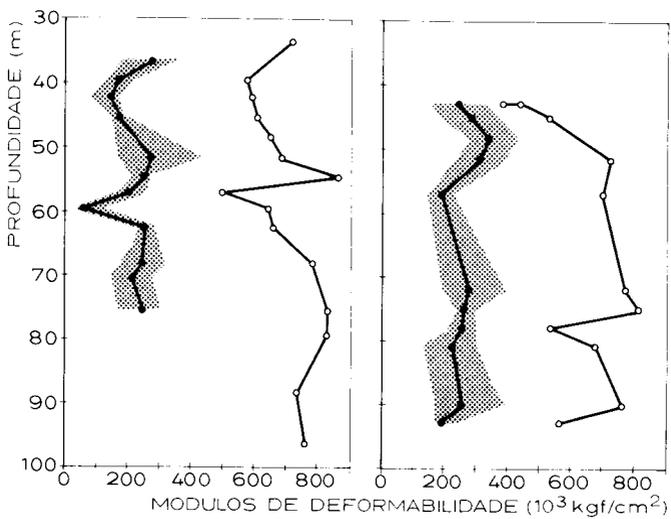


Fig.11

implantados, em face do mesmo eixo de ordenadas, tanto os módulos obtidos com o dilatómetro como os módulos determinados sobre tarolos de sondagem. Na figura, as profundidades referem-se às posições ocupadas, quer pelo centro do tarolo antes da respectiva extracção, quer pelo centro do dilatómetro durante o ensaio. Das medidas “in situ”, representaram-se os módulos de deformabilidade médios, notados por círculos, e os módulos extremos, a delimitar bandas a tracejado; os módulos de deformabilidade obtidos sobre tarolos de sondagem ensaiados em laboratório foram representados por circunferências. Verifica-se que a dependência da profundidade é bastante semelhante para os módulos respeitantes ao dilatómetro e aos tarolos, embora não pareça existir uma correlação linear entre as medidas das duas proveniências.

Para conduzir a comparação de resultados em moldes mais significativos, tem-se programado ensaios paralelos de campo e de laboratório, nos quais as medições interessam direcções equivalentes quanto à anisotropia dos materiais estudados. Torna-se, assim, possível definir um factor de redução, que habilita a estimar o módulo de deformabilidade orientado, em pontos não ensaiados com o dilatómetro, a partir de medições no laboratório.

Até agora, o LNEC realizou mais de quatrocentos ensaios com o dilatómetro, constantes de dez programas que cobriram um largo espectro de interesses em engenharia civil. Considera-se que o ensaio completo, em dois pontos no mesmo furo de sondagem, traduz a produção expectável de meio dia (4 h) de trabalho de uma equipa constituída por dois operadores especializados e um trabalhador indiferenciado. Como o rendimento se reduz a cerca de metade, quando ocorre a mudança de furo de ensaio, parece realístico estimar prazos mediante a adopção de uma taxa global de um a dois pontos ensaiados por dia.

Com base na experiência já disponível, pode afirmar-se que o dilatómetro é uma ferramenta importante na apreciação preliminar da deformabilidade dos maciços rochosos: o índice de qualidade, que ele fornece, torna possível uma divisão em zonas do maciço rochoso cuja deformabilidade condiciona o comportamento da estrutura em consideração, seja ela uma barragem ou uma obra subterrânea. E tal passo pode ser decisivo na elaboração de um programa mais vasto, que envolva ensaios morosos e caros, por exemplo, ensaios com macacos convencionais ou com macacos planos de pequena espessura: por um lado, limitando o número dos ensaios; por outro lado, sugerindo a localização daqueles que são propostos.

À colação de ensaios com o dilatómetro, não pode deixar de referir-se o dispositivo experimental que formalmente resulta da expansão homotética do dilatómetro e respectivo furo de alojamento: a câmara de pressão, constituída por um troço do próprio túnel 'circular' em estudo ou de uma galeria de prospecção, que se isola com obturadores e reveste de uma membrana impermeável, após o que se preenche com água cuja pressão se faz aumentar enquanto se medem as deformações radiais decorrentes. Obviamente, desde que se cumpram determinados requisitos de dimensionamento (nomeadamente, que a dimensão longitudinal não seja inferior ao sêxtuplo do diâmetro), interpreta-se o ensaio com câmara de pressão por recurso à fórmula adoptada para os ensaios com o dilatómetro.

Pela disponibilidade e acessibilidade de espaço axial, bem como pela facilidade de adaptação ao uso de extensómetros radiais, com ancoragens múltiplas em furos de sondagem abertos a partir da superfície de carga, a câmara hidráulica tende a ser substituída pelo sistema de carga radial por macacos periféricos de pequena espessura, que se esquematiza na Fig. 12 e do qual o LNEC tem em estudo um protótipo.

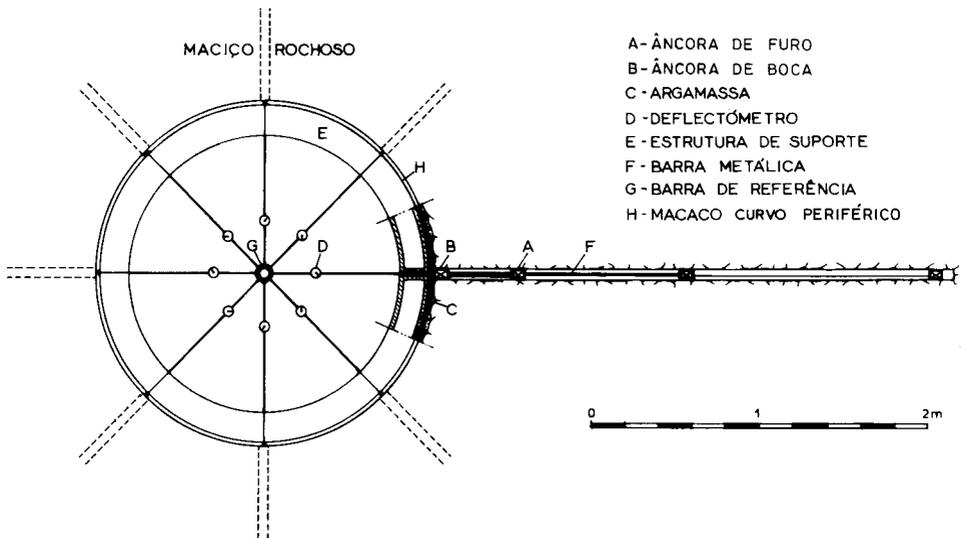


Fig.12

2.2.2 – *Caracterização da deformabilidade mediante ensaios em fendas. Macacos planos de pequena espessura*

Deve ter-se presente que, embora utilizado sobre maciços rochosos muito pouco perturbados pela mera abertura dos furos de ensaio, o dilatómetro instala na vizinhança desses furos um estado de tensão complexo, cujas componentes de tracção podem causar fracturação da rocha e exercer sobre as deformações uma influência difícil de calcular. Por outro lado, a representatividade dos resultados é frequentemente posta em dúvida, com base na exiguidade do volume de maciço rochoso que é de facto interessado por cada ensaio.

