

# OBSERVAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS\*

## Monitoring Underground Structures

por

ANTÔNIO PINTO DA CUNHA \*\*

JOSÉ GRACIAS FERNANDES\*\*\*

**RESUMO** – Apesar dos nítidos progressos verificados nos últimos anos no domínio das obras subterrâneas, a previsão do comportamento real deste tipo de obras, dada a complexa influência de numerosos parâmetros, ligados quer ao maciço envolvente quer ao próprio processo construtivo, continua a revelar-se ainda hoje um problema difícil de solucionar.

Em consequência, a observação das obras subterrâneas anuncia-se como uma via capaz de permitir a verificação das hipóteses de projecto e o seu grau de adaptação às condições efectivas das obras, com incidência directa na segurança e economia destas.

No presente artigo é posta em destaque a necessidade de observação das obras subterrâneas e focam-se aspectos a ter em conta no seu planeamento. Passam-se ainda em revista as principais técnicas e equipamentos disponíveis neste domínio e tecem-se considerações acerca da metodologia da observação.

**SYNOPSIS** – In spite of all the recent progress connected with underground works, it remains a very complex and uneasy task to foresee the behaviour of an underground structure. This states the need of an accurate monitoring of these structures, as the only direct way of apraising the agreement between project and actual behaviour, and ensuring economy and safety.

The authors make a short description of the main techniques and equipments available in this field and emphasize the most important aspects that must be taken in consideration in underground surveying.

### 1 – NECESSIDADE DA OBSERVAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS

Apesar dos enormes progressos alcançados nos últimos anos nos diversos domínios ligados às obras subterrâneas, a previsão do comportamento real deste

---

\*Manuscrito recebido em Novembro 1979. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\*Engenheiro Civil, Divisão de Obras Subterrâneas, LNEC.

\*\*\*Engenheiro Civil, Divisão de Estudos Geotécnicos Especiais, LNEC.

tipo de obras, dada a complexa influência e interacção de numerosos parâmetros, constitui ainda hoje problema difícil de quantificar com precisão.

Com efeito, a escavação de uma obra subterrânea suprime localmente a continuidade do maciço, perturbando muitas vezes de forma decisiva o seu estado de equilíbrio, adquirido ao longo de todo um processo geológico. Em consequência é modificado o campo de tensões existente, originando-se deslocamentos na zona envolvente da escavação, até que um estado final de equilíbrio seja atingido pela mobilização da capacidade resistente do maciço e (ou) de uma estrutura de suporte. Acresce que a interacção entre o maciço e o suporte constitui um problema hiperstático, em que a carga sobre o suporte depende do deslocamento permitido ao maciço envolvente e por seu turno a colocação do suporte influencia o próprio comportamento do maciço em torno da abertura. Daí resulta que, não obstante:

- o aperfeiçoamento das metodologias de estudo de obras subterrâneas no âmbito da Geologia de Engenharia, a evolução registada no domínio do comportamento dos meios contínuos e fissurados, pela contribuição teórica trazida pela Mecânica dos Solos e das Rochas e pelo aperfeiçoamento de equipamentos e técnicas de ensaio, laboratoriais e in situ, e dos seus métodos de interpretação,
  - o progresso registado no domínio dos métodos de cálculo, nomeadamente dos modelos matemáticos por elementos finitos, com a implementação de modelos planos e tridimensionais, em que é possível a introdução de reologias diversas para maciços e suportes, a simulação de descontinuidades, heterogeneidades e anisotropias, bem como de diferentes condições de fronteira e de métodos construtivos vários,
  - a evolução notória dos métodos de escavação e suporte, de que são exemplo a utilização de escavadoras de secção total e de ataque pontual, o incremento das técnicas de consolidação de maciços (congelamento, injeção, etc.), o progresso dos métodos de desmonte com explosivos e da tecnologia de fabrico e aplicação de betão projectado, de ancoragens e de elementos pré-fabricados, metálicos ou de betão.
- a dificuldade do conhecimento do estado de tensão inicial e das características reais dos terrenos interessados pelas obras, imposta pela profundidade e

extensão das mesmas e pela complexa e heterogénea estrutura geotécnica dos maciços, faz com que o projecto de uma estrutura subterrânea venha necessariamente a reflectir, em maior ou menor grau, a indeterminação do conhecimento do comportamento real daquela estrutura.

Por estes motivos, a metodologia do dimensionamento de obras subterrâneas, nomeadamente de túneis, tem vindo a situar-se entre duas vias limites e opostas: a que consiste na ausência de um dimensionamento prévio, estimando-se o suporte empiricamente em função das características geotécnicas detectadas nas formações envolventes, à medida do avanço da escavação – técnica que vulgarmente se designa por “design as you go” e conta ainda hoje com numerosos adeptos – e a via que consiste no dimensionamento prévio do revestimento com base num modelo e critérios teóricos cujas hipóteses e acordo com a realidade são muitas vezes mais do que discutíveis.

Ora a racionalização e optimização do suporte deve resultar de um compromisso entre estas concepções limites, tornado possível pelo desenvolvimento de equipamentos e técnicas de observação das obras, que permitirão obter um conhecimento mais perfeito do comportamento real do maciço escavado e do suporte e, conseqüentemente, a adequação deste às condições daquele, acompanhando a progressão da obra.

A utilização dos resultados da observação no dimensionamento das estruturas projectadas, pela eventual reformulação do próprio modelo de cálculo utilizado e(ou) dos seus parâmetros geotécnicos, pode ter uma incidência importante na economia da obra, legitimando em muitos casos um aligeiramento do sustimento pré-fixado, noutros a necessidade do seu reforço – solução sem dúvida mais económica antes do que após o colapso – e, em todos os casos, permitindo um controlo efectivo da segurança, não susceptível de contabilização directa.

## 2 – ASPECTOS A CONSIDERAR NA OBSERVAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS

A observação de uma obra subterrânea integra todas as medições e inspecções destinadas ao controlo e verificação da estabilidade da estrutura subterrânea – maciço escavado e(ou) sustimento que, em proporção variável, contribuem para assegurar o equilíbrio – durante a fase de construção ou, a longo prazo, na fase de exploração da obra.

O estabelecimento de um plano de observação, que deverá ser elaborado em fase de projecto e adaptado durante e após a execução da obra, é uma tarefa para cuja rendibilidade se deverá exigir a colaboração do projectista e cujo êxito final implica a consideração de múltiplos aspectos, tais como:

a) – *Características geotécnicas do maciço* – os elementos mais importantes que deverão ser tidos em conta na localização e projecto do sistema de observação a instalar são a litologia, a hidrologia subterrânea, a estrutura geológica e o grau de alteração do maciço, a ocorrência de acidentes tectónicos e, no caso de rochas ou mesmo de solos sobreconsolidados, o seu sistema de diaclasamento.

A maior ou menor incidência e variação, no espaço e no tempo, destes diferentes parâmetros, condiciona não só a malha de observação mas também o próprio tipo de instrumentação e a frequência da sua utilização.

Assim, um maciço geologicamente diversificado e heterogéneo impõe a observação das suas diferentes zonas, com pormenor tanto maior quanto menos satisfatórias as suas características geotécnicas.

Quanto aos acidentes geológicos (falhas, dobras, zonas de esmagamento, contactos entre formações, etc.) com expressão geotécnica apreciável, que constituem pontos singulares da construção e comportamento da obra, para além de exigirem a sua cartografia individual, deverão constituir pontos de concentração dos sistemas de observação.

É desejável que a cartografia geotécnica vá acompanhando o avanço da escavação, o que proporciona desde logo elementos para adaptação do programa de observação às características reais da obra.

Em maciços rochosos, cujo comportamento é, na grande maioria dos casos, mais influenciado pelas características das fracturas (atitudes, aberturas, espaçamentos, rugosidades, enchimentos e grau de continuidade) do que pela própria rocha, deverão ser particularmente considerados os aspectos relativos à fracturação. Exceptuam-se casos limites de maciços de rocha de muito boa qualidade, muito pouco fracturados e com fracturas pouco extensas ou de maciços cuja extrema alteração tenha provocado o evanescimento da influência do diaclasamento.

