

ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS E TRATAMENTOS EFETUADOS NO MACIÇO

WILSON SHOJI IYOMASA

Geól. - Instituto de Pesquisas

Tecnológicas do

Estado de São Paulo S. A. - IPT.

LUIZ GUILHERME F. S. DE MELLO

Prof. Assist. - Escola Politécnica da USP

e Eng^a - Vector Projetos Integrados S/C Ltda.

MARIO JUITI MOTIDOME

Geól. - Vector Projetos Integrados S/C Ltda

MILTON SCARMINIO

Geól. - Enge-Rio Engenharia e Consultoria S. A.

RESUMO

A barragem de Pirapora, situada cerca de 50km da cidade de São Paulo, sofreu alteração em sua estrutura hidráulica para adequá-la ao trânsito de cheias do rio Tietê. Esta alteração refere-se ao túnel construído, pela sua proprietária ELETROPAULO - Eletricidade de São Paulo S. A., na ombreira direita da barragem.

Devido às características do local e da necessidade de operar as comportas de superfície da barragem durante a execução da obra, optou-se em escavar a parte final do túnel pelo método do "lake piercing". Esta opção técnica condicionou a escavação do túnel de jusante para montante.

Escavado pelo método NATM (New Austrian Tunneling Method) até as proximidades do fundo do reservatório, o túnel atravessou rochas metassedimentares, constituídas por metarenito, metapelito (metargilto e metasiltito) e quartzito, que associados aos fraturamentos, alterações, percolações d'água, etc., compõe as diversas classes de maciços.

Na região do "lake piercing", predomina a classe geomecânica do tipo III, e ocorrem localizadamente dos tipos II e IV. Ensaios de campo no maciço intacto, revelaram permeabilidades equivalentes de 10^{-2} a 10^{-3} cm/s. A redução para valores da ordem de 10^{-4} cm/s foi obtida através de campanhas de injeções de cimento.

Em função destas características do maciço e do método de escavação para alcançar o reservatório, foi necessário recorrer às técnicas convencionais e não convencionais para estabilização da frente de escavação. As primeiras referem-se aos chumbadores e tirantes de aço, drenos e concreto projetado, e a segunda, ao chumbador de fibra de vidro, impermeabilização com argamassa plástica e "cable bolting". Resultados positivos obtidos nos ensaios de laboratório e de campo, permitiram o emprego destas técnicas no túnel de Pirapora.

1. INTRODUÇÃO

A construção do descarregador de fundo foi implementada com a escavação de um túnel pelo Novo Método Austríaco de Abertura de Túneis (New Austrian Tunneling Method - NATM) ao longo da ombreira direita da barragem. A escavação do túnel seguiu o conceito de "lake piercing", também conhecido como técnica norueguesa. Nesta técnica o túnel é escavado de jusante para montante até atingir o fundo do reservatório. A porção final de rocha é removida em uma única detonação. De forma a facilitar a descrição e compreensão, este segmento do maciço é aqui denominado de "rolha", termo de uso corrente na obra.

Os registros bibliográficos revelam que grande parcela das aplicações do método "lake piercing" têm ocorrido em maciço rochoso de boa qualidade, ao contrário do túnel de Pirapora, cujo material constituinte da "rolha" é essencialmente de maciço do tipo III com faixas do tipo IV (BIENIAWSKI, 1976), com altos valores de percolação d'água.

As condições adversas do maciço rochoso e o pioneirismo da aplicação do método de "lake piercing" no Brasil, resultaram em atenção especial a estudos e ensaios não-convencionais de investigações e tratamentos de estabilizações. Tais estudos, compreenderam os ensaios de permeabilidades direcionais, válvulas de poliuretano para conter fluxo d'água acentuado em furos de sondagens, injeções de poliuretano, chumbadores de fibra de vidro, "cable bolting" e a aplicação de argamassa plástica sobre o talude submerso.

2. GEOLOGIA REGIONAL

O túnel localiza-se no Sinclínio de Pirapora (BISTRICHI, 1982). Tal estrutura geológica dobra rochas do Grupo São Roque, representado na área do projeto por rochas metabásicas (localmente com "pillow lavas"), metacarbonáticas, metarenitos, metapelitos (metassiltitos e metargilitos) e subordinadamente quartzitos.

Mapeamento geológico-geotécnico das escavações do túnel principal, das galerias e do poço das comportas, permitiu identificar os tipos litológicos pertencentes ao estratotipo da Formação Estrada dos Romeiros (BERGMANN, 1988).