Para estender as medições a volumes mais representativos dos maciços ensaiados, tem sido corrente a utilização de macacos planos, que se alojam em rasgos abertos nos maciços. Os macacos planos comuns são recipientes de inflar com a forma de pratos cobertos de altura próxima de 25 mm, compostos por duas chapas circulares de aço soldadas ao longo dos rebordos que as limitam. Em geral, os rasgos de alojamento, obtidos por abertura de furos complanares paralelos e contíguos e destruição dos septos remanescentes, são cavidades de paredes irregulares, nas quais se atacam os macacos com argamassa de cimento, que transmite ao maciço rochoso as pressões hidráulicas estabelecidas. Assim, os macacos planos têm constituído equipamento perdido nos ensaios.

Fundamentalmente, o LNEC contribuiu para a tecnologia do ensaio reduzindo os macacos planos a almofadas de espessura 6 mm, e desenvolvendo uma serra de disco diamantado, a qual, realizando fendas de abertura 7 mm, proporciona o alojamento justo dos macacos. A dispensa do recurso à argamassa de enchimento permite, então, que o equipamento de ensaio seja facilmente recuperado.

A Fig. 13 é uma fotografia de dois macacos planos, iguais quanto à pequena espessura e à grande área das superfícies de carga, mas diferentes nas chapas de guarda, através das quais se tem acesso ao interior instrumentado dos macacos. A altura da chapa de guarda é tomada igual a 250 mm (cota que se inscreve na Fig. 14) ou 750 mm, consoante a fracturação do maciço em estudo e tendo em vista evitar a rotura através da superfície livre, por acção da pressão aplicada. Como está indicado na Fig. 14, cada macaco plano contém quatro lâminas deformométricas, munidas de extensómetros eléctricos de resistência em ponte completa, que medem localmente a espessura instantânea do macaco, permitindo acompanhar ao longo do ensaio a variação da abertura da fenda de alojamento. Há lâminas deformométricas disponíveis com alcances diferentes, cuja montagem assegura a eficaz utilização dos macacos em maciços rochosos de deformabilidades

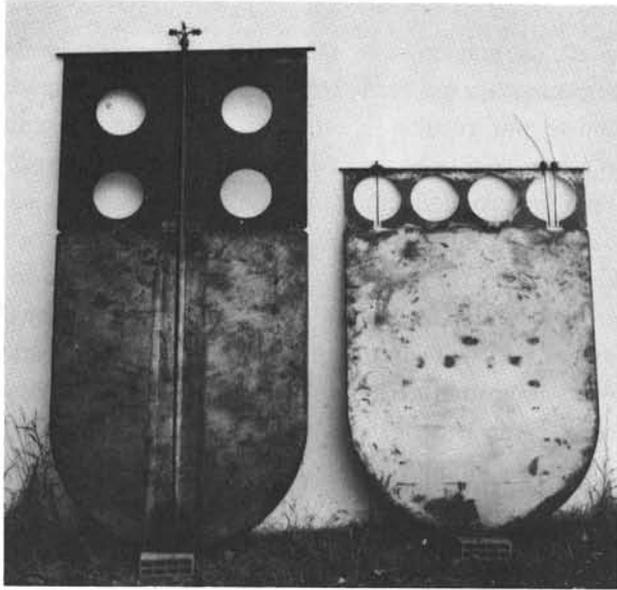


Fig. 13

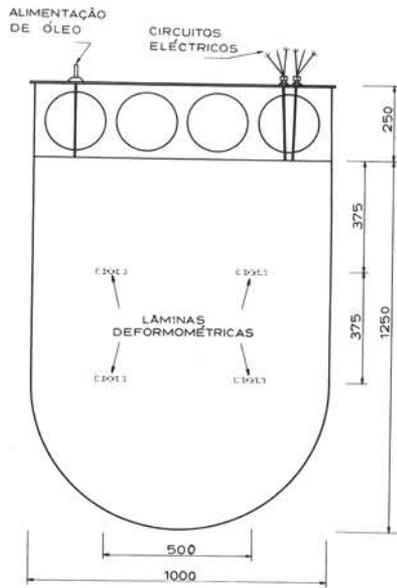


Fig. 14

muito díspares.

As curvas de calibragem, que são pautas de conversão das leituras sobre cada lâmina deformométrica nas correspondentes espessuras do macaco (ou aberturas da fenda), obtêm-se por recurso à estrutura resistente apresentada na Fig. 15. O macaco plano é introduzido horizontalmente no respectivo espaço de alojamento e referenciado por quatro deflectómetros, cujas ponteiras se apoiam numa das superfícies de carga do macaco, em pequenas zonas que a estrutura deixa acessíveis em torno do centro de cada lâmina a calibrar. Enche-se então o macaco com óleo, a que se comunica pressão com uma bomba manual; e reproduz-se a marcha de um ensaio "in situ", lendo simultaneamente, para cada ponto de medição, tanto um indicador de extensões, ligado aos extensómetros da lâmina interior ao macaco, como o deflectómetro que se apoia no ponto exterior oposto. Dado que os diagramas obtidos são rectilíneos em todo o domínio da pressão