No caso de solos, acompanhando a caracterização litológica dos estratos encontrados, deverão ser analisados, mesmo que qualitativamente, as suas características de compacidade e resistência.

Por outro lado, em todos os casos, deverá ser efectuado o registo de ressurgências na superfície escavada, em particular daquelas que, pelo seu significado, possam fazer presumir a existência de cargas hidráulicas elevadas, passíveis de constituir solicitação importante, a ter em conta no dimensionamento. Esta informação poderá vir a ser completada pela instalação de equipamento de observação destinado à medição de pressões neutras ou caudais.

b) – *Natureza, tipo e localização da obra* – Deverão condicionar igualmente o plano de observação da obra não só em fase de execução mas, muito especialmente, se se encarar o seu controlo em fase de exploração, dado que nem todas as técnicas de observação são compatíveis com a sua utilização naquelas fases.

Assim, a natureza da obra ou a finalidade a que se destina poderão impor desde logo certos condicionalismos em relação ao tipo, robustez e protecção do equipamento a instalar. Por exemplo, em galerias de adução ou cavernas para armazenamento de certos produtos (nomeadamente combustíveis, detritos radioactivos, etc.), que durante o seu funcionamento normal não serão visitáveis, a instrumentação a utilizar terá que ser lida à distância e, em muitos casos, deverão adoptar-se dispositivos especiais de protecção contra fenómenos físicos e químicos (calor, corrosão, etc.).

Da mesma forma, o tipo de obra subterrânea impõe, através das suas características geométricas e de revestimento, sujeições a ter em conta. Assim, por exemplo, a medição de deslocamentos, tensões e forças impõe a utilização de equipamentos diferentes, consoante a dimensão da obra e a natureza do suporte (betão projectado, betão moldado, cimbres, ancoragens, elementos pré-fabricados e suas combinações possíveis).

Quanto à localização, existem diferenças apreciáveis entre a observação de uma obra a pequena profundidade, em meio urbano por exemplo, e um túnel profundo. Assim, no primeiro caso é muito importante a consideração da influência dos trabalhos nas construções vizinhas, em especial pelos assentamentos superficiais e pelas vibrações que provocam, o que impõe para além de severas limitações nos métodos construtivos, um controlo rigoroso dos seus efeitos à superfície por forma a não serem ultrapassadas as tolerâncias admissíveis.

Por outro lado, em obras pouco profundas é possível utilizar certa instrumentação a partir da superfície, o que possibilita nomeadamente a medição

de deslocamentos no maciço em avanço sobre a escavação. Pode inferir-se do interesse destas medições se se disser que as deformações que têm lugar numa secção de um túnel, antes da mesma ser atingida pela frente de escavação, podem atingir valores superiores a 50% da deformação final verificada nessa secção.

c) – *Métodos construtivos e ritmo da construção* – A observação de uma obra subterrânea durante a fase construtiva é ainda hoje encarada pelo empreiteiro como uma imposição que, colidindo com o ritmo de execução, lhe pode acarretar quebras na cadência de avanço. Por esse motivo interessa que a concepção do sistema de observação e o seu “timing”, embora naturalmente sujeitos às corecções ditadas pelo conhecimento directo que for sendo obtido em estaleiro, sejam estabelecidos com a antecedência suficiente para permitir a sua inclusão no planeamento geral da obra.

Da boa compreensão mútua de quem constrói e de quem realiza a observação, muito de positivo pode resultar para todos: os pequenos atrasos, eventualmente provocados pela necessidade de se proceder a medições ou instalação de aparelhagens, serão compensados, sem dúvida, quer pelo acréscimo de segurança, devido à possibilidade de prevenção dos acidentes que se poderão verificar, quer pela economia resultante da adequação do suporte às condições reais da obra.

De qualquer forma, em túneis não muito profundos ou vizinhos de outros existentes, a instalação de aparelhagem, a partir da superfície ou da abertura próxima, para além das vantagens já referidas, poderá obviar aos inconvenientes da deterioração do equipamento e interacção com o processo construtivo.

É importante frisar ainda que uma campanha de observação bem estruturada requer a existência de circuitos de transmissão, em tempo útil, dos resultados obtidos e da sua análise, a quem sobre eles se deve apoiar nas decisões construtivas a tomar.

A precisão e a duração das medições estão intimamente associadas à importância do papel que as mesmas são supostas desempenhar e condicionam, por seu turno, a escolha da aparelhagem a utilizar. Na realidade haverá toda a conveniência em tentar estabelecer a priori a precisão que será requerida às medições, por forma a que os erros instrumentais não escondam a evolução dos fenómenos que se pretendem observar.

Assim, por exemplo, a utilização do chamado “Novo Método Austríaco”, baseado na aplicação versátil de betão projectado e ancoragens, depende fundamentalmente do controlo sistemático dos deslocamentos do terreno e da sua interpretação e utilização imediata na tomada de disposições construtivas.

Naturalmente que a robustez e precisão dos equipamentos têm uma incidência directa no respectivo preço e, dispondo-se hoje no mercado de uma vasta gama de instrumentos de observação, deverá ser feita uma escolha criteriosa dos mesmos por forma a aliar, na sua aquisição, a economia à qualidade.

Para além dos aspectos de economia e segurança já referidos a observação é um meio potencial de progresso e transmissão de conhecimentos, podendo da experiência colhida em cada obra ser feita aplicação futura a outras obras, com maior ou menor similaridade de condições. Reconhece-se, contudo, que a divulgação de toda esta experiência não tem vindo a ser realizada da melhor maneira, sendo ainda hoje relativamente escassa a bibliografia existente com essa finalidade.

### 3 – TÉCNICAS E EQUIPAMENTOS DE OBSERVAÇÃO

Diversas são as técnicas e aparelhagens consagradas na prática da observação das obras subterrâneas: umas cuja origem radica nos métodos correntemente utilizados na observação de estruturas em geral (pontes, barragens, fundações, etc.) e outras desenvolvidas especificamente para este tipo de obras.

Diversos são igualmente o seu alcance e objectivos, dirigindo-se umas à medição de valores que quantificam directamente o comportamento da estrutura – é o caso da medição de deslocamentos, tensões e forças, nos maciços e nos suportes – e outras à obtenção de informação complementar, por vezes de significado qualitativo ou semiquantitativo (cartografia, técnicas de prevenção e segurança, etc.) mas cuja análise integrada fornece um apoio directo à interpretação das primeiras, para além de permitir uma mais correcta selecção das zonas a observar mais intensamente.

#### 3.1 – *Cartografia de obras subterrâneas*

Num sentido muito lato, pode incluir-se neste âmbito não só o levantamento e registo gráfico das feições geotecnicaamente significativas presentes nas

superfícies escavadas (cartografia geológica) mas também a compilação e interpretação integrada de todas as informações relativas ao processo de escavação e aos suportes, incluindo a evolução de todos estes aspectos ao longo do tempo.

No âmbito da cartografia geológica – cujos trabalhos, por razões óbvias, terão de ser executados antes da aplicação de qualquer suporte contínuo – deverá ser feita a descrição litológica do maciço e sistematicamente anotados os aspectos morfológicos, estruturais e hidrogeológicos mais relevantes – tipo e grau de alteração da rocha, filões, bolsadas, contactos, esmagamentos, falhas, dobras, fracturas, heterogeneidades, caudais emergentes, etc..

No que respeita ao diaclasamento, deverão identificar-se as famílias presentes e apreciar-se em termos médios as suas atitudes, espaçamentos, aberturas, enchimentos, rugosidades e grau de continuidade.

Relativamente ao grau de alteração da rocha, a realização de ensaios expeditos (penetrómetro, esclerómetro, “point load”, etc.), definidores de índices de qualidade da rocha e correlacionáveis com parâmetros de comportamento mecânico susceptíveis de obtenção fácil em ensaios laboratoriais, permitirá objectivar a impressão visual colhida. No caso de furação com máquinas de secção total ou ataque pontual, importa considerar com especial atenção a resistência da rocha e a sua dureza, as quais constituem parâmetros fundamentais condicionadores dos rendimentos da escavação.