Os falhamentos transcorrentes de Mairinque, Araçariquama e de Morro Grande são as feições mais expressivas da região. Estas estruturas estão orientadas, respectivamente, para N55E, N20E e N60E. Ao longo dessas, desenvolvem-se uma foliação marcante, segundo planos que apresentam mergulhos subverticais.

A delineação do Sinclínio de Pirapora, cujo traço axial apresenta orientação aproximada de N50E, é conferida pelas foliações presentes nos metassedimentos. As foliações acham-se melhor desenvolvida nas rochas metapelíticas. Nos metarenitos é mais difícil de ser observada, enquanto que em quartzitos e metacarbonáticas praticamente não se nota esta estrutura. Nos metabasitos observa-se uma xistossidade incipiente próximo ao contato por falha com os metassedimentos.

3. GEOLOGIA E GEOTECNIA LOCAL

A ombreira direita da barragem de Pirapora é constituída por metassedimentos da Formação Estrada dos Romeiros. O túnel interceptou parte destes tipos litológicos, principalmente as intercalações de metarenitos, metapelitos e quartzitos (Figura 1). Os quartzitos apresentam-se como uma massa compacta, sem foliação aparente, distinguindo-se dos metarenitos onde divisam os grãos de quartzo e uma foliação incipiente.

A porção final do túnel ("rolha") desenvolveu-se sobre os metapelitos, que correspondem a uma rocha cinza escura (sã) a marrom (alterada), com o acamamento sedimentar reliquiar ainda visível e uma clivagem ardósiana que em determinados locais encontrava-se superimposta por uma clivagem de crenulação tardia. Mapeamento geológico-geotécnico (escala 1:100) das escavações que cobriram mais de 11.000m² e cerca de 74 sondagens rotativas (mais de 2.000m de testemunhos) executadas na região,

permitiram verificar variações nas altitudes da foliação ao longo das escavações.

IYOMASA E MOTIDOME (1992) realizaram estudos estatísticos desta estrutura em três áreas do túnel (jusante, central e montante) e verificaram a variação gradativa de NOOE 00NW a NOOW NOOE, conforme resumido na Figura 2. Os autores realizaram também análise discriminada segundo as condições das paredes das fraturas (alterada, oxidada e com preenchimento argiloso) que possibilitou o reconhecimento de fraturas com preenchimento argiloso com ângulo de mergulho inferior à média, tanto no domínio dos metarenitos, quanto no dos metapelitos (Figuras 3 e 4).

Além da foliação, as direções principais das fraturas medidas na área do túnel, em ordem decrescente de frequência (ENGE-RIO, 1991), são:

- N 50 W 50 SW dispersão na direção e mergulho (15°)
- N 45 W 78 NW dispersão na direção (20°) e mergulho (4°)
- N 45 W 74 SE dispersão na direção (20°) e mergulho (4°)
- W 57 N dispersão na direção (10°) e mergulho (20°)
- W 50 S dispersão na direção (10°) e mergulho (10°)
- Subhorizontais com direção variável e mergulho de 20°

Ensaio direcional de permeabilidade (IPT, 1991), realizados no maciço intacto próximo ao emboque montante, permitiram relacionar as altas percolações d'água às foliações das rochas. A resposta hidráulica destes ensaios associados aos mapeamentos permitem ainda deduzir que as aberturas hidráulicas equivalentes são relativamente pequenas, da ordem de décimos de milímetro. A permeabilidade nesta região apresentou valores entre 10⁻² a 10⁻¹ cm/s.

4. CLASSES DE MACIÇO

O projeto de escavação e tratamento do túnel permitia a aplicação de quatro métodos de classificação geomecânica do maciço: R.Q.D. ("Rock Quality Designation"), Rocha, Bieniawski e Barton.

A avaliação realizada nas primeiras escavações da obra, mostrou que adequava-se melhor às características geológico-geotécnicas do maciço rochoso, o método proposto por BIENIAWSKI (1976), porém com adaptações às condições da área. A qualidade do maciço foi determinada mediante atribuição de pesos a cada um dos cinco parâmetros escolhidos como critérios de classificação (resistência à compressão simples, espaçamento entre fraturas, condições das descontinuidades, persistência das descontinuidades e presença de água). A Figura 5 apresenta os pesos dos parâmetros, cujos valores foram adaptados às características locais.

