

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS AVANÇADAS AO ESTUDO DAS FUNDAÇÕES DA BARRAGEM DE SÃO SIMÃO*

Application of advanced techniques to the study of the foundations of São Simão dam.

por

MANUEL ROCHA**, SÉRGIO BRITO*** e CARLOS NIEBLE****

RESUMO - É apresentada a aplicação de novas técnicas que permitem uma melhoria substancial da apreciação do comportamento mecânico dos maciços rochosos de fundação.

SYNOPSIS - An application of new techniques which substantially improve the assessment of the mechanical behaviour of foundation rock-masses is presented.

1 - INTRODUÇÃO

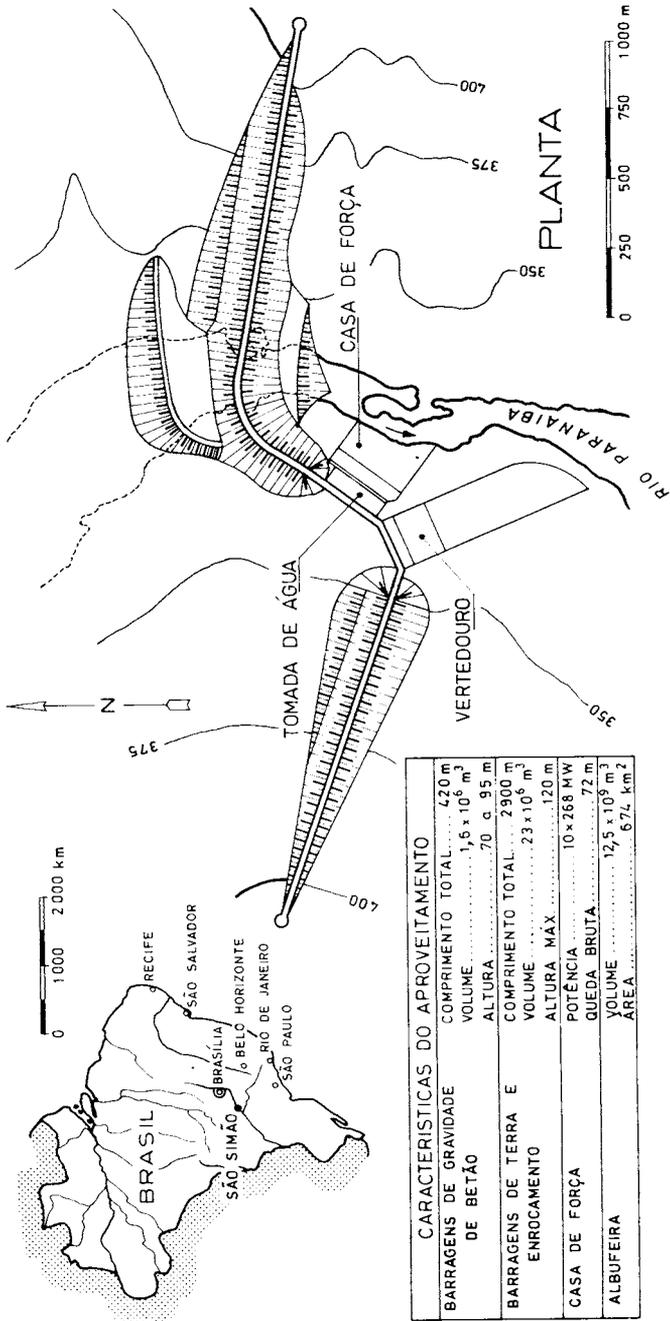
O aproveitamento hidro-eléctrico de São Simão, actualmente em construção pelas Centrais Eléctricas de Minas Gerais (CEMIG), encontra-se localizado no rio Paranaíba, Brasil, conforme indicado na Fig. 1. A disposição geral e as características do aproveitamento constam também desta figura.

* Trabalho apresentado ao 3.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Denver, 1974.

** Presidente, Conselho Superior dos Laboratórios de Engenharia Civil; Professor de Mecânica das Rochas, Instituto Superior Técnico. Lisboa.

*** Chefe da Divisão de Geologia e Geotecnia, Centrais Eléctricas de Minas Gerais - CEMIG, Belo Horizonte.

**** Chefe da Divisão de Mecânica das Rochas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas; Professor de Mecânica das Rochas, Universidade de São Paulo.



CARACTERÍSTICAS DO APROVEITAMENTO	
BARRAGENS DE GRAVIDADE DE BETÃO	COMPRIMENTO TOTAL... 420 m VOLUME... $1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ALTURA... 70 e 95 m
BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO	COMPRIMENTO TOTAL... 2900 m VOLUME... $23 \times 10^6 \text{ m}^3$ ALTURA MÁX... 120 m
CASA DE FORÇA	POTÊNCIA... $10 \times 268 \text{ MW}$ QUEDA BRUTA... 72 m
ALBUFEIRA	VOLUME... $12,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ÁREA... 6,74 km ²