Por outro lado, deverá proceder-se ao registo sistemático dos aspectos mais significativos ligados à escavação – velocidades de avanço, impulsos, binários, energia dispendida na furação, consumo de explosivos, planos de tiro, sobreescavações, desabamentos, bloqueamentos, etc., – e às características dos suportes utilizados – natureza, espessura, espaçamento, comprimento, comportamento no tempo, etc. – cuja selecção, entre os previstos pelo projecto, em geral reflecte directamente as dificuldades de avanço e o comportamento do terreno durante e após a escavação. No caso de revestimentos contínuos de betão, que frequentemente vêm a apresentar fissuração, devida a movimentos do terreno, efeitos termohigrométricos, acções hidráulicas, etc., o registo e análise da disposição das fissuras podem fornecer indicações úteis acerca do seu comportamento.

É a interpretação de todos estes elementos, sobre o pano de fundo proporcionado pela cartografia geológica, complementada com a informação quantitativa fornecida por técnicas mais elaboradas, que serão objecto dos capítulos seguintes, que permitirá, a par do zonamento geotécnico do maciço, a identi-



ficação de grandes zonas com comportamento estrutural semelhante e a aferição classificada do funcionamento dos suportes, com o seu eventual reajustamento ou reformulação.

### *3.2 – Medição de deformações e deslocamentos*

A deformação das estruturas subterrâneas reflecte, como a de qualquer outra estrutura, a sua resposta face às solicitações actuantes. Neste tipo de obras, a estrutura é constituída pelo maciço e pelo suporte que contribuem, em proporções variáveis de secção para secção e ao longo do tempo em cada secção, para o estabelecimento de um novo estado de equilíbrio, após a radical perturbação do equilíbrio inicial pelo processo de escavação. Este novo equilíbrio poderá ainda ser modificado, ao longo do tempo quer por factores intrínsecos à estrutura, quer por causas a ela exteriores.

Entre os primeiros avultam alterações no comportamento reológico do maciço – devidas à fracturação induzida pela escavação, aos escorregamentos ao longo das fracturas, a processos de alteração, a fenómenos de fluência, à modificação das condições hidrológicas, etc. – e(ou) modificação das características dos suportes – alteração do número de ancoragens ou do seu comportamento (perda de capacidade resistente por fluência, relaxação ou defeito de selagem, etc.), colocação de novos cimbres, aplicação de betão projectado em zonas não revestidas ou em espessamento de revestimentos existentes, etc..

Como causas exteriores, susceptíveis de modificar o equilíbrio, citam-se a evolução das solicitações hidrostáticas e a construção ou demolição de outras estruturas, subterrâneas ou não, na vizinhança da obra.

Para a medição das deformações e deslocamentos, operados nos maciços e nos suportes, durante a execução ou ao longo do funcionamento da obra, com vista a permitir, a par do controlo da segurança, uma aferição do seu comportamento real, é hoje possível dispor de técnicas e aparelhagens, diversas na concepção e funcionamento, com robustez, versatilidade e precisão diferentes, cuja escolha e emprego criteriosos, face aos objectivos a atingir, são condições de sucesso para o trabalho a desenvolver.

A medição de deslocamentos permitindo precisões satisfatórias, proporciona frequentemente, pela sua rapidez e menor custo, um aumento do número de medições e consequentemente uma maior facilidade na sua interpretação e extrapolação.

Os métodos utilizados para a medição de deslocamentos em obras subterrâneas podem ser agrupados por várias formas, tendo em consideração por exemplo, as respectivas finalidades (medição de deslocamentos absolutos ou relativos), o seu suporte físico, o tipo de instrumento de medição, etc.. De acordo com este último critério, poderão considerar-se os métodos que constam das secções seguintes.

### 3.2.1 – *Métodos topográficos*

Estes métodos fazem aplicação das técnicas e equipamentos da topografia e da geodesia – teodolitos, níveis, bússulas, miras, clinómetros, etc. A sua utilização no interior de obras subterrâneas, embora permitindo a obtenção de boas precisões e a referenciação das medições a bases fixas exteriores (e consequentemente a detecção de deslocamentos absolutos), tem o inconveniente de requerer condições e tempos de operação frequentemente incompatíveis com as restrições impostas pelo estaleiro ou pela exploração da obra.

Casos haverá contudo, em que, a despeito das dificuldades apontadas, será do maior interesse a recolha de informação sobre deslocamentos absolutos: é exemplo a situação de instabilidade global de túneis, provocada pela ocorrência de escorregamentos nos maciços escavados, fenómeno que ocorrerá mais frequentemente junto aos emboquilhamentos.

Outro domínio preferencial da sua utilização é a observação de movimentos superficiais, nomeadamente de subsidências, ligados à execução de túneis a pequenas profundidades, particularmente em meio urbano, por permitir a análise destes movimentos, ao longo do tempo e com precisão satisfatória.

Em condições normais de operação podem obter-se precisões da ordem do milímetro, susceptíveis de serem melhoradas por adopção de cuidados especiais nas medições.

Neste grupo podem também incluir-se as técnicas de medição electrónica de distâncias, que têm conhecido notável incremento nos últimos anos e utilizam princípios electro-ópticos. São exemplo o Mekometer e o Tellurometer (fig. 1 e 2) que se baseiam na determinação do tempo de trânsito de um impulso electro-magnético de alta frequência, entre o ponto de emissão e um reflector, separados pela distância a medir. A onda reflectida é captada pelo emissor-receptor, e a distância calculada com base na velocidade de propagação das ondas directa e reflectida e na sua desfasagem.

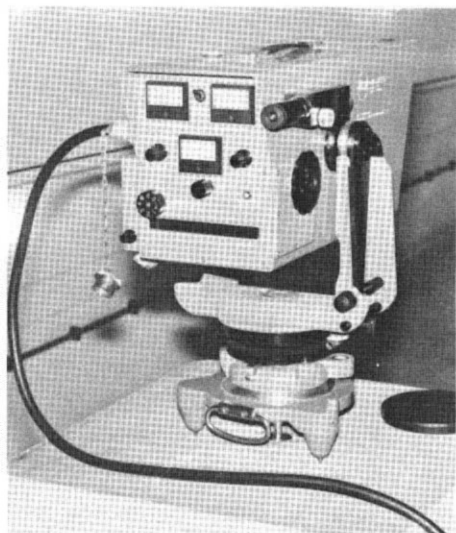


Fig. 1 - Mekometer ME 3000



Fig. 2 - Tellurometer CD 6

Dum modo geral estes aparelhos são concebidos para distâncias compreendidas entre 50 metros e vários quilómetros, apresentando um erro absoluto constante, o que diminui a sua precisão para distâncias curtas. Consequentemente a sua utilização na observação de deslocamentos em obras subterrâneas não é a mais recomendável no estado actual de desenvolvimento dos equipamentos, embora sejam previsíveis no futuro francos progressos neste domínio.

### 3.2.2 – Métodos fotogramétricos

São métodos que se baseiam essencialmente na homotetia existente entre o objecto fotografado e a sua imagem, materializada numa chapa fotográfica.

Neste âmbito se integram duas técnicas diferenciadas, embora com princípios básicos comuns: a estereofotogrametria e o fotoperfil.