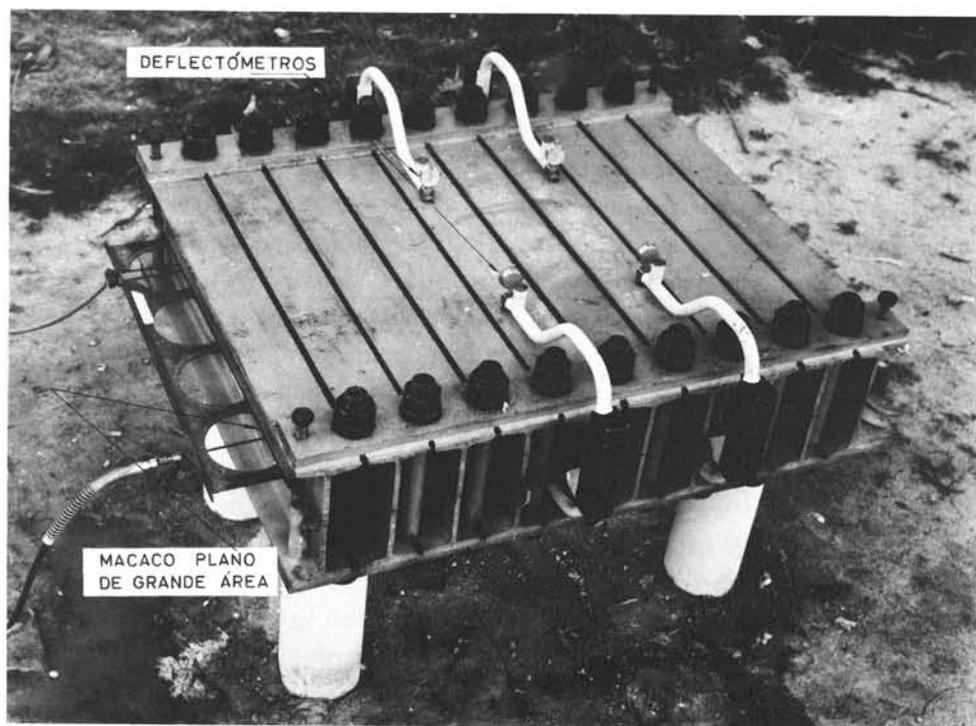


Fig.15

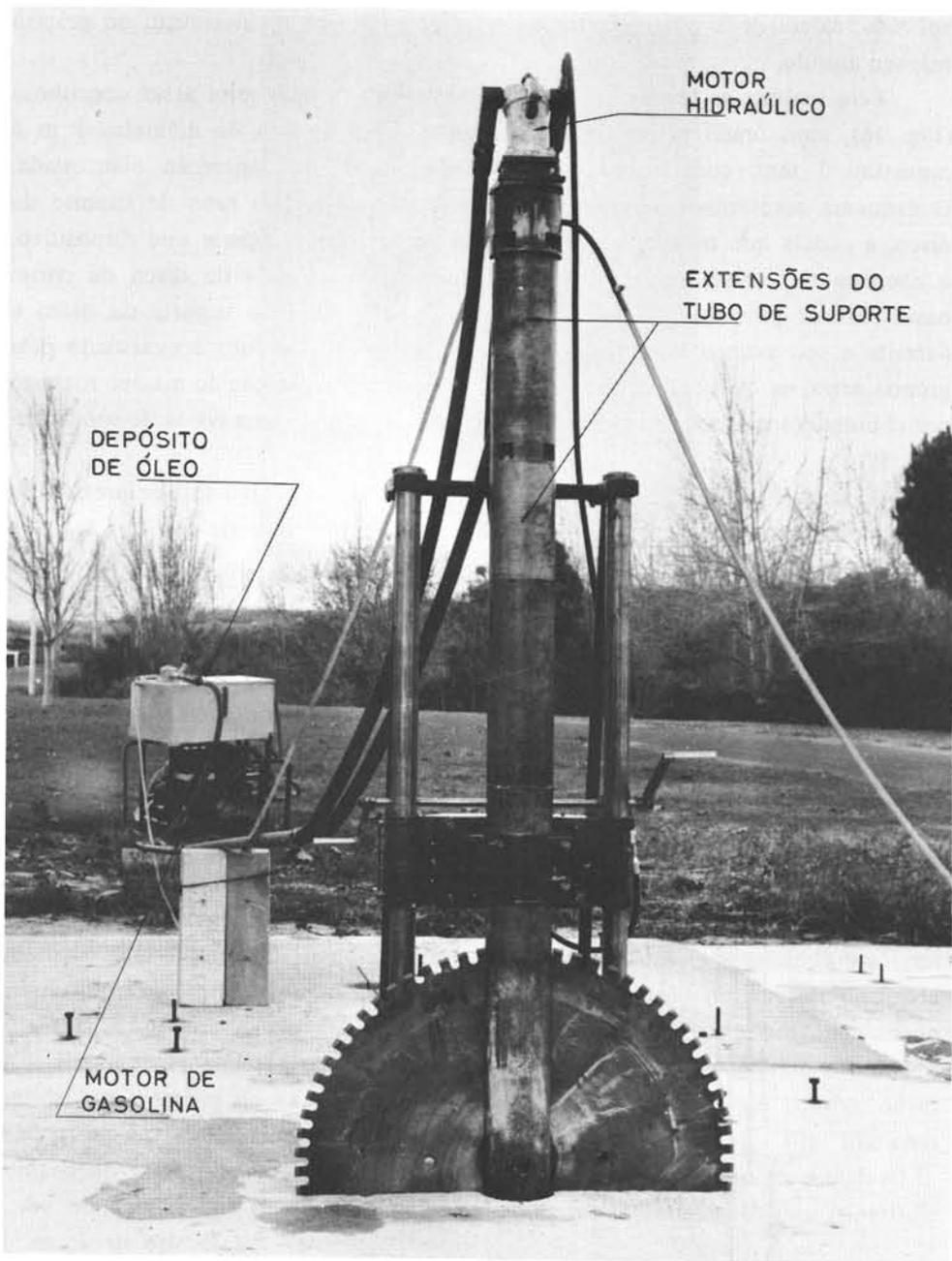


Fig.16

aplicada, calculam-se quatro factores de calibragem, que se inscrevem no próprio macaco aferido.

Para realizar as fendas de ensaio desenvolveu-se uma serra assaz engenhosa (Fig. 16), cujo órgão principal é um grande disco de aço de diâmetro 1 m e espessura 7 mm, com bordo cortante segmentado, de concreção diamantada. O esquema apresentado na Fig. 17 assinala, no interior do tubo de suporte do disco, a cadeia que transmite o movimento de rotação. Graças a este dispositivo, a abertura de fendas pode ser levada muito além do raio do disco de corte: basta realizar previamente um furo, que receba o tubo de suporte do disco e permita o seu avanço à medida que o corte progrida. Tal furo é executado pela própria serra, na qual podem montar-se, sem perturbar a fixação ao maciço rochoso por chumbadouros expansivos, quer o disco de corte, quer uma coroa de sondagem (Fig. 18).