Fig. 1

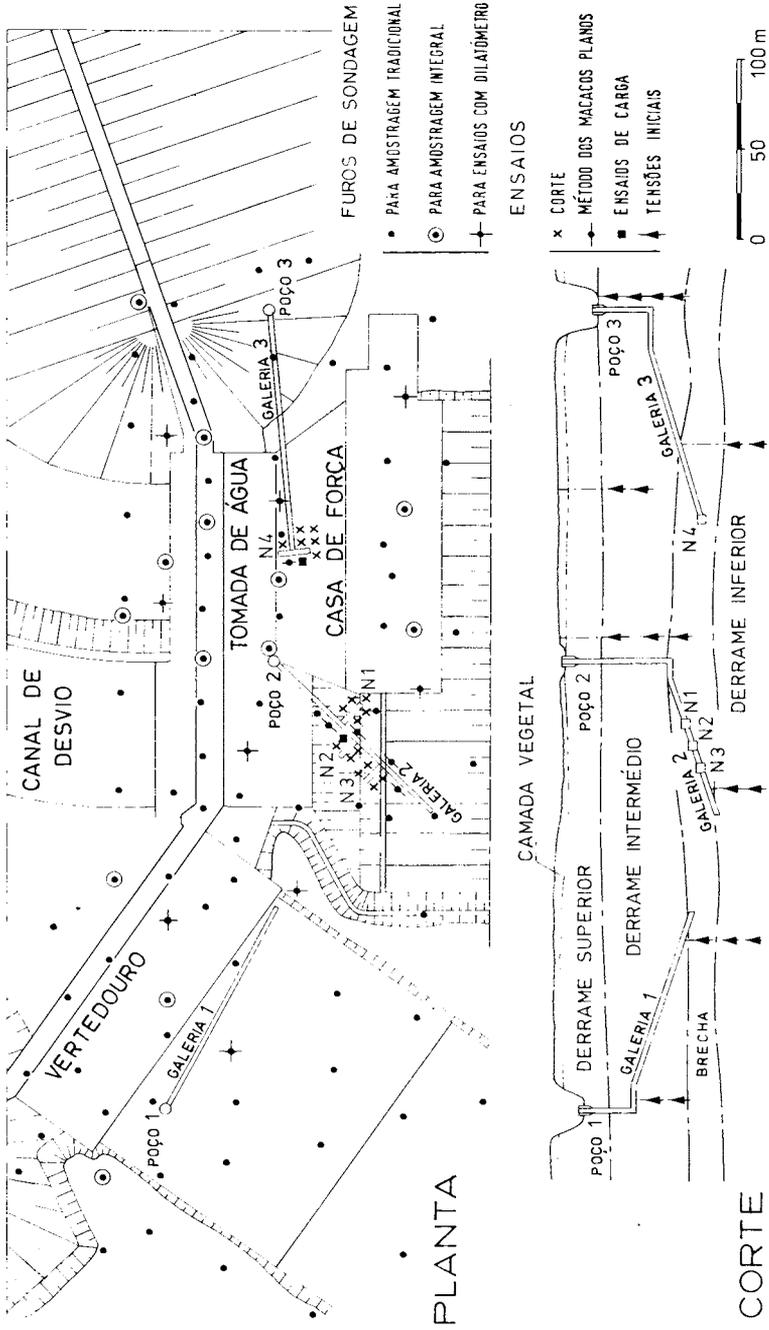


Fig. 2

O presente trabalho diz respeito ao estudo das fundações das estruturas de betão, isto é, das barragens da tomada de água e do vertedouro, e da casa de força. Essas duas barragens, com um comprimento total de 420 m, tem altura variando de 70 a 95 m.

A importância das estruturas e a natureza das formações geológicas, em especial a ocorrência de camada de brecha basáltica com propriedades mecânicas precárias, aconselharam estudo aprofundado do maciço de fundação, segundo orientações gerais e técnicas expostas noutra trabalho apresentado a este Congresso (Rocha, 1974). Vão ser referidas, em especial, a utilização da técnica da amostragem integral, a caracterização da deformabilidade através de ensaios com dilatômetro e de ensaios com grandes macacos planos inseridos em fendas abertas com disco diamantado, a caracterização da resistência ao corte mediante ensaios de secções com 1 m^2 , e a determinação do estado de tensão inicial do maciço.

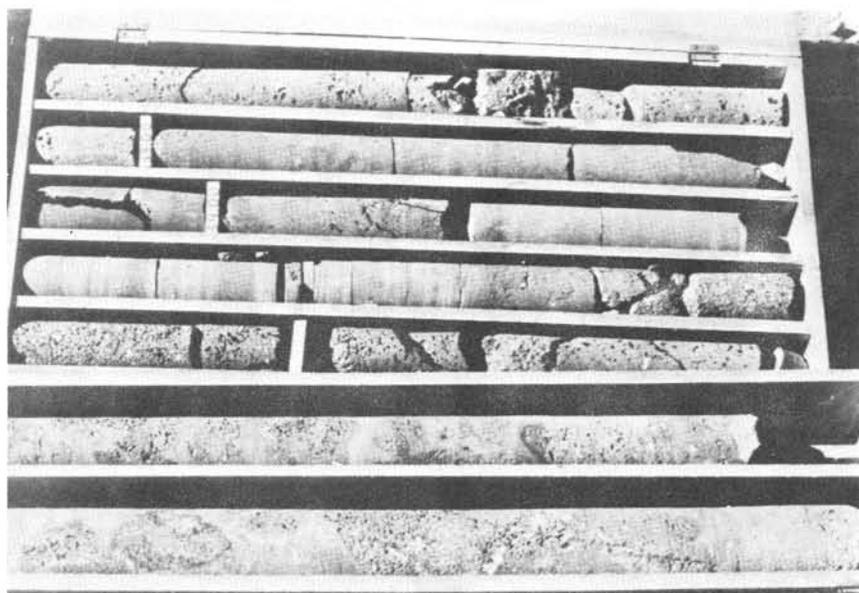


Fig. 3

2 – ESTRUTURA DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO

Os trabalhos de prospecção destinados à caracterização da estrutura do maciço de fundação constaram de, Fig. 2: amostragem tradicional, em 91 furos NX e HX, com o comprimento total de 3900 m; de amostragem integral em 15 furos HX, com o comprimento total de 700 m, tendo cada amostra o comprimento de 2,7 m; e abertura de poços e galerias, com o desenvolvimento total de 500 m. Foram realizados ensaios de permeabilidade em todos os furos.

Tal como é comum, com a técnica de amostragem tradicional obtiveram-se com frequência tarolos perturbados e a percentagem de recuperação não atingia com muita frequência 100%. Deste modo, se levantaram as habituais dúvidas quanto à eventual existência de camadas fracas que se tivessem desagregado e de fracturas abertas, preenchidas ou não. A amostragem integral (Rocha, 1974) permitiu obter informação perfeitamente clara sobre a estrutura do maciço, em particular sobre os contactos entre as várias camadas e a fracturação do maciço rochoso. A Fig. 3 mostra, na parte superior, amostras tradicionais da brecha basáltica e, na parte inferior, duas amostras integrais extraídas na

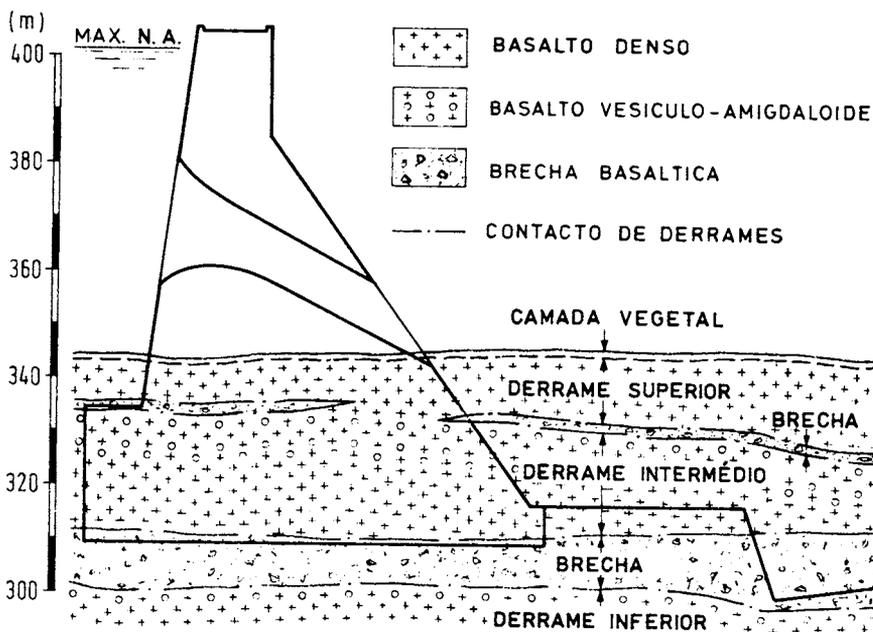


Fig. 4

vizinhança das anteriores. É importante notar que o confronto das amostras tradicionais com as integrais, respeitantes aos mesmos materiais, permitiu passar a tirar das amostras tradicionais informações merecedoras de maior confiança. Como resultado global refere-se que a amostragem integral revelou que o maciço era muito mais compacto, em especial as juntas menos relevantes, do que era legítimo deduzir das amostras tradicionais. A experiência colhida mostrou que teria sido conveniente aumentar substancialmente a extensão da amostragem integral, com prejuízo da tradicional.