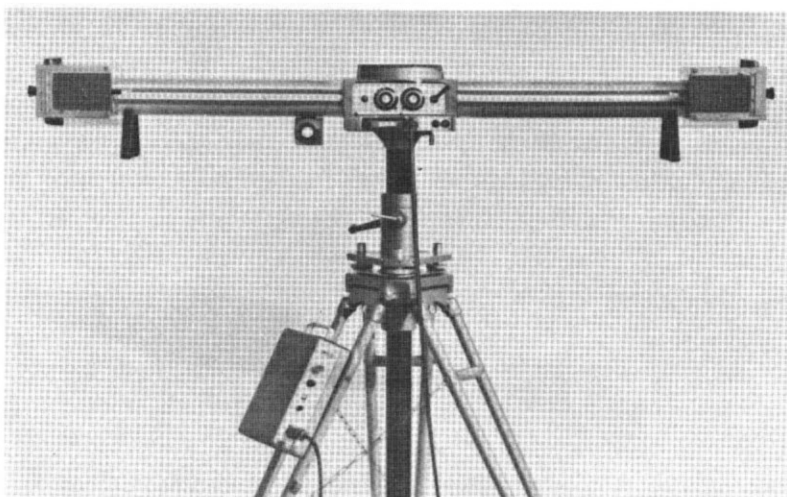
Sai fora do âmbito que se pretendeu dar ao presente trabalho um maior detalhe acerca de técnicas de fotogrametria, por si só uma verdadeira especialização, pelo que se referem apenas alguns princípios gerais, e, se apontam as

principais vantagens e dificuldades dos métodos, e o seu grau de precisão, por forma a proporcionar um estudo comparativo com outras técnicas e fornecer elementos para uma tomada de decisão, numa eventual escolha de equipamento.

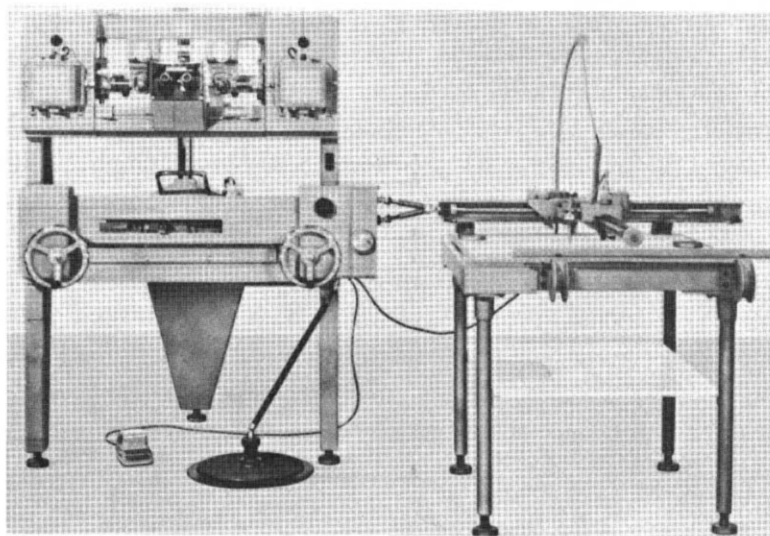
### 3.2.2.1 – *Estereofotogrametria*

Utiliza a técnica clássica da fotogrametria terrestre, ou seja, a realização de pares de fotografias, com tomadas de vista diferentes, das paredes da obra, nas quais se materializaram previamente alguns alvos. A posterior restituição das fotografias permite a determinação do posicionamento espacial (tridimensional) dos alvos e consequentemente, por comparação de resultados da exploração de fotografias efectuadas em épocas diferentes, a medição dos deslocamentos relativos.

A precisão do método, variável com o tipo de equipamento fotográfico – câmaras estereográficas (fig. 3) ou câmaras clássicas de precisão – com as técnicas de restituição utilizadas – analíticas ou analógicas (fig. 4) – poderá ultrapassar o milímetro para túneis de secção corrente.



*Fig. 3 - Câmara estereográfica*



*Fig. 4 - Estereo-restituídor*

### 3.2.2.2 – Fotoperfil

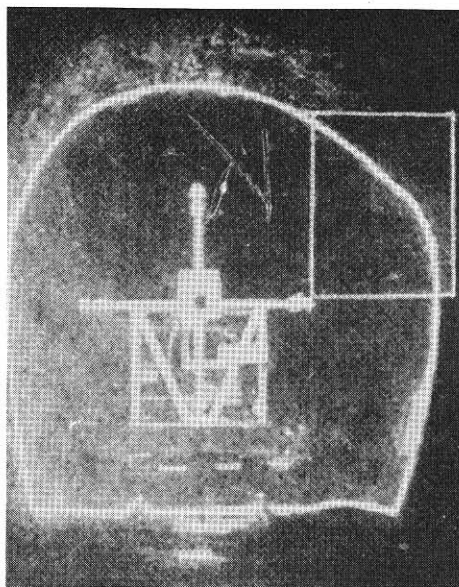
Ao contrário da técnica anterior, o fotoperfil baseia-se na realização de uma única fotografia e permite exclusivamente, por comparação entre fotografias diferidas no tempo, a obtenção de deslocamentos complanares (no caso de obras subterrâneas, deslocamentos ocorridos num perfil transversal).

A materialização de tal perfil é feita pela projecção sobre as paredes do túnel, a partir de uma fonte anelar, de um plano luminoso (fig. 5) paralelo ao plano da imagem de uma câmara fotográfica. A escala do registo fotográfico, razão das dimensões lineares homólogas da imagem e do objecto, pode ser obtida colocando na secção a fotografar, uma escala de comprimento conhecido.

A aplicação do fotoperfil tem sido fundamentalmente orientada para duas finalidades distintas, a requererem níveis de precisão diferenciados, quer quanto às técnicas e equipamentos fotográficos, quer quanto aos trabalhos de restituição.

Assim, é possível utilizar este método para, durante a furação, controlar os desvios que a secção escavada apresenta, relativamente à secção teórica projectada. Neste caso, por não ser geralmente requerida senão uma precisão modesta (da ordem de alguns centímetros), podem utilizar-se equipamentos fotográficos clássicos e fazer-se a restituição por projecção do negativo numa parede vertical revestida a papel.

A observação sistemática, por fotoperfis, dos deslocamentos em obras subterrâneas, exige porém, para alcançar precisão satisfatória (da ordem do milímetro), um maior cuidado quer quanto ao equipamento e técnica fotográfica (câmaras providas de lentes de pequena distorção e alto poder separador, chapas fotográficas sensíveis e de grão fino, condições de iluminação especiais, estacionamento correcto da câmara, tempos de exposição adequados, cuidados na revelação das películas, etc.) quer no que respeita à restituição (em mono-comparadores de precisão). A colocação prévia de marcas permanentes, ao longo das secções a fotografar, permitirá obviar a duas das principais dificuldades do método: garantir que em condições diferidas no tempo sejam fotografadas sempre as mesmas secções e evitar que, pela alteração destas, devida por exemplo, a depósito de poeiras, ou quedas de materiais, venham a ser falseados os resultados.



*Fig. 5 - Fotoperfil*

### 3.2.3 – *Métodos directos*

Integram-se neste grupo todas as técnicas em que as distâncias a medir são materializadas por um suporte físico (fitas, fios, barras, etc.). Ao contrário dos métodos anteriores, que pelas suas características específicas apenas permitiam a medição de deformações na superfície da obra, com estes métodos é agora possível também a medição de deslocamentos no interior dos maciços ou dos revestimentos. Alguns dos equipamentos disponíveis podem mesmo ser explorados, no caso de obras a pequena profundidade (em regra não superior a 100 metros), a partir da superfície do maciço, com todas as vantagens já anteriormente indicadas.

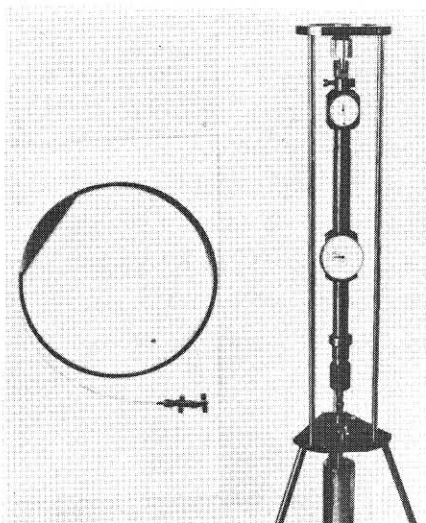
#### 3.2.3.1 – *Medição de deslocamentos na parede da estrutura*

Dado que a manifestação mais clara e perceptível do comportamento da estrutura subterrânea é o seu movimento para o vazio criado pela escavação – movimento cuja amplitude e evolução no tempo é função entre outros parâmetros, das dimensões da abertura, das características mecânicas do maciço, do estado de tensão pre-existente à escavação, e do processo construtivo – a forma mais imediata de controlo desse comportamento é a medição dos deslocamentos vulgarmente designados por “convergências”.