A serra é accionada por um motor hidráulico, cujo óleo recebe pressão de uma bomba acoplada a um motor eléctrico ou a um motor de gasolina (veja-se

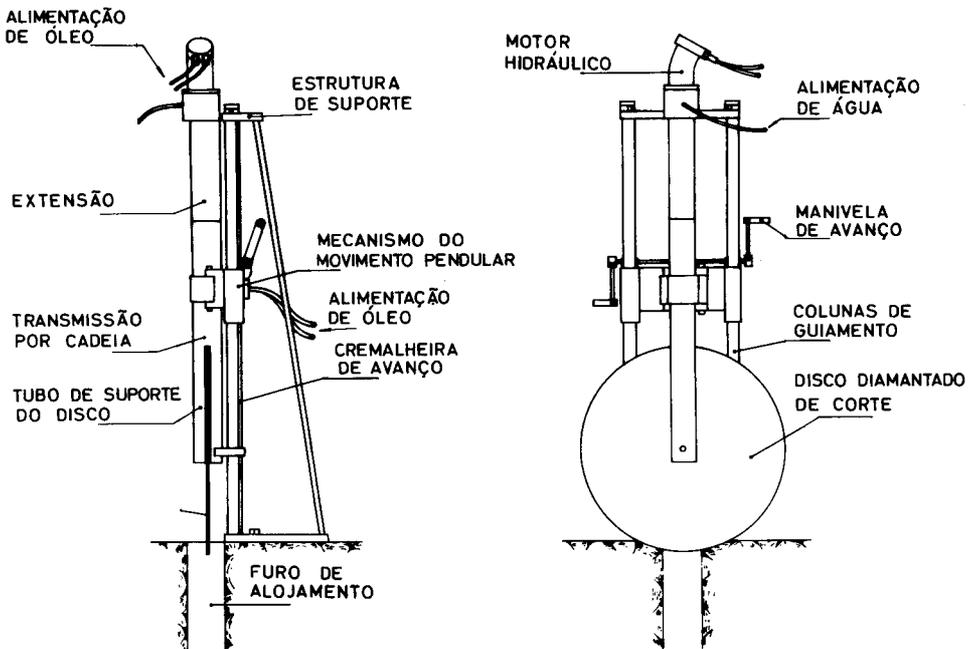


Fig.17

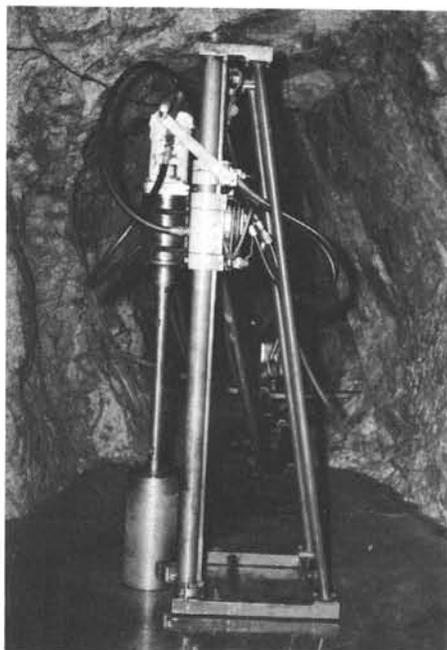


Fig. 18

a Fig. 16). Entre a bomba e o motor hidráulico o óleo circula através de tubos para alta pressão, unidos em número suficiente para permitir que o motor de gasolina, a que mais frequentemente tem de recorrer-se, permaneça ao ar livre, sem contribuir para a poluição da galeria em que são praticados os cortes. Além da cremalheira de avanço, que move o travessão da serra ao longo das colunas de guiamento da respectiva estrutura de suporte, há um mecanismo que comunica ao disco um movimento pendular de pequena amplitude, assegurando-lhe uma folga que propicia a manutenção do seu regime de rotação no interior da fenda que está a ser aberta. No modelo de serra mais recente, tanto o avanço como a oscilação têm comando manual e comando automático. Expandindo a unidade básica por inserção de extensões no tubo de suporte do disco, é possível levar a abertura de fendas até 2,5 m de profundidade (veja-se, ainda, a Fig. 16), com tempos de corte que dependem da qualidade da rocha mas não excedem 10 h. Cabe mencionar que a estrutura da serra pode ser chumbada a uma superfície de ensaio de orientação qualquer.

A Fig. 19 mostra um macaco plano de pequena espessura, a ser introduzido numa fenda de profundidade 1,9 m, na qual dois outros macacos estavam já

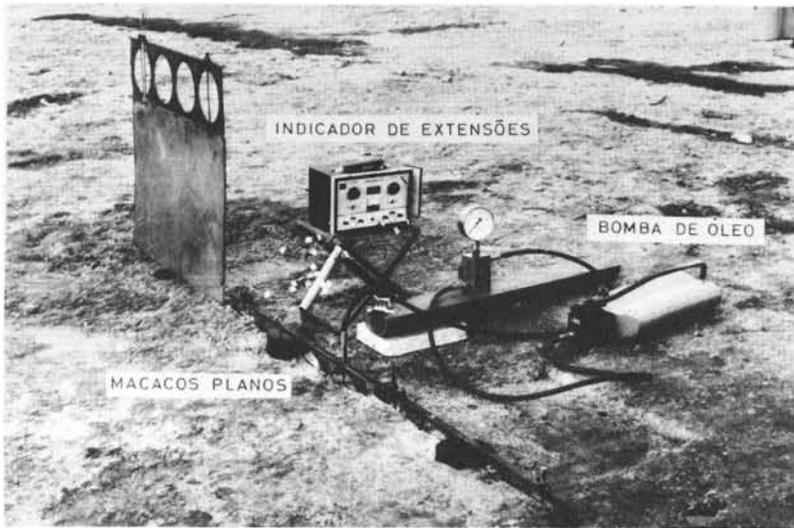


Fig. 19

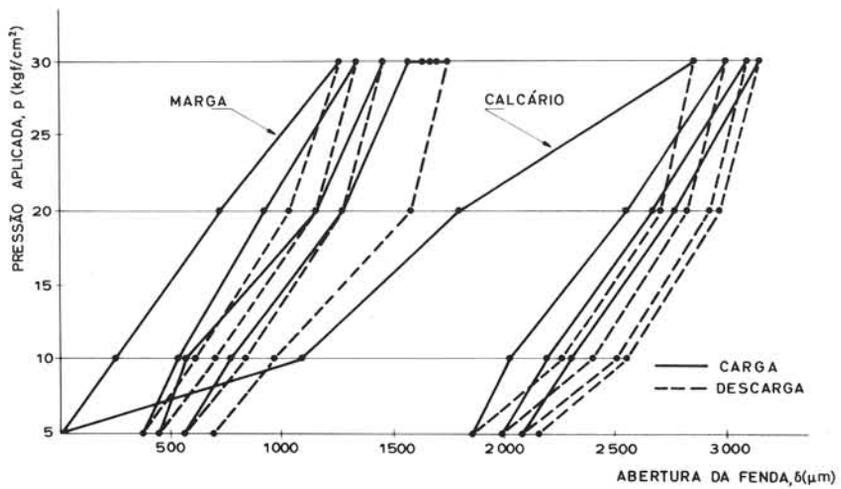


Fig. 20

instalados. Com o preenchimento do remanescente dos furos auxiliares por argamassa de cimento, os macacos suportam pressões de ensaio maiores do que 100 kgf/cm^2 (10 MN/m^2) e, desde que haja o cuidado prévio de olear ligeiramente o seu exterior, podem ser facilmente recuperados no fim do ensaio.