Os poços e galerias (Fig. 2) foram abertos não só para a execução de ensaios mas também para a inspecção visual do maciço rochoso em grandes áreas, em particular para observar a extensão das fracturas e o grau de irregularidade dos contactos entre camadas. Tem interesse referir que na superfície dos poços e galerias o maciço se apresentava muito perturbado, como é habitual, em especial o material com propriedades mais precárias (brecha basáltica), sendo as amostras integrais que deram uma imagem que consideramos mais fiel do maciço rochoso.

Os trabalhos de prospecção conduziram à definição da estrutura geológica, a qual consta essencialmente de três derrames basálticos separados por formações sedimentares, tal como se vê na Fig. 4, a qual diz respeito a secção transversal através da parte mais alta da tomada de água.

O derrame inferior, com espessura superior a 30 m, apresenta-se muito são, sem fracturação relevante e tem permeabilidade muito baixa, não pondo pois quaisquer problemas.

É sobre este derrame que se encontra camada de brecha sedimentar, com espessura de 6 a 13 m, constituída por elementos de basalto vesículo-amigdalóide totalmente envolvidos por uma matriz silto-arenosa com alguma argila. Os limites de basalto, de forma angular ou semi-angular, têm dimensões muito variáveis, desde menos de 1 cm até mais de 1 m, predominando as inferiores a 20 cm. O volume de matriz pode atingir 70% do volume da rocha mas em média é de cerca de 50%. O grau de litificação da matriz é muito variável: a base e o topo da camada encontram-se bem litificados, em especial o topo que por estar silicificado exhibe resistência muito elevada, e a parte média da camada é a menos resistente, chegando a ocorrer bolsões de matriz não litificada. Esta parte média da camada de brecha constitui a zona do maciço de fundação com propriedades precárias, tendo por isso sido objecto de especial atenção no programa de ensaios, tanto mais que o trecho de maior altura das barragens

é fundada em tal material (Fig. 4). É importante notar que a brecha não apresenta qualquer fracturação, o que está associado à precaridade das suas propriedades mecânicas.

O derrame intermédio, sobre o qual se apoia o vertedouro e parte da tomada de água, é muito complexo apresentando uma série de intercalações de basalto denso e vesículo-amigdalóide. A sua fracturação não é relevante, em particular a extensão das fracturas é pequena em face das dimensões das estruturas.

3 – DEFORMABILIDADE

A fim de orientar os trabalhos de caracterização da deformabilidade do maciço rochoso (Rocha, 1974) foram realizados cálculos, pelo método dos elementos finitos, do estado de tensão das barragens, para várias hipóteses no respeitante às posições e módulos de elasticidade das diversas camadas. Concluiu-se que as estruturas são pouco sensíveis às variações dos módulos de elasticidade, dentro da gama de valores dos módulos esperados para as diversas camadas. Assim, para a camada mais deformável, a constituída pela brecha basáltica, somente quando a relação entre o seu módulo de elasticidade e o do betão tomar valores inferiores a cerca de $\frac{1}{10}$ se começarão a verificar variações do estado de tensão de considerar no projecto.

Para caracterizar a deformabilidade do maciço de fundação procedeu-se primeiramente à realização de ensaios dilatométricos em furos de sondagem, depois ao zonamento do maciço rochoso (Rocha, 1974) e, finalmente, foram realizados, somente para a brecha basáltica, ensaios em grandes volumes cujos resultados se correlacionaram com os fornecidos pelo dilatómetro.

Os ensaios dilatométricos foram realizados com aparelho, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Rocha, 1974), que opera em furos de sondagem NX, permitindo a aplicação de pressões, p , até 200 kg/cm^2 (20 M Pa) e a medição, com a precisão de 1μ , da variação de comprimento, δ , de quatro diâmetros fazendo entre si ângulos de 45° . A partir do valor da deformação de cada diâmetro deduz-se um valor do módulo de deformabilidade, E_d , admitida a elasticidade e a isotropia do maciço

A localização dos furos de sondagem e dos pontos ensaiados em cada furo foi escolhida em face da informação geológica de que se dispunha quando foi elaborado o plano de ensaios. Essa informação levou a considerar os 8 materiais

QUADRO I

Tipos de materiais	Número de ensaios	E _d (10 ³ kg/cm ²) (10 ² M Pa)
MAIS DEFORMÁVEIS		
1. Brecha pouco lapidificada entre os derrames inferior e intermédio	22	51
2. Brecha pouco lapidificada entre os derrames médio e superior	9	61
3. Basalto denso fracturado do derrame superior	29	69
MEDIANAMENTE DEFORMÁVEIS		
4. Basalto fracturado do derrame intermédio	11	124
5. Brecha bem lapidificada entre os derrames inferior e intermédio	9	93
6. Zona fracturada no derrame inferior	7	140
MENOS DEFORMÁVEIS		
7. Basalto denso do derrame inferior	6	152
8. Basalto não fracturado do derrame intermédio	7	140
100		

indicados no Quadro I, os quais se diferenciam pela natureza da rocha e (ou) deformabilidade esperada. Foram realizados 100 ensaios, nos 10 furos verticais indicados na Fig. 2, a profundidades até 62 m. Esse número de ensaios foi repartido de tal modo que cerca de 60% dos ensaios fossem realizados nas rochas consideradas mais deformáveis, 25% nas medianamente deformáveis e somente 15% nas menos deformáveis.

Na Fig. 5 apresentam-se diagramas típicos obtidos num ensaio dilatométrico da brecha pouco lapidificada, submetida a ciclos de carga e descarga entre 5 kg/cm² (0,5 M Pa) e 60 kg/cm² (6 M Pa). Os valores do módulo de deformabilidade relativos às quatro direcções não diferem apreciavelmente, o que significa não existir anisotropia acentuada.