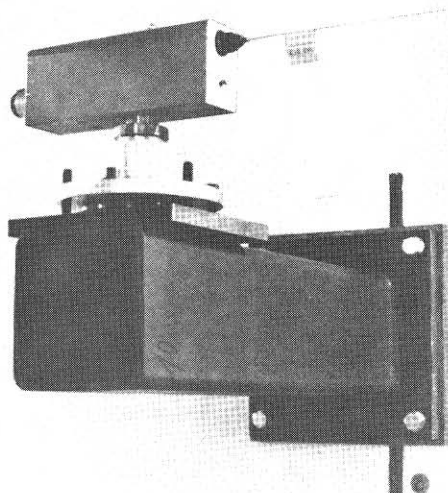
Com esse objectivo, instalam-se entre dois pontos da parede, quer no maciço quer no suporte, mas normalmente situados numa mesma secção transversal da abertura, aparelhos constituídos por barras, fios ou fitas de aço ou de invar e munidos de sistemas de medição de distâncias que habitualmente incluem deflectómetros. A diferença de medidas obtidas em instantes sucessivos, entre os mesmos pontos de medição, fornece os deslocamentos ocorridos no mesmo intervalo de tempo, na direcção da medição.

Dado que estes aparelhos não podem ficar em regra montados na secção transversal da obra, não só pelo facto de impedirem o trânsito mas também por ficarem sujeitos a acidentes susceptíveis de afectar a sua integridade e bom funcionamento, o problema essencial da sua utilização é o de garantir que as diferenças colhidas em medições sucessivas sejam a expressão de movimentos reais da estrutura e não consequência de diferentes condições de operação e (ou) apoio.

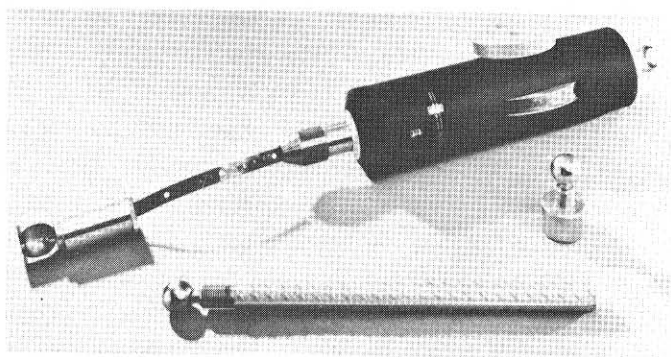
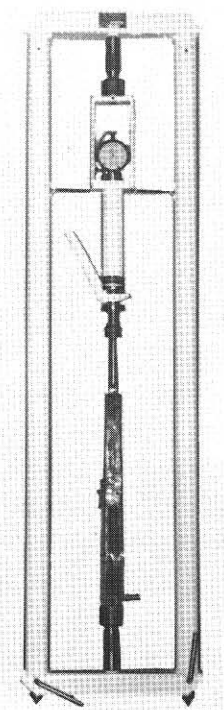
Assim, deverá exigir-se a ancoragem ao maciço dos pontos de apoio dos aparelhos, por meio de chumbadouros, por forma a evitar a repercussão, nas



*Fig. 6 - Distómetro ISETH*



*Fig. 7 - Dinstinvar CERN*



*Fig. 8 - Convergenciómetro SOILTEST*

*Fig. 9 - Convergenciómetro INTERFELS*



medições, de eventuais movimentos localizados em blocos superficiais, pre-existent ou criados pela escavação; dado porém que os deslocamentos do maciço evanescem com o crescimento da distância à parede, não convirá exagerar na profundidade da ancoragem, pois isso diminuiria a amplitude dos fenómenos medidos.

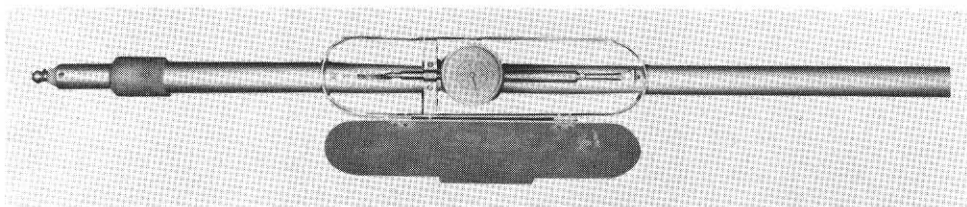
A fim de que o engate dos terminais dos aparelhos de medição nos apoios não constitua factor de erro apreciável, tornam-se necessárias apertadas tolerâncias nos acabamentos daquelas peças e o seu ajuste perfeito (por exemplo de peça esférica em calote côncava de raio adequado, roscagem muito perfeita de peças). Igualmente se torna necessário que os pontos de apoio sejam protegidos contra a corrosão e eventuais choques, quando fora de operação.

Por outro lado, os aparelhos de medição de convergências de maior precisão recorrem à utilização de fitas ou fios de aço e, sobretudo, de fios de invar. A fim de que a variação do estado de tensão da fita entre leituras efectuadas em datas diferentes não altere os resultados, estes aparelhos dispõem de um dispositivo tensor (dinamómetro, alavanca, etc.) que mantém constante a tensão de serviço.

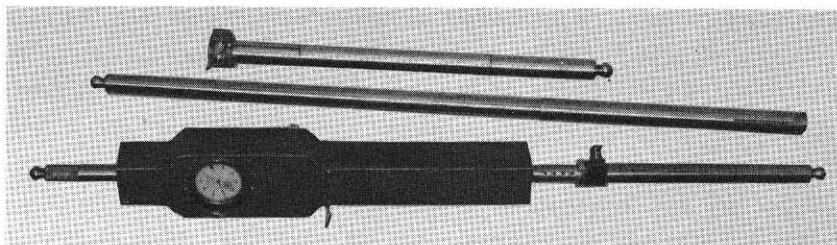
Com estes aparelhos, convenientemente manejados por pessoal qualificado, é possível obterem-se precisões da ordem de 0,1 mm para os aparelhos com fitas de aço e superiores para aparelhos com fio de invar.

Nas fig. 6 a 9 apresentam-se alguns destes equipamentos existentes no mercado.

Para túneis de pequena secção (3 a 5 metros de diâmetro) é corrente a utilização de convergenciómetros de haste ou canas de convergência (fig. 10), constituídos essencialmente por um tubo telescópico de metal leve e resistente, como o duralumínio, de elementos fixáveis em determinadas posições (ajustamento grosseiro) e munidos de nónio ou deflectómetro, (ajustamento fino) cons-



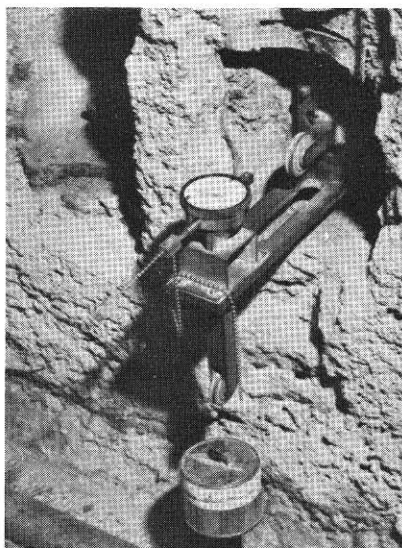
*Fig. 10 - Convergenciómetro de haste (LNEC)*



*Fig. 11 - Elongâmetro de haste (LNEC)*

tituindo sistemas apreciavelmente expeditos, muito versáteis (permitindo uma gama contínua de leituras dentro do seu campo de medição) e susceptíveis de proporcionar precisões da ordem de 0,5 mm. A sua aplicação envolve o registo das temperaturas em cada operação e a correcção das diferenças entre leituras sucessivas dos efeitos das diferenças de temperatura (através do coeficiente de dilatação térmica linear do material que constitui os tubos).