Nos diagramas de carga típicos, que se apresentam na Fig. 20, as ordenadas são as pressões de ensaio aplicadas pelos macacos desde a pressão de acomodação 5 kgf/cm^2 ($0,5 \text{ MN/m}^2$) à pressão máxima 30 kgf/cm^2 (3 MN/m^2), e as abcissas são os valores correspondentes da abertura da fenda, medidos no ponto em que se localiza determinada lâmina deformométrica. Postas umas quantas hipóteses sobre o comportamento mecânico do maciço rochoso ensaiado, cada diagrama de carga fornece um módulo de deformabilidade

$$E = c e$$

onde e representa o cociente do intervalo de pressão seleccionado pelo decorrente acréscimo de abertura da fenda de ensaio e c é uma constante com as dimensões de um comprimento, cujo valor depende da posição, forma e dimensões dos macacos que integram o dispositivo de ensaio, bem como da posição da lâmina deformométrica a que respeitam as medidas compendiadas no diagrama em consideração.

O ensaio com um único macaco plano consome menos de uma semana, enquanto que pode estimar-se em oito dias de trabalho o tempo requerido pelo ensaio completo com uma bateria de três macacos. A equipa adequada consta de dois operadores especializados e dois trabalhadores indiferenciados.

Embora espantosamente económicos perante os volumes de maciço rochoso que mobilizam – é rápida a abertura das fendas, expedita a instalação dos macacos, simples a medição das deformações, fácil a recuperação dos macacos –, os ensaios com macacos planos de pequena espessura são de longe mais morosos e caros do que os ensaios com o dilatómetro. Assim, impõe-se o estabelecimento de uma metodologia de exploração dos meios disponíveis, quando se avalia a deformabilidade de um maciço rochoso. O esquema adoptado consiste frequentemente nos passos seguintes: (i) realizar um número elevado de ensaios com o dilatómetro, em furos de sondagem abertos através de zonas típicas do maciço rochoso, se possível até às profundidades com interesse para a obra em vista; (ii) utilizando os resultados obtidos, esboçar uma divisão do maciço rochoso em zonas que possam ser encaradas como uniformes, tanto quanto à natureza como

quanto à deformabilidade; (iii) conduzir um razoável número de ensaios com macacos planos, para caracterizar a deformabilidade de umas quantas zonas, à escala dos grandes volumes, e estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos com o dilatómetro e os resultados obtidos com macacos planos; e (iv) usar a correlação obtida para estimar a deformabilidade em grandes volumes daquelas zonas em que apenas o dilatómetro tenha sido empregado.

3 – APRECIÇÃO DA RESISTÊNCIA

A caracterização da resistência dos maciços rochosos e a consideração dessa resistência na previsão da segurança das obras constituem o ponto mais precário no estado actual dos conhecimentos em mecânica das rochas. A questão é bastante complexa, devendo ter-se presente que os maciços rochosos exibem acentuada anisotropia no que respeita a resistência: mesmo nos maciços constituídos por rochas muito resistentes, pode haver orientações segundo as quais a resistência do maciço é muito baixa.

Numa dada direcção, a resistência de um maciço rochoso depende da geometria e da resistência das superfícies de compartimentação, e, por outro lado, da resistência dos blocos que tais superfícies definem, ou seja, da própria rocha. Em face das dimensões habituais dos blocos que constituem os maciços rochosos, compreende-se que seja geralmente impossível caracterizar globalmente a resistência, mediante ensaios “in situ” significativos: o que correntemente se investiga são as contribuições que culminam na rotura ao longo das superfícies de compartimentação e na rotura da rocha, podendo os resultados obtidos ser usados no estudo sobre modelo do maciço em consideração.

Embora as roturas por lasqueamento, por esmagamento e devidas a tensões de tracção tenham repercussões práticas importantes, o tipo de ruína das rochas com mais interesse para obras de engenharia é a rotura por corte, isto é, por escorregamento ao longo de planos inclinados de menos de 45° sobre a maior tensão aplicada; e é sobretudo em termos das características de corte c e ϕ – coesão e ângulo de atrito – que se aprecia a resistência das rochas e dos maciços rochosos. No entanto, importa não restringir ao comportamento frágil a ideia que se tem da ruína das rochas: sob os elevados valores da pressão de confinamento a grandes profundidades, podem as rochas exibir um comportamento dúctil, aliás sem que por isso deixem de comprometer as obras que suportam, se atingirem a ruína por deformação excessiva.

3.1 – Ensaios “in situ”

Para determinar as características c e ϕ , realizam-se séries de ensaios de corte “in situ” e em laboratório, bem como de ensaios triaxiais em laboratório.

Sob um enunciado singular, em que não transparecem nem as sérias dificuldades experimentais nem a complexidade dos fenômenos envolvidos (veja-se, por exemplo, a discussão apresentada por Rocha em 1971), o ensaio de corte consiste na determinação da força tangencial T que provoca o corte de um provete segundo uma dada superfície plana submetida a uma força normal N . Nos ensaios de corte “in situ”, que tanto podem incidir sobre uma rocha como sobre uma diaclase ou outra superfície de baixa resistência, usa o LNEC blocos de dimensões aproximadas 70 cm x 70 cm x 35 cm, talhados com a serra de disco diamantado apresentada na Fig. 21 e carregados como dá ideia a Fig. 22. Com a montagem que se apresenta nesta última figura ensaiou o Laboratório cerca de duzentos e cinquenta blocos, muitos dos quais foram preparados à guisa de modelos, para simular, em maciços de natureza muito diversa, as roturas por escorregamento que podem ocorrer na vizinhança das superfícies de fundação de barragens de betão.

Os sistemas de medição de deslocamentos, que são visíveis na mesma Fig. 22, permitem obter informação sobre a dilatação ou variação de volume associada com a rotura por corte, a qual, na medida em que aumenta a permeabilidade, facilita a instalação de pressões intersticiais que contribuem para apressar a ruína

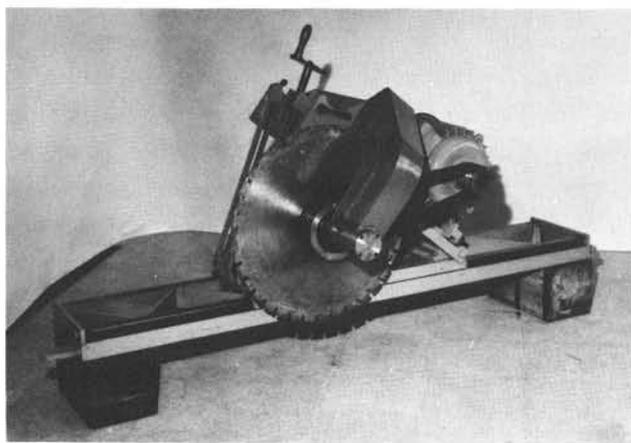


Fig. 21



Fig. 22

do material. Por outro lado, o conhecimento dos deslocamentos que ocorrem nos ensaios de corte é indispensável à interpretação do carácter progressivo da rotura, de particular relevância para maciços constituídos por materiais de comportamento diverso na gama de frágil a dúctil.