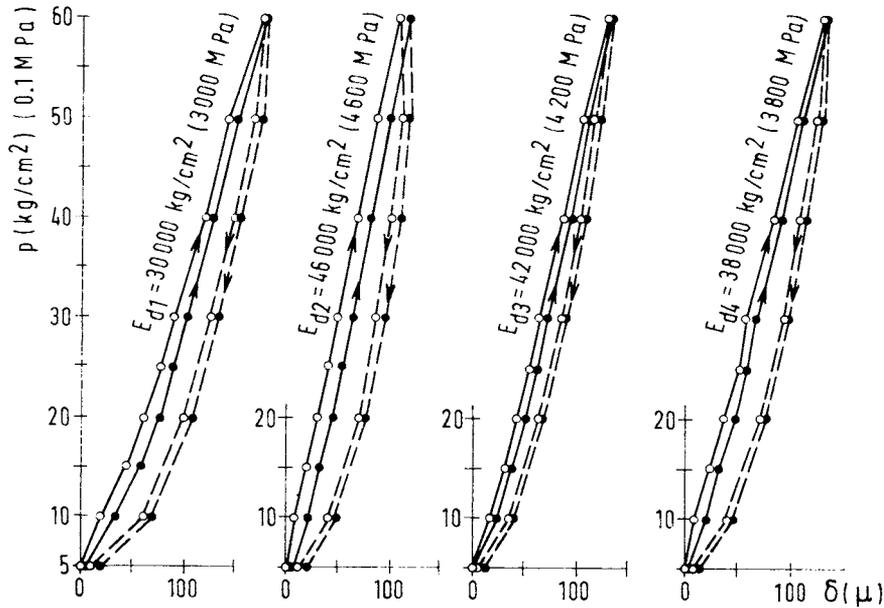


Fig. 5

No Quadro I indica-se, para cada tipo de material, o número de ensaios realizados e o valor médio do módulo de deformabilidade dilatométrico, E_d .

O Quadro I mostra que os ensaios dilatométricos confirmaram a prévia ordenação das deformabilidades nas três categorias, havendo somente a notar que se obtiveram valores iguais a $140\,000\text{ kg/cm}^2$ ($14\,000\text{ M Pa}$) para os materiais 6 e 8, considerados como medianamente e menos deformáveis.

É importante referir que são grandes as dispersões dos resultados respeitantes a cada material, como se pode verificar na Fig. 6, onde se apresenta a distribuição dos valores obtidos para a brecha pouco lapidificada. Como se vê, obtiveram-se mesmo alguns valores inferiores a $20\,000\text{ kg/cm}^2$ ($2\,000\text{ M Pa}$). No entanto, como cada ensaio com dilatómetro interessa um pequeno volume do maciço, a elevada dispersão pode não ter significação para a obra, desde que as dimensões dos volumes do maciço que exibem os valores mais afastados da média, em especial os mais baixos, sejam pequenos em face das dimensões da superfície de fundação; em tal caso, é somente o valor médio do módulo de deformabilidade que interessa considerar. Um dos méritos dos poços e galerias abertos foi precisamente mostrar que cada um dos 8 tipos de materiais

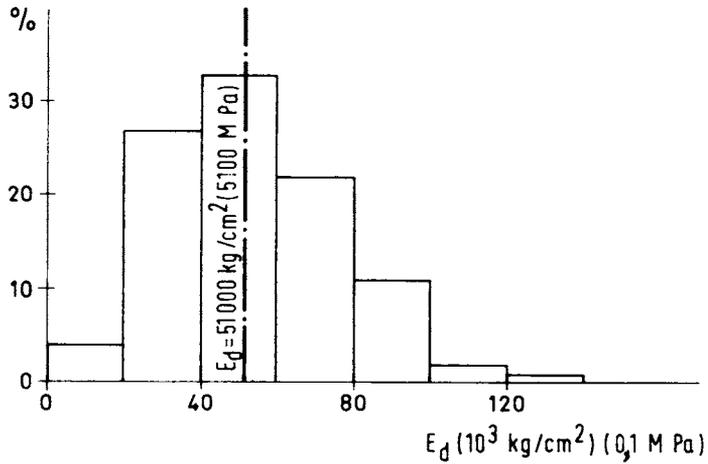


Fig. 6

considerados, em particular a brecha pouco lapidificada, se apresenta heterogêneo com malha de heterogeneidade de pequena dimensão.

Como a experiência tem mostrado que os módulos de deformabilidade dos maciços, determinados em grandes volumes, são pelo menos superiores ao dobro dos valores indicados pelo dilatômetro, concluiu-se que os valores médios do módulo dos materiais medianamente e menos deformáveis (Quadro I) serão superiores a $180\,000 \text{ kg/cm}^2$ ($18\,000 \text{ M Pa}$), não se tendo reconhecido interesse em levar mais longe a caracterização da sua deformabilidade, dados os resultados dos cálculos referidos no início deste número. Quanto aos materiais mais deformáveis, os seus módulos médios não devem ser inferiores a $100\,000 \text{ kg/cm}^2$ ($10\,000 \text{ M Pa}$); no entanto, como se obtiveram valores bastante inferiores à média, como já se referiu, considerou-se necessária a realização para a brecha basáltica de ensaios *in situ* em grandes volumes, tanto mais que não existia para este tipo de material experiência de confronto entre os módulos determinados em grandes volumes e com dilatômetro. Observa-se que o outro material mais deformável, o basalto denso fracturado, constitui camada que acabou por ser eliminada como material de fundação, uma vez que em certas zonas se apresenta decomposto e com fracturas muito abertas.

Quanto ao zonamento do maciço, os ensaios dilatométricos associados à observação das amostras integrais permitiram a atribuição, por defeito, do valor de $300\,000 \text{ kg/cm}^2$ ($30\,000 \text{ M Pa}$) ao derrame inferior e à parte inferior da camada

de brecha sobrejacente, e de 200 000 kg/cm² (20 000 M Pa) ao derrame intermédio e à parte superior da camada de brecha, tendo ficado a atribuição de valor do módulo da camada de brecha pouco lapidificada dependente dos ensaios de grandes volumes.

A caracterização da deformabilidade desta brecha foi feita pelo método de ensaio em fenda, que permite ensaiar grandes volumes do maciço não perturbados (Rocha, 1974), tendo também sido executados alguns ensaios de carga na superfície, para confronto de resultados, Fig. 2.

Foram realizados 6 ensaios em fendas com a profundidade $h=1,5$ m, executadas com disco diamantado de diâmetro $D=1$ m, tendo em cada ponto ensaiado sido abertas duas fendas contíguas. Como as solicitações aplicadas ao maciço são subverticais, as fendas foram executadas horizontalmente, na parede das galerias, para atender a possível anisotropia.