Para secções de dimensão ainda mais reduzida (1 a 2 m) o LNEC teve ensejo de utilizar um elongâmetro de haste (fig. 11) e para secções maiores, de desenvolver um convergenciômetro de fio (fig. 12).



*Fig. 12 - Convergenciômetro de fio (LNEC)*

Deve notar-se que, frequentemente, campo de medição e precisão do aparelho variam em sentido inverso. Assim, a utilização de convergenciômetros de fio de elevada precisão, exige em geral fios de invar cortados com comprimentos muito próximos das distâncias a medir, pelo que a existência da mesma obra de distâncias diferentes (situação extremamente frequente até na mesma secção transversal – fig. 13) obriga a dispor de um fio de invar para cada distância, o que não sendo obviamente muito económico, é ainda menos cómodo.

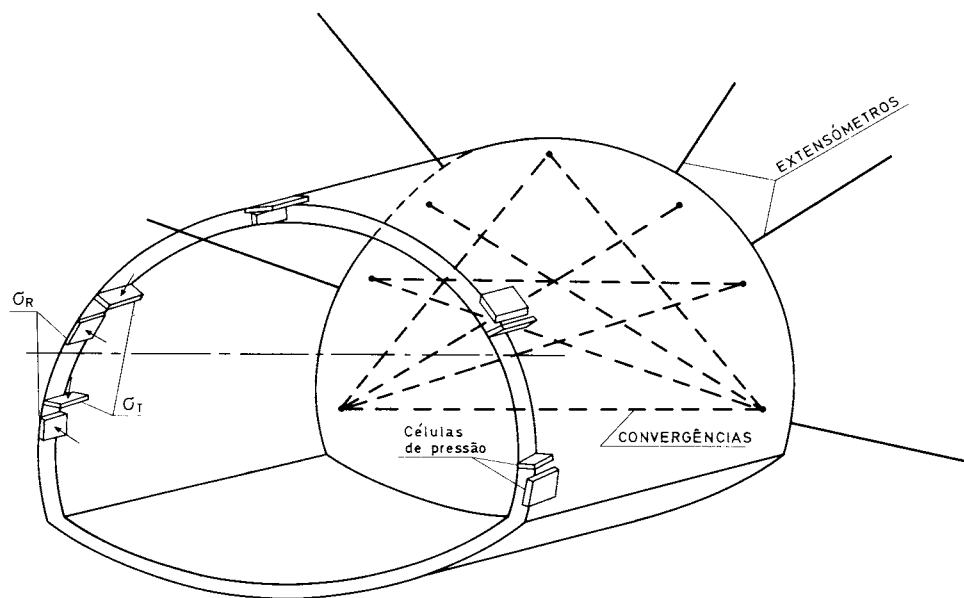


Fig. 13 - Secção principal instrumentada

Pelo contrário num convergenciômetro de fita, em que a leitura das distâncias é feita normalmente até ao centímetro numa fita calibrada de aço inox e as fracções de centímetros são indicadas por um deflectómetro ou contador digital, a tira pode ser fixada por dispositivo de travagem praticamente em qualquer posição. Estes aparelhos apresentam campos de medição apreciáveis (por exemplo de 1 a 30 m) o que lhes confere maior versatilidade em relação aos anteriores, em detrimento contudo da precisão.

A interpretação dos movimentos do suporte ou do maciço é feita com base na elaboração de gráficos deslocamentos-tempo como os que se apresentam na fig. 14, os quais evidenciam andamentos típicos destas curvas. Assim, e pondo de lado certas variações, decorrentes sobretudo de imprecisões de medição e variações termohigrométricas, é detectável na curva (1) um movimento do tipo amortecido que denota tendência para a estabilização. Já nas curvas (2) e (3), movimentos uniformes ou acelerados conduziram a deslocamentos de amplitude razoável, cuja estabilização só veio a ser possível após reforço do suporte instalado.

É aliás com base nas amplitudes destes deslocamentos e nas suas taxas instantâneas de evolução que é feita a análise das convergências. A experiência revela que, se o maciço é autoportante, ou se o suporte é suficiente para assegurar a estabilidade da estrutura, o movimento é retardado como o da curva (1), atingindo-se em regra a estabilidade ao fim de um tempo mais ou menos longo, consoante a importância dos fenómenos diferidos. Por outro lado, um diagrama de andamento linear pode evoluir no sentido tanto de um retardamento como de uma aceleração do fenómeno. E a ocorrência de aceleração é, em regra, sinal de colapso irremediável se não forem tomadas em tempo útil medidas de reforço na secção.

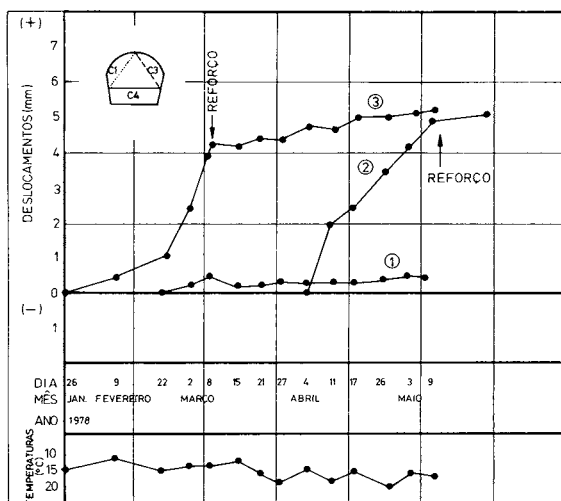


Fig. 14 - Evolução da convergência no tempo

É comum conduzir a observação de obras subterrâneas considerando dois tipos essenciais de secções instrumentadas: secções principais (fig. 13) e secções secundárias. Nas primeiras concentram-se em regra os meios de observação disponíveis na sua máxima força – é comum medirem-se deslocamentos entre pontos à superfície e no interior do maciço e tensões nos suportes e nos contactos terreno-suporte (por métodos que serão abordados mais adiante). São secções que devem ficar situadas quer em pontos singulares da obra, cujo comportamento se revele particularmente difícil (zonas de falhas, contactos, esmagamentos, etc.), quer, em termos duma observação sistemática, em secções típicas do comportamento de largas zonas da obra. Entre estas secções principais é costume instalar secções de observação secundárias, menos instrumentadas – onde frequentemente apenas se medem convergências – e que permitem por comparação com secções principais instaladas na mesma zona geotécnica, extrapolar conclusões com menor dispêndio em meios de observação.

#### 3.2.3.2 – *Medição de deslocamentos no interior do maciço*

Conjuntamente com a medição de convergências entre pontos da parede da abertura, é feita muitas vezes a determinação de deslocamentos no interior do maciço envolvente.

Se é verdade que existem processos analíticos e (ou) numéricos de previsão desses deslocamentos, não é menos certo que as simplificações, por vezes drásticas, dos modelos e a precaridade do conhecimento dos parâmetros a introduzir no cálculo fazem sentir a necessidade da sua confirmação, tanto mais que o alcance da perturbação provocada pela escavação em torno da abertura e o gradiente do seu evanescimento na secção transversal constituem elementos de apreciação da estabilidade da estrutura (sendo desejável o rápido decréscimo dessas deformações com a distância à parede). Um caso em que este controlo assume relevância é o da utilização de ancoragens como suporte estrutural, em que convém, naturalmente, que as mesmas sejam seladas em zonas praticamente estabilizadas. Um outro caso é, obviamente, o de obras pouco profundas, em que o evanescimento rápido dos efeitos da abertura com a distância é condição de minimização dos assentamentos e dos seus efeitos à superfície.

A medição de deslocamentos relativos entre pontos no interior do maciço, a partir da própria obra, da superfície (obra pouco profunda) ou de obras

vizinhas, pode ser feita mediante a instalação, em furos de sondagem, de ancoragens simples ou múltiplas a diferentes profundidades, com medição das respectivas distâncias (materializadas por fios ou barras) a uma cabeça fixada à boca do furo. A medição é feita por sistema mecânico (do tipo deflektómetro ou nónio) ou eléctrico (com extensómetros eléctricos de resistência, captadores de indução, etc.) existindo neste caso já hoje em dia a possibilidade de dispor de sistemas de leitura remota.