3.2 – Nota sobre ensaios em laboratório

Em perfeito paralelo com os ensaios acabados de referir, ensaiam-se em laboratório provetes de dimensões lineares até 20 cm, montados no quadro rígido que se representa na Fig. 23. As Fig. 24 e 25, que respeitam ao deslizamento de diaclases, exemplificam a representação gráfica dos resultados dos ensaios: diagramas ‘tensões tangenciais contra deslocamentos tangenciais’, para valores paramétricos da tensão normal, sobre cada um dos quais são lidas a resistência máxima e a resistência residual; e diagramas ‘resistências ao corte contra tensões normais’, que definem geometricamente as características c e ϕ .

Se bem que só muito raramente tenham tido como objecto os maciços rochosos, os ensaios multiaxiais são de utilização corrente para a caracterização em laboratório da resistência ao corte das rochas e das superfícies de baixa resistência. Em regra, o provete é simultaneamente solicitado por uma pressão lateral constante, aplicada por meio de um líquido, e uma compressão axial,

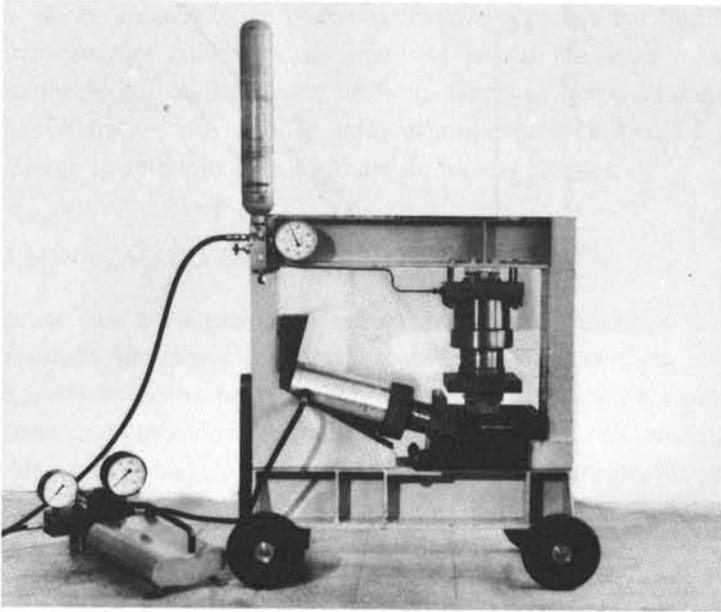


Fig 23

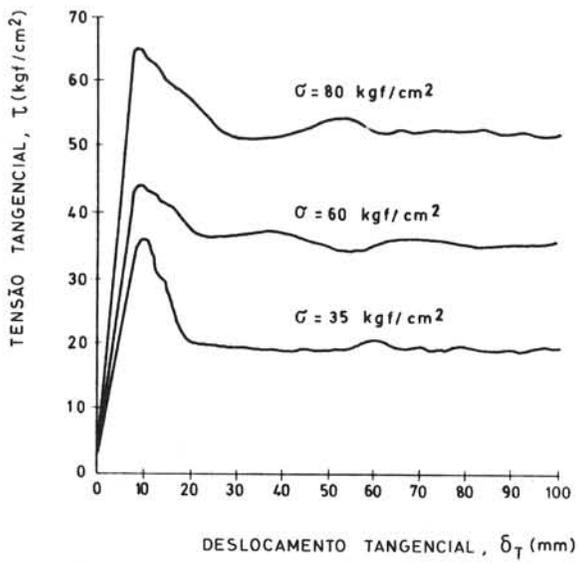


Fig. 24

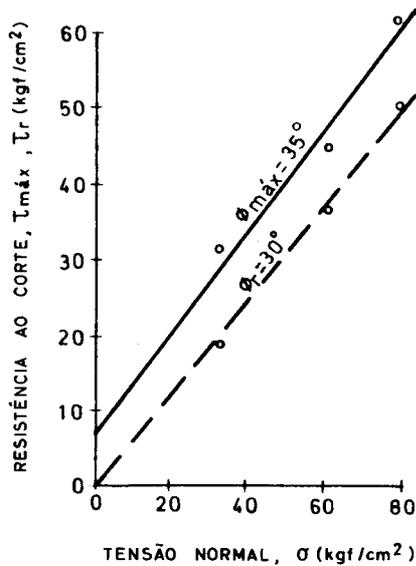


Fig. 25

cujo valor se incrementa desde o valor adoptado para a pressão lateral até que ocorra a rotura do provete. É óbvio, porém, que o ensaio deve tender para a simulação das condições que vigorarão na obra em estudo.

Para a realização de ensaios triaxiais à maneira clássica da mecânica dos solos, dispõe o LNEC das câmaras metálicas referidas em 2.1, nas quais os provetes podem ser conduzidos à rotura em regime de fluência.

Dado o interesse fundamental dos fenómenos postos em evidência pela rotura das rochas sob solicitações uniaxiais, é ainda frequente o recurso a ensaios de laboratório em que se levam os provetes à rotura por compressão simples ou por tracção simples. Pela sua facilidade de execução, os ensaios do primeiro tipo são adoptados pelo LNEC no estudo da anisotropia das rochas do ponto de vista da sua tensão de rotura, sendo os resultados interpretados num quadro de superfícies quárticas – frequentemente, no quadro particular de uma distribuição espacial quadrática das tensões de rotura. Quanto aos ensaios de tracção simples, cuja realização põe com particular acuidade a questão da coaxialidade das forças aplicadas, utiliza o LNEC máquinas de ensaio com articulações de tracção, às quais as bases do provete são coladas com resinas sintéticas.

Outra via de apreciação do comportamento das rochas em tracção consiste em submeter provetes cilíndricos ao chamado ensaio brasileiro – compressão exercida por forças que se distribuem uniformemente ao longo de duas geratrizes opostas do cilindro –, do qual se inferem resistências à tracção geralmente superiores às que se determinam nos ensaios de tracção simples.