Na Fig. 7 apresentam-se os diagramas respeitantes às aberturas, δ , observadas em 4 pontos de uma das fendas, quando a pressão p é aplicada aos macacos planos inseridos nas duas fendas, em ciclos de carga e descarga entre 2 kg/cm² (0,2 M Pa) e 50 kg/cm² (5 M Pa). Como se vê, o andamento dos diagramas é muito regular, mesmo no primeiro ciclo, e os módulos de deformabilidade secantes, entre 2 kg/cm² (0,2 M Pa) e 50 kg/cm² (5 M Pa), no primeiro ciclo, E_1 a E_4 , calculados a partir das indicações da abertura δ em cada ponto,

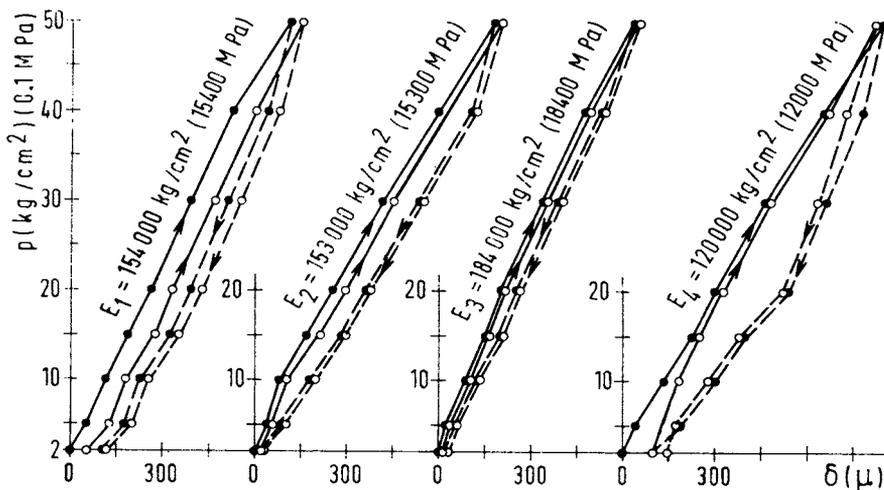


Fig. 7

apresentam um acordo muito satisfatório, o que mostra tratar-se de zona do maciço relativamente homogénea.

Foram realizados ensaios em que se manteve a pressão p nos macacos a fim de estudar a fluência da brecha e determinar a conseqüente redução do módulo. Como os ensaios tiveram somente a duração de 6 horas, não se encontrando estabilizadas as deformações no termo do ensaio, os resultados foram extrapolados para um tempo infinito mediante a adopção de lei exponencial de fluência.

No Quadro II apresentam-se os valores médios dos módulos de deformabilidade correspondentes às deformações observadas logo após a aplicação das pressões, E_0 , e os valores correspondentes a tempo de carga infinito, E_∞ .

QUADRO II

Galerias	E_0 (10^3 kg/cm ²) (10^2 M Pa)	E_∞ (10^3 kg/cm ²) (10^2 M Pa)	E_d (10^3 kg/cm ²) (10^2 M Pa)
2	109	77	30,5
2	164	131	55,3
2	156	109	37,6
2	165	116	41,5
3	128	94	35,0
3	79	63	21,6
Média	134	98	36,9

Como se vê, a fluência determinou diminuições do módulo de deformabilidade que atingiram 30%, devendo no projecto ser considerados os valores E_∞ . Tem interesse notar que a observação visual da brecha basáltica permite distinguir os materiais mais e menos deformáveis, conforme a ordenação estabelecida pelos ensaios.

Uma vez que os materiais com módulo mais baixo correspondem a brecha quase sem lapidificação cuja frequência de ocorrência é pequena, adoptou-se para módulo de deformabilidade da parte central da camada de brecha o valor $100\,000$ kg/cm² ($10\,000$ M Pa).

A fim de correlacionar os valores do módulo da brecha com os obtidos com dilatómetro, foram realizados 6 ensaios dilatométricos em 2 furos de sondagem, com o comprimento de 2,5 m, abertos em cada um dos volumes submetidos a ensaio em fenda. Na última coluna do Quadro II apresentam-se os valores médios obtidos para o módulo dilatométrico, E_d , e na Fig. 8 as rectas de correlação, $E_o = 3,61 E_d$ e $E_{\infty} = 2,64 E_d$, às quais correspondem valores elevados do coeficiente de correlação r . Conclui-se pois que os valores do módulo de deformabilidade determinado em grandes volumes são bastante superiores ao módulo dilatométrico.

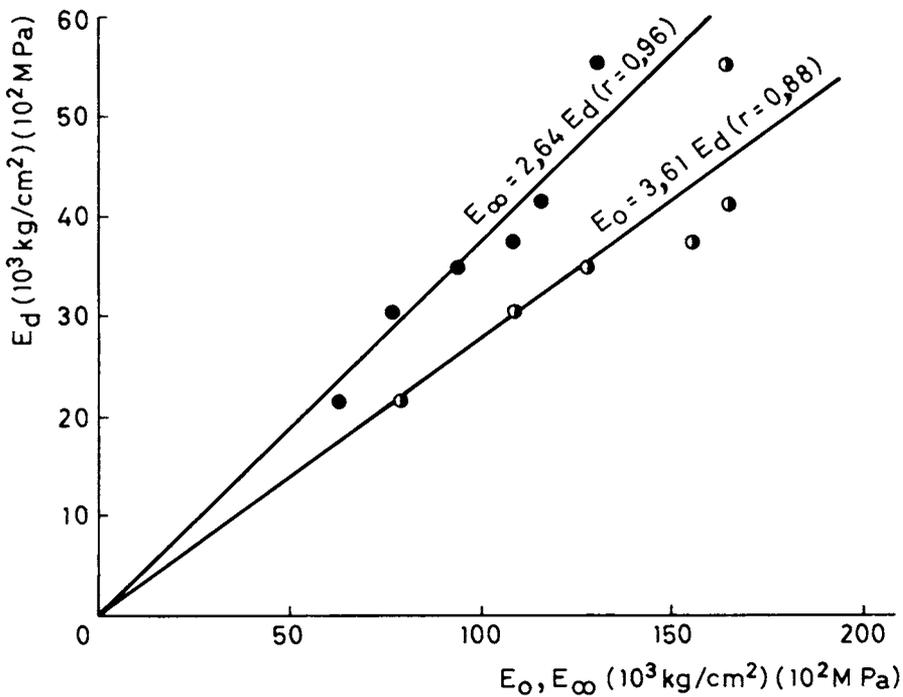


Fig. 8

O conhecimento destas correlações permite, no decorrer das escavações, se tal vier a ser considerado necessário para a fixação da profundidade a atingir, determinar de maneira expedita o módulo de deformabilidade do maciço.