Na fig. 15 apresenta-se um extensómetro múltiplo com fios (MPBX),

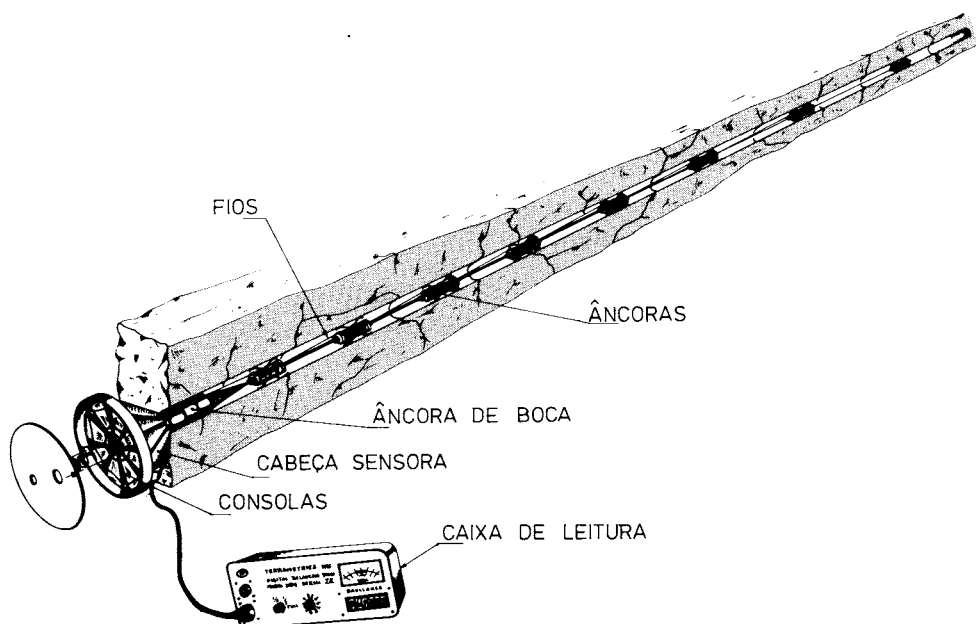


Fig. 15 - Extensómetro múltiplo MPBX

onde consolas flexíveis, instrumentadas com extensómetros eléctricos de resistência e adequadamente calibradas, permitem determinar por comparação com uma primeira leitura o deslocamento de cada âncora relativamente à boca do furo. Se uma das âncoras instalada a uma distância suficientemente grande da boca do furo, puder ser considerada fixa, obtêm-se os deslocamentos absolutos das restantes âncoras. Em qualquer caso, as diferenças de leituras entre extensómetros associados a âncoras a várias profundidades traduzem desloca-

mentos relativos, sendo possível, por exemplo, detectar roturas e escorregamentos no maciço, por interpretação dessas diferenças.

Movimentos transversais ao eixo do furo de sondagem podem ser detectados por inclinómetros (fig. 16), através da variação angular entre segmentos de uma poligonal materializada no furo de sondagem por uma tubagem flexível, percorrida por sistemas de leitura normalmente do tipo torpedo, munidos de captadores electromagnéticos de indução. Instalados em regra a partir da superfície, podem tal como os sistemas de ancoragem simples ou múltipla, permitir a medição de deslocamentos em avanço sobre a escavação. Assim têm sido confirmados os resultados obtidos com modelos tridimensionais que indicam a ocorrência de importantes movimentos na zona do maciço adiante da frente devidos ao progresso da escavação. Na fig. 17 verifica-se que no momento em que a frente atinge a secção de observação já se produziram cerca de 37% dos deslocamentos totais ligados ao avanço da escavação.

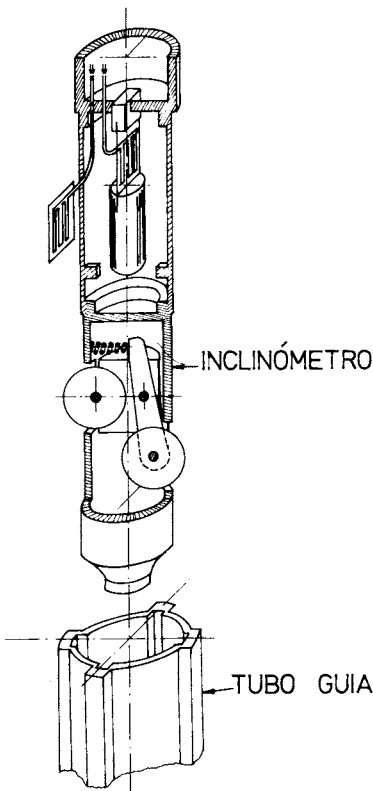


Fig. 16 - Inclinómetro

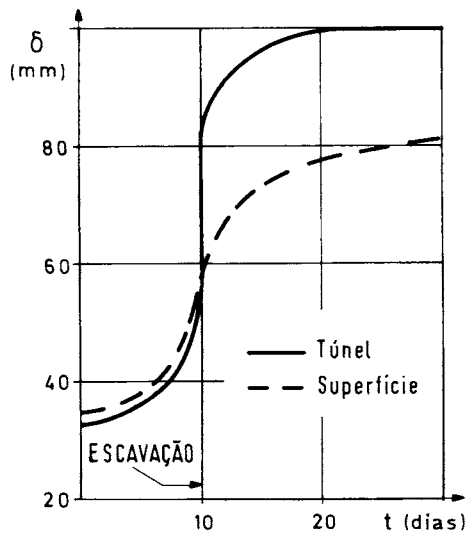


Fig. 17 - Evolução da convergência com o avanço da escavação

### 3.3 – Medição de tensões e forças

A medição de tensões é frequentemente menos fácil de realizar, e de resultados mais dispersos e difíceis de interpretar e extrapolar, do que a medição de deslocamentos.

Para medição de tensões normais e tangenciais em revestimentos e tensões no contacto maciço-revestimento está hoje muito generalizada a inclusão de células hidráulicas do tipo Glöetzl (fig. 18). Estas células são constituídas

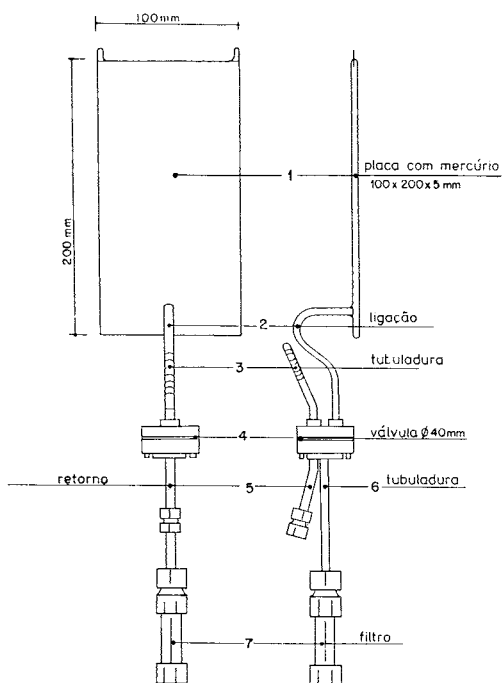


Fig. 18 - Célula de tensões GLÖETZL

por uma almofada metálica de pequena espessura, cheia de líquido (mercúrio para aplicação em materiais mais rígidos, como a rocha ou betão, e óleo no caso de instalação em solos), que constitui o órgão ao qual são transmitidas pelo meio envolvente as tensões (normalmente ao plano da almofada, a qual deve, em consequência, ser orientada por forma conveniente, isto é, disposta em posição tangencial para medir tensões radiais e colocada radialmente para

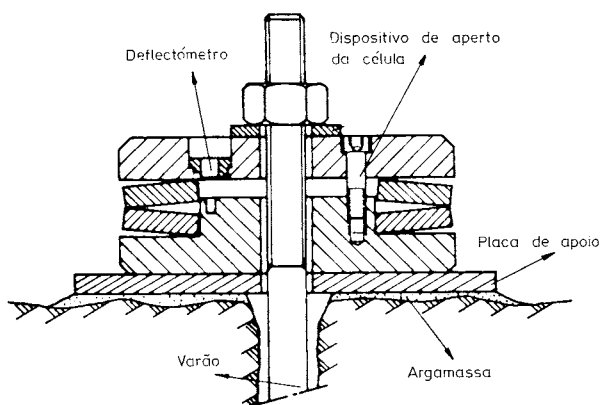


absorver tensões tangenciais).