4 – DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

O conhecimento do estado de tensão dos maciços rochosos é importante não só no estudo de túneis e outras obras de engenharia civil, mas também para a compreensão de numerosos fenómenos que ocorrem na crosta terrestre. Devido à carência de métodos de medição adequados, raramente tem sido possível ter na devida conta o estado de tensão dos maciços rochosos, ao projectar ou executar obras; com mais forte razão, pouco se conhece sobre a distribuição de tensões na crosta terrestre.

Para determinar as tensões num maciço rochoso fazem-se medições sobre paredes de galerias ou no interior de furos de sondagem. Nos métodos de ensaio, que a seguir se referem, uma região do maciço é libertada de algumas ligações e deixada deformar sob a acção das tensões de que é sede.

4.1 – *Determinação do estado de tensão mediante ensaios em fendas. Macacos planos de pequena espessura*

Quando se executa o ensaio numa galeria pode utilizar-se o equipamento descrito em 2.2.2 e relativo a macacos planos: mede-se a distância inicial entre pares de pontos tais como A' A" na Fig. 26; abre-se uma fenda na posição representada na mesma figura, com o que em geral se altera a distância medida; insere-se na fenda um macaco plano, que se enche de óleo e liga a uma bomba; e eleva-se a pressão do óleo até restituir ao seu valor inicial a distância entre os pontos de referência. Admite-se que a pressão de compensação, que se lê no circuito da bomba, é igual à tensão normal no maciço, em elementos de superfície paralelos às paredes da fenda.

Ainda que na abertura da fenda se recorra à serra já descrita, para o presente fim usam-se de preferência macacos planos com a forma de segmentos de um círculo de diâmetro 1 m. Mais frequentemente, porém, utilizam-se nos ensaios macacos de menores dimensões, cuja forma fica definida, num círculo de diâmetro 60 cm, pela flecha 10,5 cm, ou 17,0 cm, ou 24,0 cm (Fig. 27); e abrem-se as fendas

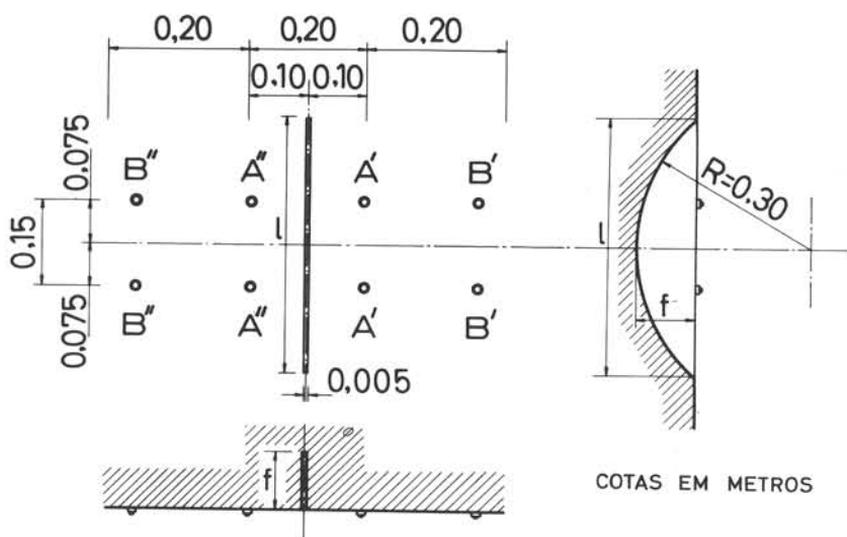


Fig. 26

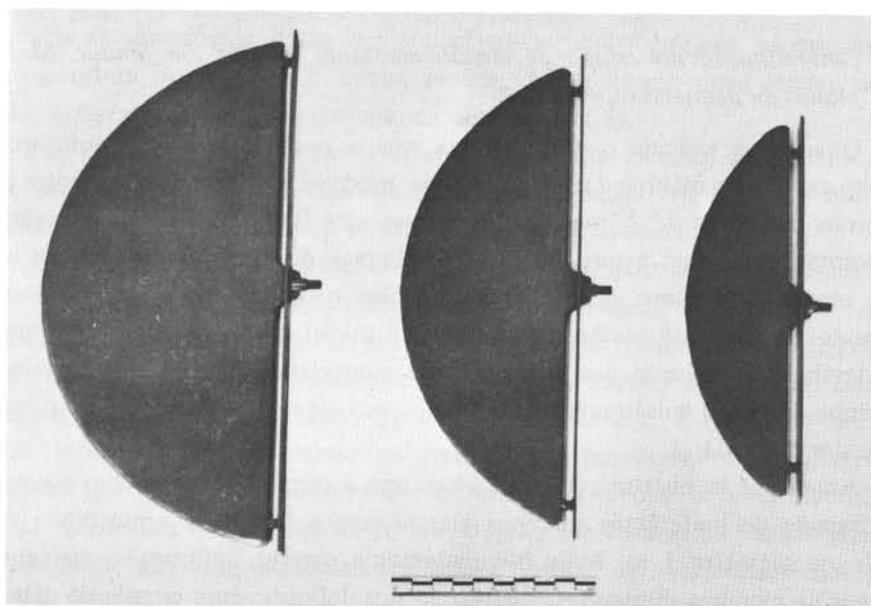


Fig. 27

de alojamento com a pequena serra, igualmente de disco diamantado, representada na Fig. 28.

Para determinar o estado de tensão num ponto de um maciço rochoso, aplica-se o método referido a três superfícies ortogonais, por exemplo uma parede lateral, o fundo e o chão da galeria de ensaios mediante a qual se atinge o ponto. É evidente que a situação apreciada comporta, não só as tensões iniciais do maciço, mas também as tensões induzidas pela escavação da própria galeria de ensaios. No entanto, é possível interpretar os resultados obtidos, com vista à determinação do estado de tensão que existia no maciço antes de ter sido aberta a galeria.

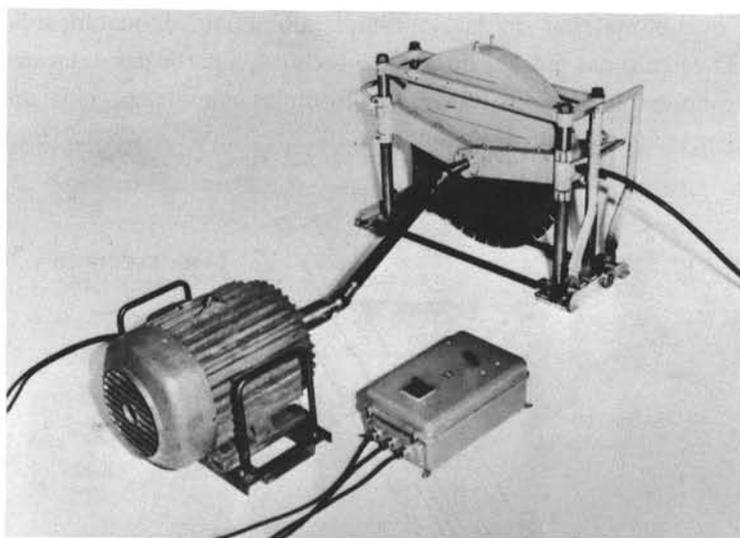


Fig. 28

4.2 – *Determinação do estado de tensão através de ensaios em furos de sondagem. Defómetros*

Para minimizar a perturbação que o ensaio introduz no estado de tensão do maciço, pode atingir-se o ponto de ensaio através de furos de sondagem. Contudo, os métodos convencionais, que exploram esta possibilidade, proporcionam informação que se restringe a planos perpendiculares ao eixo do furo; de modo que, para determinar completamente o estado de tensão num ponto, é necessário dispor de três furos convergentes no ponto, o que é difícil e caro conseguir.