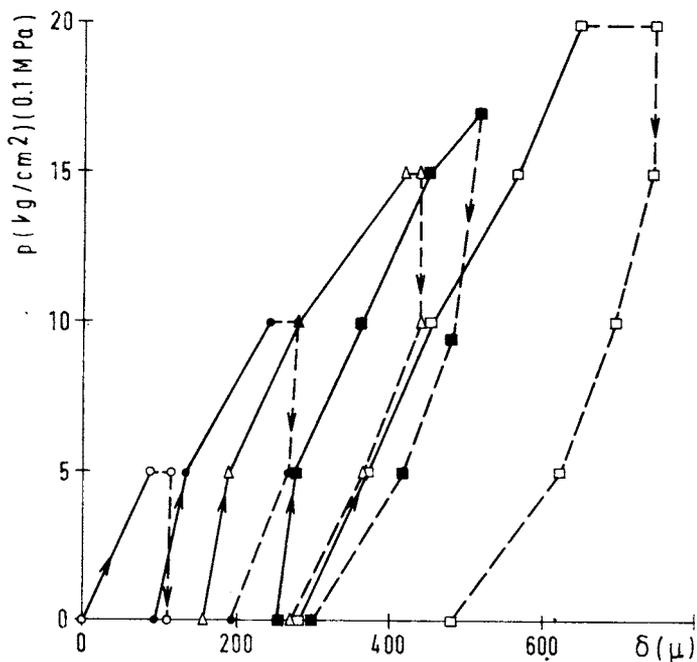


Fig. 9

Finalmente, refere-se a realização de ensaios comuns de carga na superfície, em duas secções, Fig. 2, no tecto e no piso das galerías, isto é, quatro ensaios. Ciclos de carga e descarga foram aplicados em áreas de 1 m². Na Fig. 9 apresentam-se os valores dos deslocamentos δ obtidos no ponto central da área carregada num dos ensaios, em função da pressão aplicada, p . Como se vê, os ciclos de carga e descarga são bastante mais abertos do que na Fig. 7, respeitante a ensaios em fenda. Tal é comum, em virtude da perturbação do maciço rochoso devido à preparação da superfície de carga. Os valores do módulo de deformabilidade obtidos, excluída a fluência, E_0 , para uma variação da pressão aplicada entre 5 kg/cm² (0,5 M Pa) e 15 kg/cm² (1,5 M Pa), estão indicados no Quadro III. O valor médio do módulo é 86 000 kg/cm², verificando-se dispersão apreciável.

Com o método de ensaio em fenda obteve-se um valor médio mais elevado, 135 000 kg/cm² (13 500 M Pa), tal como tem sido observado noutras formações e que é consequência da perturbação do maciço (Rocha, 1974). Nota-se que a diferença não é elevada, o que se atribui ao facto de a rocha não ser frágil, pois tal minora a perturbação devida à preparação da superfície carregada.

QUADRO III

Localização	E_o (10^3 kg/cm ²) (10^2 M Pa)
GALERIA 2	
Piso	47
Tecto	98
GALERIA 3	
Piso	120
Tecto	77
Média	86

4 – RESISTÊNCIA AO CORTE

O conhecimento de que se dispunha do maciço rochoso e a consideração da grandeza das solicitações aplicadas pelas estruturas ao maciço de fundação levaram à conclusão de que era somente necessário proceder à determinação da resistência ao corte da brecha basáltica pouco lapidificada. Na verdade, as restantes camadas são constituídas por rochas com elevada resistência e quando ocorre fracturação ela tem pequena extensão. Os estudos feitos são descritos em pormenor noutro trabalho apresentado a este Congresso (Nieble *et al.*, 1974).

A brecha, como foi referido no art. 2, não apresenta qualquer fracturação mas a resistência da matriz pode tomar valores muito baixos. Está-se perante uma situação típica em que, por um lado, a resistência do maciço depende exclusivamente da resistência da rocha e, por outro lado, a heterogeneidade da rocha e a dimensão dos elementos constituintes – os blocos de basalto vesículo-amigdalóide – impõem a realização de ensaios de corte *in situ*, dadas as dimensões das peças que possam ser consideradas representativas. A Fig. 10, que mostra superfície de 1 m x 1 m ao longo da qual se deu rotura por corte, dá uma boa ideia da estrutura da brecha; as manchas claras correspondem à matriz silte-arenosa e os elementos de basalto estão delimitados por linhas brancas, observando-se bem a natureza vesicular do basalto nos elementos que foram cortados.

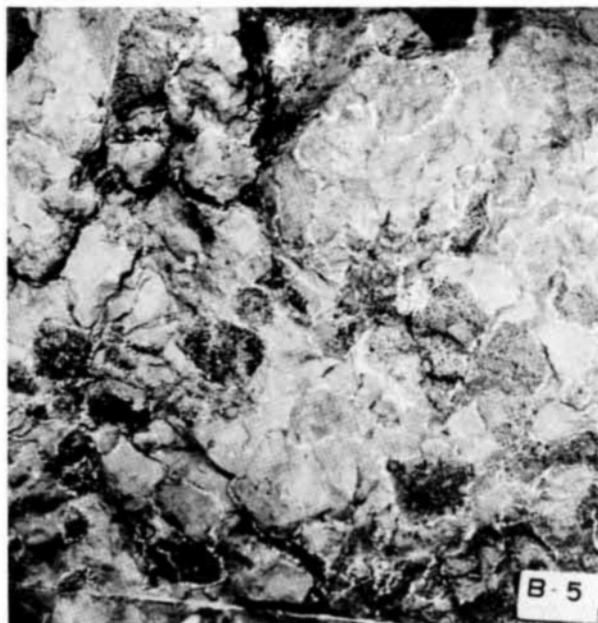


Fig. 10

Foram realizados 18 ensaios de corte, de blocos com a secção de 1 m x 1 m e a altura de 40 cm, Fig. 11, localizados nos nichos N_1 , N_2 , N_3 , e N_4 da Fig. 2. Após abertura de cada um destes nichos foi feito corte vertical com a profundidade de 40 cm, por meio de disco diamantado, ao longo de todo o comprimento do nicho e a uma pequena distância de uma das suas paredes, sendo depois cuidadosamente escavado o material entre o corte e a parede, de modo a ser possível a inspecção visual da face do corte assim exposta. Foi a partir desta inspecção que foi feita a localização dos blocos a ensaiar, de modo a serem representativos do maciço. Trata-se de pormenor com especial interesse, dada a acentuada heterogeneidade do maciço e a necessidade de seleccionar locais onde a máxima dimensão dos elementos da brecha não excedesse cerca de 20 cm, como se verá adiante.

Os blocos para ensaio eram posteriormente talhados, também com disco diamantado (Rocha, 1964) a fim de evitar a perturbação da rocha, e depois envolvidos por carapaça de betão armado, Fig. 11. Nota-se que foi deixado um espaço de 20 cm entre o piso da galeria e a face inferior da carapaça, a fim

de delimitar uma camada do maciço por onde poderá ter lugar rotura por corte sem sujeições impostas pela carapaça nem pela parte inferior do maciço rochoso (Rocha, 1974). Como a secção ensaiada tem a dimensão de 1 m no plano das forças aplicadas, não se considerou conveniente dar à camada ensaiada espessura superior a 20 cm, para limitar os efeitos de flexão da camada, donde resultou a selecção de locais com a preocupação de os elementos de basalto não terem dimensões além de 20 cm. No entanto, após a realização dos ensaios reconheceu-se que em 5 dos blocos ocorriam elementos de dimensões bastante superiores e que claramente influenciaram a resistência observada, incrementando o seu valor, o que levou a não serem considerados os respectivos resultados.