PARÂMETROS	PESOS
1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	15
A1 Rocha sã, cor original intacta	
Metapelito (Sc= 10 410 t/m ²)	15
Metarenito (Sc=14 180 t/m ²)	15
A2 Rocha medianamente alterada, cores esmaecidas, pequenas transformações físico-químicas	
Metapelito	7
Metarenito	10
A3 Rocha muito alterada, cores parcialmente modificadas, intensas transf. físico-químicas	
Metapelito	2
Metarenito	5

2 ESPAÇAMENTO ENTRE FRATURAS	25
Maior do que 2,0m	25
De 0,6m a 2,0m	20
De 0,2m a 0,6m	15
De 0,06m a 0,2m	10
Menor do que 0,06m	5
3 CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES	20
Selada	20
Rocha x rocha	12
Paredes alteradas	10
Paredes oxidadas	5
Com preenchimento argiloso	2
4 PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES	20
Menor do que 1,0m	20
De 1,0m a 3,0m	15
De 3,0m a 5,0m	10
Maior que 5,0m	5
5 CONDIÇÃO DE ÁGUA	20
Seco	20
Úmido	15
Jorros menores do que 1,0 l/min	10
Jorros maiores do que 1,0 l/min	5
CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	
80 a 100	I
60 a 80	II
40 a 60	III
20 a 40	IV
0 a 20	V

FIGURA 5 Classificação geomecânica (adaptada de Bieniawski, 1976) empregada no túnel de Pirapora.

5. CONDICIONANTES GEOTÉCNICAS NA DEFINIÇÃO DO EIXO DO TÚNEL

As investigações geotécnicas através de sondagens mecânicas para a elaboração do projeto executivo, encerraram-se no início das escavações dos acessos aos pontos estratégicos do túnel principal. As investigações apontaram duas fortes condicionantes geotécnicas: uma relacionada à dissolução de rochas metacarbonáticas na área do emboque jusante, e outra relacionada à baixa qualidade geotécnica do maciço rochoso, no emboque montante.

A dissolução de rocha metacarbonática, na região do emboque jusante, foi observada durante a execução de sondagens rotativas, cuja composição penetrava no maciço apenas com o próprio peso. A superfície da rocha metacarbonática sã é muito variável, ocorrendo sobre esta rocha, um solo muito poroso, com baixa resistência à penetração e espessura métrica.

Na margem direita do rio, com a dissolução da rocha, formou-se uma plataforma irregular próxima à cota 660m, não visível em superfície pois se encontra recoberta de material movido de metapelitos e metarenitos. Após a identificação do "carst" foi possível reconhecer um pequeno abatimento nas encostas do terreno com forma semelhante a um corpo de tálus.

Com a finalidade de evitar problemas durante as escavações, deslocou-se o emboque jusante para uma posição mais a montante em maciço rochoso "in situ", com boas condições geomecânicas. A outra condicionante que determinou a posição final do traçado do túnel foi a baixa qualidade geotécnica do maciço, na região da "rolha". No local inicialmente proposto pelo projeto básico, os testemunhos mostram que o segmento do maciço situado entre o túnel e o reservatório, é constituído por rocha de classe IV com pequenas intercalações do tipo III. Investigações realizadas à jusante deste ponto indicaram maciço de melhor qualidade geotécnica, ou seja, essencialmente maciço tipo III e localizadamente tipo IV. A estrutura geológica (foliações e fraturas) interferiu no projeto de estabilização das escavações, sem no entanto condicionar o traçado do eixo do túnel. A distribuição geométrica e as características dos chumbadores e tirantes, estão diretamente relacionados à conjugação e às feições das estruturas geológicas. Da mesma forma relacionam-se os projetos das perfurações para drenos e das injeções de caldas de cimento.

6. MÉTODO DE ESCAVAÇÃO

No método do "lake piercing" as escavações do túnel se processam de jusante para montante, até atingir as proximidades do lago ou reservatório.

O túnel de Pirapora, com comprimento total da ordem de 203m, foi escavado em duas etapas, com exceção do trecho final. Empregando-se o método NATM (New Austrian Tunneling Method) escavou-se inicialmente a abóbada com área aproximada de 25m², e posteriormente o rebaixo, com cerca de 35m² de área.

Os avanços das escavações na primeira etapa variaram entre 2,0 a 1,0m, em função das características geotécnicas do maciço rochoso. Na segunda etapa, em maciço tipo I o comprimento máximo admitido entre a frente de escavação e o trecho estabilizado foi de 3,0m. Nos maciços tipo II e III, as distâncias foram de 1,5m e 1,0m, respectivamente.