Um sistema de bombagem de óleo através de uma válvula, a qual numa das faces é actuada pela pressão do líquido existente na almofada (igual à pressão transmitida pelo meio envolvente), provoca a abertura da válvula logo que a pressão do óleo bombado, medida em manómetro de precisão, é superior à que o líquido da almofada transmite à face oposta da válvula, o que é detectado pela passagem do óleo a um circuito de retorno.

Para a medição de forças é corrente o uso de células constituídas por cilindros rígidos de aço cuja deformação por acção de cargas axiais pode ser aferida por extensómetros de cordas vibrantes ou extensómetros eléctricos de resistência de que os mesmos se acham providos, determinando-se a carga por intermédio da curva de calibragem da célula – curva que relaciona leituras sobre os extensómetros com as cargas aplicadas. Sistemas deste tipo podem ser usados, por exemplo, para a medição de forças transmitidas a cimbres pelo maciço circundante. Para a medição de forças em ancoragens usam-se células cilíndricas de tipo semelhante, mas furadas axialmente para passagem do varão ou cabo de ancoragem, as quais são intercaladas entre a porca de aperto e a placa de repartição de tensões, na cabeça de ancoragem. No modelo da fig. 19 a deformação é lida num deflectómetro.

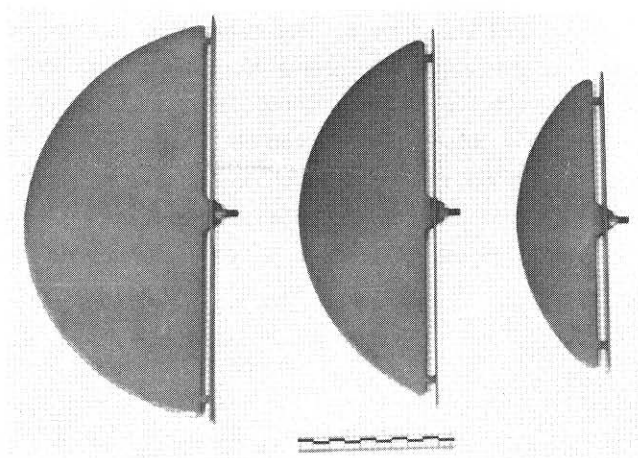
Almofadas de aço do tipo “flat jack”, contendo óleo, têm também sido intercaladas entre cambotas do mesmo cembre e entre cimbres e os seus apoios, para medição de forças transmitidas pelos arcos metálicos de entivação.



*Fig. 19 - Célula para ancoragem*

A medição de tensões nos revestimentos de betão pode ainda conduzir-se quer através da introdução de almofadas planas em fendas abertas no revestimento (fig. 20) em direcção normal à da tensão a medir, e restituindo as deformações provocadas pela abertura do rasgo através da aplicação de pressão pelas almofadas, quer pela utilização clássica de extensómetros eléctricos (tipo Carlson) ou de corda vibrante, incluídos no revestimento aquando da betonagem, e convenientemente orientados.

Os extensómetros Carlson têm como órgão essencial dois fios tensionados de aço, dispostos por forma a que a deformação longitudinal do extensómetro se traduza no encurtamento de um dos fios e em igual alongamento do outro. A leitura da variação de resistência eléctrica dos dois fios, com ponte de Wheatstone na qual eles se integram como braços adjacentes, pode fornecer a correspondente deformação longitudinal do extensómetro. Utilizando extensómetros compensadores dos efeitos da temperatura, é possível determinar o estado de tensão.



*Fig. 20 - Small flat jacks (LNEC)*

Quanto aos extensómetros de corda vibrante, são essencialmente constituídos por um fino fio de aço tendido entre as extremidades do extensómetro. Qualquer deformação do betão que envolve o aparelho, que provoque variação na tensão a que está submetido o fio (corda vibrante), altera a frequência própria de vibração deste, sob excitação por um electroímã integrado no extensómetro.

A nova frequência própria é medida por comparação, numa caixa de leitura munida de corda padrão (frequencímetro) e de um diapasão. Conhecidas as extensões, por tratamento numérico adequado, podem determinar-se as tensões no betão, a partir do conhecimento das suas características elásticas.

Frequentemente, durante a fase de observação que acompanha a execução da obra – nomeadamente no caso de cavernas profundas a cujos locais só a execução da obra permite o acesso – são também efectuadas medições que têm em vista a obtenção de valores para informação do projecto, no que respeita às características do maciço envolvente. É o caso da determinação *in situ* do estado de tensão, e mesmo a realização de ensaios de deformabilidade e resistência. São contudo ensaios que dizem respeito mais à caracterização geotécnica dos maciços do que à observação das obras subterrâneas, pelo que a sua consideração sai fora do âmbito do presente trabalho.

### 3.4 – *Medição de vibrações*

Quando se efectuam desmontes de rocha com explosivo, a vibração dos terrenos e do ar causada pela detonação pode provocar efeitos nocivos nas construções vizinhas e na própria obra. São especialmente importantes o atravessamento de meios urbanos por túneis pouco profundos escavados com explosivos, pelos efeitos sobre as construções à superfície, e a abertura de grandes cavernas subterrâneas, onde os níveis de vibração associados aos desmontes podem afectar os próprios suportes e eventualmente cavernas vizinhas.

Daí resulta a necessidade de controlar, e frequentemente de limitar, os níveis de vibração, cuja característica relevante é a velocidade de vibração máxima das partículas, medida no terreno ou nas próprias construções, em seguida à explosão. Os níveis de vibração máximos admissíveis deverão fixar-se para cada obra tendo em conta as características dinâmicas dos terrenos, a frequência das explosões e o tipo e características das construções sobre que incidem os efeitos das vibrações.

## 4 – CONCLUSÕES

Posta em evidência a complexidade do comportamento das obras subterrâneas, e a necessidade de não exagerar o significado dos resultados fornecidos pelos modelos de previsão desse comportamento, a observação das obras subter-

râneas, se correcta e oportunamente planeada e reajustada em meios e objectivos e devidamente interpretada, revela-se como instrumento capaz de controlar o grau de adaptação dos projectos às condições reais das obras, com as inerentes consequências em termos de segurança e economia.

#### REGERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CUNHA, A. P. – “Métodos de dimensionamento de estruturas subterrâneas”. Curso de Escavações em Maciços Rochosos, LNEC, 1979.
- ESTEVES, J. M. – “Control of vibrations caused by blasting”. LNEC, Mem. n.º 498, 1978.
- LOMBARDI, G. – “Long term measurements in underground openings and their interpretation with special consideration to the rheological behaviour of the rock”. Field measurements in Rock Mechanics, vol. 1, Zurich, 1977.
- LNEC – “Instruções para o uso da aparelhagem de observação de Barragens”. Rel. interno, 1963.
- LOUIS, C. – “Utilité des mesures in situ pour la conduit de chantiers d’excavations souterraines”. BRGM, 1975.
- ROBERTS, W. – “Monitoring and instrumentation in tunnel design”. Tunneling in rock. Pretória, 1974.
- ROCHET, L. – “Auscultation des ouvrages et des massifs rocheux encaissants”. Mec. des Roches appliquée au génie civil, ENPC, Paris, 1976.
- OLIVEIRA, R. – “Cartografia Geológica de Túneis. LNEC, Mem. n.º 489, 1977.