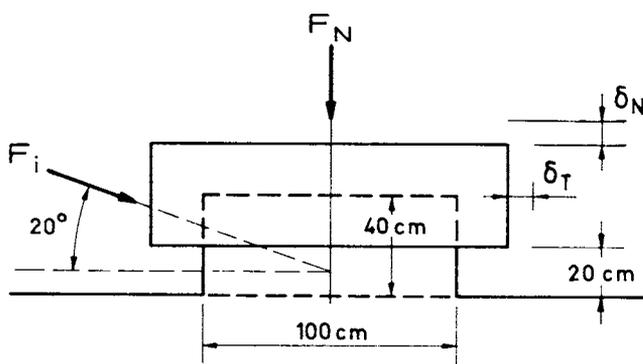


Fig. 11

Os ensaios foram conduzidos aplicando em primeiro lugar a força normal F_N (Fig. 11) até estabilização das deformações, medindo-se a evolução dos deslocamentos normais, δ_N , e depois a força inclinada F_i , com medição de δ_N e dos deslocamentos tangenciais, δ_T .

Na Fig. 12 apresentam-se resultados típicos de evolução dos deslocamentos com o valor da tensão tangencial média, ζ , aplicada na camada em ensaio. Quanto à curva de evolução de δ_T com ζ , verifica-se uma cedência do material para tensão de cerca de 10 kg/cm^2 (1 M Pa), a tensão máxima atinge o valor $\zeta_{\text{max}} = 13 \text{ kg/cm}^2$ (1,3 M Pa) e a tensão residual é inferior a 10 kg/cm^2 (1 M Pa), isto é, apreciavelmente inferior à máxima. É importante notar que o valor do coeficiente de segurança a aplicar à tensão máxima de corte deve ser tal que a tensão tangencial a adoptar no projecto se encontre abaixo da tensão de cedência, não só para evitar deslocamentos eventualmente excessivos mas

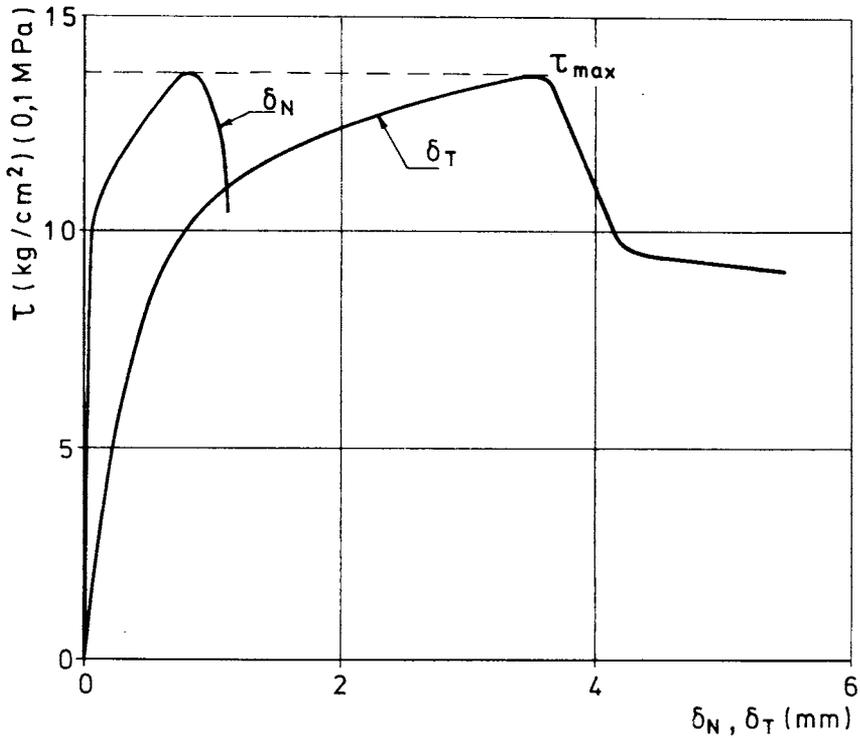


Fig. 12

também porque a cedência pode corresponder a perturbação inconveniente da estrutura do material ao longo da vida da obra, em especial se estiver associada a fluência acentuada e a modificação da permeabilidade. Quanto à Fig. 12, é ainda de notar a acentuada dilatância, apesar de a tensão normal aumentar no decorrer do ensaio, fenómeno de esperar em rocha com a estrutura da brecha em consideração.

Na Fig. 13 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio dos 13 blocos nos quais não ocorreram elementos de brecha que falseassem os resultados. Os blocos foram repartidos por duas categorias: 7 com matriz pouco lapidificada e 6 com matriz quase sem lapidificação. Estão traçadas na figura as rectas de regressão correspondentes a cada um destes dois materiais e ao conjunto dos ensaios. Tem muito interesse notar que apesar de a diferenciação dos dois tipos de brecha poder ser feita facilmente por inspecção visual, a sua resistência

pouco difere, pois quando se acentua a lapidificação a coesão passa somente de 3,2 kg/cm² (0,32 M Pa) para 4,6 kg/cm² (0,46 M Pa) e o ângulo de atrito aumenta de 0,5°.

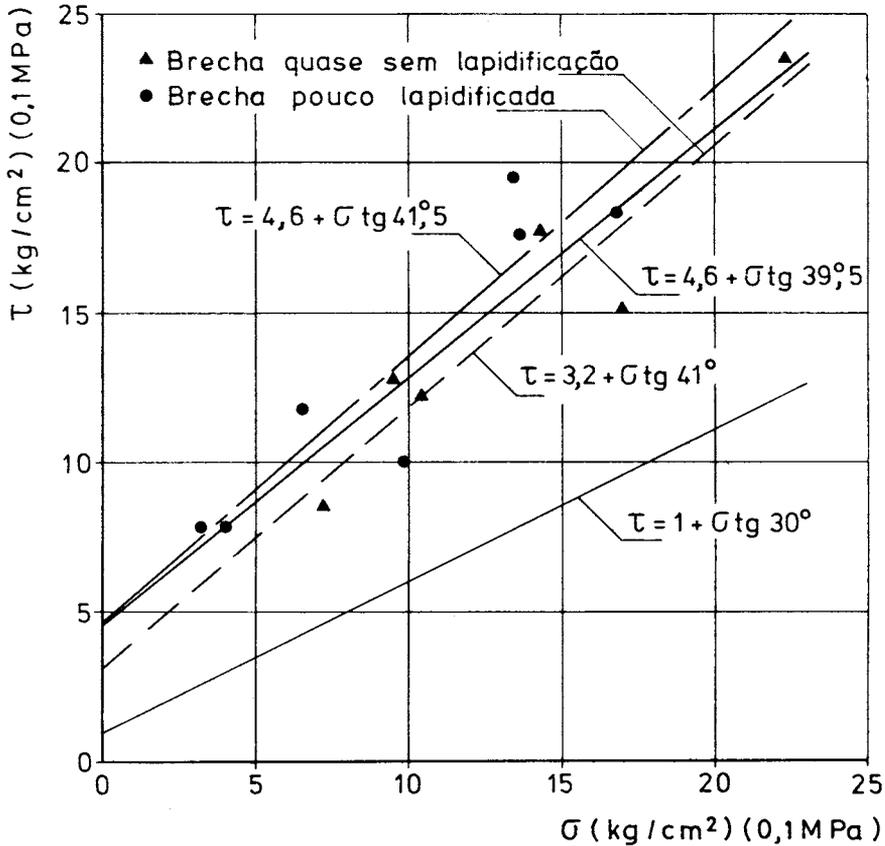


Fig. 13

Apesar de predominar, como foi referido no art. 3, o melhor dos dois materiais, a camada de brecha foi caracterizada pela recta correspondente ao conjunto de todos os ensaios, à qual corresponde a coesão de 4,6 kg/cm² (0,46 M Pa) e o ângulo de atrito de 39,5°. Para o projecto tomou-se a tensão de segurança $\tau = 1 + \sigma \operatorname{tg} 30^\circ$ (kg/cm²), Fig. 13, isto é, adoptaram-se coeficientes de segurança de 4,6 e 1,4 para a coesão e para o coeficiente de atrito, respectivamente, (Rocha, 1974). Nota-se que para estes valores as deformações tangenciais são inferiores às correspondentes a cedência (Fig. 12).