Na linha geral desta técnica, propôs o LNEC a utilização de um defórmetro, que mede extensões num único furo de sondagem e habilita a determinar o estado completo de tensão no fundo desse furo. O defórmetro, que é um cilindro maciço ou uma camada cilíndrica de plástico, e está munido de extensómetros eléctricos de resistência em número não inferior a nove, é colado ao maciço rochoso, no troço terminal de um furo estreito (Fig. 29). Com uma coroa diamantada de maior diâmetro, montada numa sonda rotativa, corta-se um anulo circular coaxial com o primeiro furo, destacando do maciço um tarolo de rocha em que está incluído o defórmetro. Leituras sobre os extensómetros, antes e depois da libertação do tarolo de rocha, permitem calcular as extensões induzidas pela operação – o mesmo é dizer, as extensões que decorrem da libertação das tensões a que o material do tarolo estava submetido, enquanto solidário com o maciço. O cálculo das tensões do maciço rochoso, a partir das extensões medidas no interior do tarolo, é feito através de fórmulas complexas, cuja aplicação se simplifica por recurso a um computador.

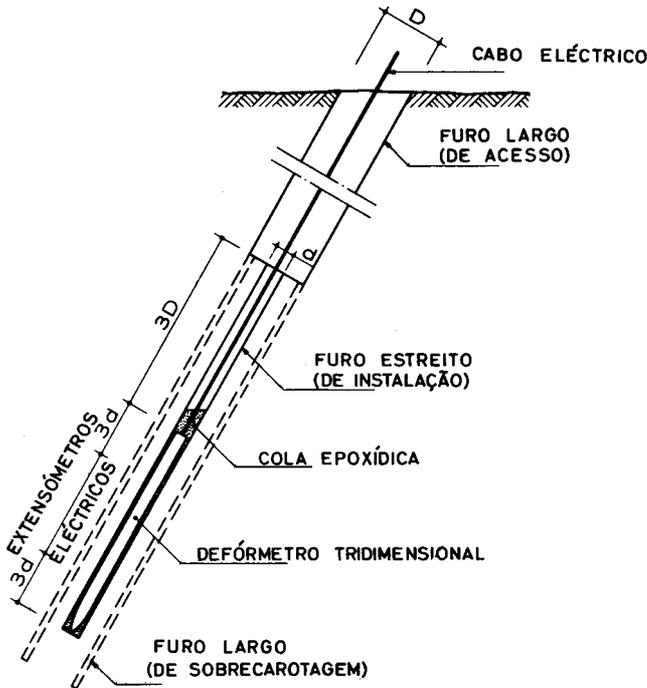


Fig. 29

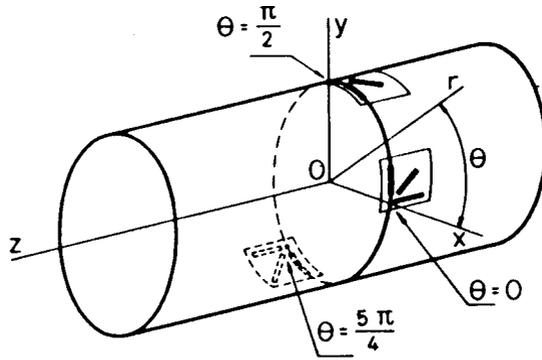


Fig. 30

Para o defórmeter tubular, cuja geometria se define na Fig. 30 vinculada aos eixos coordenados x, y, z , as extensões no ponto (r, Θ, z) do plástico, devidas ao estado de tensão na rocha $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$, são calculadas através das expressões

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

nas quais M_3 e M_3' são funções, respectivamente, de E e de E e ν , e todos os outros coeficientes são funções não só das características elásticas do maciço rochoso, E, ν , mas também da coordenada r . Estas expressões, que habilitam a calcular as extensões nos três 'pontos de medição' do defórmeter como funções lineares das tensões libertadas $\sigma_x, \dots, \tau_{zx}$, conduzem, por introdução dos valores experimentais das nove extensões medidas no ensaio, a um sistema linear de nove equações a seis incógnitas. O sistema é resolvido pelo método dos mínimos quadrados, para obter os valores mais prováveis das componentes do estado de tensão $\sigma_x, \dots, \tau_{zx}$.

Os resultados obtidos respeitam, ou às tensões iniciais do maciço, ou simultaneamente a estas e às tensões que no maciço tenham sido induzidas pela realização de uma obra. Aliás, basta pospor a intervenção da coroa de maior

diâmetro e realizar leituras sucessivas sobre o defórmetro incluído para apreciar, também, a evolução do estado de tensão do maciço rochoso. Para aplicações da última índole, envolvendo grandes intervalos de tempo, recomenda-se a utilização do defórmetro maciço, cujos condutores eléctricos estão mais eficazmente protegidos da acção da água quase invariavelmente presente. Por outro lado, desde que não incluem operações de sobre-carotagem, tais casos não submetem a ligação cola-rocha às elevadas tensões de tracção que justificam a substituição daqueles defórmetros pelos da mais recente forma tubular.

5 – CONCLUSÃO

Por longa, penosa e cara que seja a sua condução, os ensaios “in situ” não podem ser integralmente substituídos por ensaios em laboratório: são manancial indispensável dos dados que se requerem para alimentar os programas de cálculo de túneis – programas cujo refinamento cada vez mais põe a manifesto quão limitada, imprecisa e inadequada ainda é a informação que os ensaios de campo proporcionam.

Termina-se sobre o voto de que novos métodos continuem a ser desenvolvidos com imaginação fértil e aplicados com esforçado entusiasmo, aos quais os responsáveis pela execução das obras deixem de regatear os meios materiais, sempre percentualmente diminutos nos orçamentos em que se inscrevem, a que a reconhecida importância dos ensaios “in situ” seguramente dá jus.