Refere-se que foram realizados 43 ensaios de corte em laboratório sobre amostras com secção de cerca de 20 x 20 cm, extraídas de tarolos de sondagem. Os valores da resistência ao corte encontrados eram superiores, em cerca de 50%, aos obtidos nos ensaios *in situ*, o que se atribui às maiores dimensões dos elementos da brecha em relação à dimensão das amostras, apesar de ter havido a preocupação de os limitar, dentro do critério atrás indicado para os ensaios *in situ*.

5 – ESTADO DE TENSÃO INICIAL

Em virtude de roturas devidas a libertação de tensões iniciais que se verificaram no aproveitamento de Volta Grande ao serem feitas escavações no maciço de fundação, de natureza análoga à do aproveitamento de São Simão, foi reconhecida a necessidade de ser feita neste último a determinação do estado de tensão inicial do maciço. Na parte inferior da Fig. 14 vê-se uma das fracturas sub-horizontais que ocorreram em Volta Grande, tendo o rejeito atingido cerca de 10 cm.

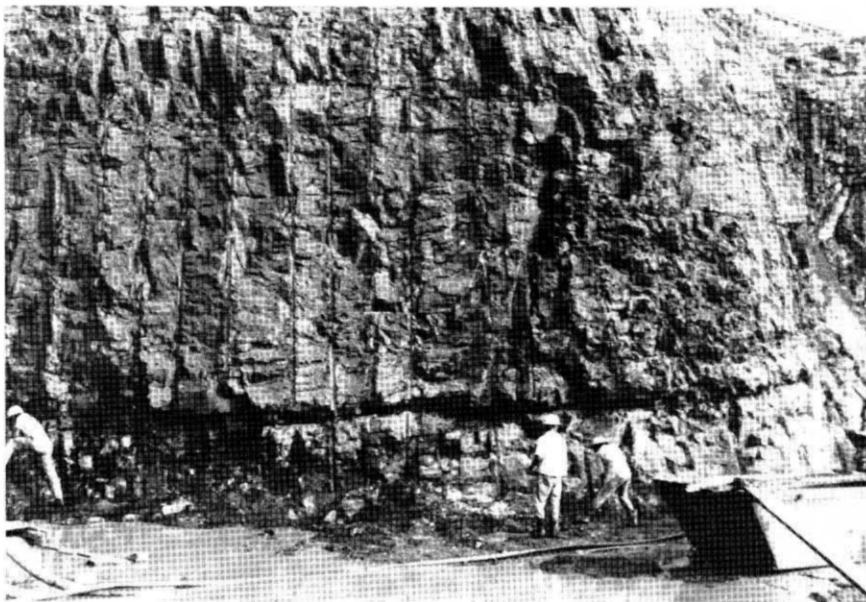


Fig. 14

A determinação das tensões iniciais do maciço de São Simão foi feita aplicando o método de libertação de tensões, por sobre-carotagem, descrito noutra comunicação a este Congresso (Rocha *et al.*, 1974). Esse método permite a determinação das 6 componentes do estado de tensão mediante observações num só furo de sondagem. Foi feita a determinação do estado de tensão em 18 pontos repartidos ao longo de 7 furos de sondagem com o diâmetro de 140 mm, Fig. 2. A maior parte das determinações, 14, foi feita nas camadas de basalto compacto, pois é nelas que deveriam ocorrer as tensões mais elevadas, tendo ainda sido realizados dois ensaios em basalto vesicular e dois na brecha.

Os resultados obtidos mostram a existência de estado de compressão aproximadamente hidrostático em planos horizontais, isto é, paralelos à superfície de terreno. No basalto compacto este estado de tensão atinge o valor médio de cerca de 70 kg/cm^2 (7,0 M Pa), enquanto que no basalto vesicular e na brecha foram observadas somente tensões de cerca de 18 kg/cm^2 (1,8 M Pa) e 15 kg/cm^2 (1,5 M Pa), respectivamente.

Estão sendo realizados cálculos, pelo método dos elementos finitos, dos estados de tensão e dos deslocamentos que se desenvolverão nos taludes de escavações das fundações das barragens de betão e, além disso, está prevista a observação dos deslocamentos que ocorrerão em taludes experimentais no decurso da sua escavação, a fim de fazer confronto entre deslocamentos observados e calculados, e ainda para verificar se os estados de tensão que se desenvolvem dão origem a roturas.

No cálculo do estado de tensão que se desenvolverá no maciço de fundação, quando as barragens entrarem em serviço, será tido em consideração o estado de tensão inicial, em especial na zona vizinha do pé de montante das barragens, onde a actuação da pressão hidrostática pode originar tensões de tracção.

6 – CONCLUSÃO

Como supomos ter ficado bem claro, as novas técnicas referidas no presente trabalho permitem o estudo muito mais aprofundado do que até agora era possível do comportamento das fundações rochosas das barragens de betão, com as consequentes repercussões na segurança e na economia dessas estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a valiosa colaboração dos Engenheiros José C. Graça e João S. Delgado, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, do Geólogo Élcio S. Gonçalves e Engenheiro João E. M. Guido e Adailton S. Pinto das Centrais Eléctricas de Minas Gerais, Belo Horizonte, e dos Engenheiros Fernando Fugimura e Hugo Takahashi e Geólogo Santo B. Neto, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NIEBLE, C. M., MIDEA, N. F., FUJIMURA, F., BERTIN, S. – “Shear Strength of Typical Features of Basaltic Rock Masses – Paraná Basin, Brazil”, 3.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Denver, 1974.
- ROCHA, M. – “Mechanical Behaviour of Rock Foundations in Concrete Dams”, Trans. 8.º Congresso Internacional das Grandes Barragens, Edinburgh, 1964.
- ROCHA, M. – “Present Possibilities of Studying Foundations of Concrete Dams”, Relatório Suplementar, Tema III, 3.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Denver, 1974.
- ROCHA, M., SILVÉRIO, A., PEDRO, J. O., DELGADO, J. S. – “A New Development of the LNEC Stress Tensor Gauge”, 3.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Denver, 1974.