Nos pilões a carga média aplicada por detonação foi de 115kg de explosivos, dividida em 10 retardos, com a razão média de carga em torno de 3kg/m³. No rebaixo, ou seja, na segunda etapa de escavação, empregou-se uma média de 20kg/retardo e razão de carga de 1 a 2kg/m³.

7. TRATAMENTOS EFETUADOS

Nos tratamentos preliminares das frentes de escavações do túnel foram aplicados, imediatamente após as escavações, chumbadores de aço, drenos, concreto projetado com e sem tela metálica. Variações nos quantitativos destes suportes estão diretamente relacionadas à classe de maciço escavado.

7.1. Concreto Projetado, Chumbadores de Aço e Tirantes

A aplicação do concreto projetado ocorreu em quase toda extensão do túnel, tanto nas paredes e no teto do túnel, dada a presença da associação das estruturas geológicas e da decomposição da rocha. No maciço classe I não foi necessária a aplicação deste tratamento.

No maciço tipo II a espessura aplicada foi de 3 cm e no maciço III de 5cm, passando-se para 7cm com tela metálica quando em presença de água.

O maciço II recebeu tratamento adicional de chumbadores de aço CA 50 com diâmetro de 25mm. Em cada seção espaçada de 2,0m, aplicaram-se 5 chumbadores com

comprimento de 2,0m e 3,0m em litologias constituídas por metapelitos e metarenitos, respectivamente.

Nos trechos de maciço tipo III, os chumbadores foram substituídos por tirantes com comprimentos de 3,0m e 4,0m, em função da presença d'água no maciço. Estas ancoragens receberam cargas de 7,0tf.

O tratamento sistemático com distribuição geométrica dos chumbadores e tirantes, sofreu alterações de acordo com as características locais, por exemplo, no caso de estabilização de seção com diferentes classes de maciço, os tratamentos foram diferenciados com diminuição ou acréscimo de suportes.

As paredes da câmara das comportas (Figura 1), constituídas por maciços tipos I e II, receberam tratamento especial por meio de tirantes de aço com 32mm de diâmetro, devido à atuação da pressão d'água no revestimento de concreto durante a operação da estrutura hidráulica. Tratamento com estes tirantes, também foi realizado no teto desta câmara ante às dimensões da escavação e à passagem gradual de maciço do tipo I até o III.

Todos os tirantes, ancorados com calda de cimento, foram submetidos ao ensaio de recebimento, e posteriormente, protendidos com carga de 35,0tf. Visando a incorporação do tirante ao maciço e sua proteção contra corrosão, o espaço entre a parede do furo e o tirante foi preenchido com calda de cimento.

7.2. Drenos

A distância de cerca de 40,0m do reservatório tornou-se necessário a instalação de drenos para melhoria da estabilidade do túnel. Sua aplicação não obedeceu ao projeto geométrico de distribuição espacial, mas às características geológico-geotécnicas do maciço obtidas através de mapeamentos. Nestes levantamentos procurava-se identificar as estruturas geológicas permeáveis que condicionavam as percolações para o interior da escavação. A partir destas informações associadas aos avanços programados, definia-se a localização, direção e a dimensão dos drenos.

Aplicaram-se dois tipos de drenos, denominados de rasos e profundos. Os drenos rasos, com $\phi = 2\frac{1}{2}"$, não ultrapassava de 3,0m de comprimento. Os profundos, com $\phi = 3"$, atingiram profundidades de até 12,0m. A instalação destes últimos ocorreu em maior número no lado esquerdo hidráulico do túnel onde ocorreu grande percolação d'água (100 l/min) através de fraturas abertas, mesmo à mais de 40,0m do reservatório.

As vazões dos drenos, de uma forma geral, não ultrapassaram de 5,0 l/min, com pressão máxima igual à diferença de cotas entre o reservatório e o ponto de medida (da ordem de 2,0kgf/cm²).

7.3. Injeções de Calda de Cimento

A injeção de caldas de cimento foi iniciada após a frente de escavação apresentar alta percolação d'água no maciço, conforme relatado anteriormente. O tratamento por injeção de cimento, a partir do túnel, compreendeu a execução de quatro campanhas distintas (Figura 1).

A primeira, situada à cerca de 40,0m da região da "rolha",

abrangeu 161 furos com comprimento total de aproximadamente 1900m. A segunda fase, subdividida em duas etapas, compreendeu 71 furos num total de 864,0m e tiveram início a 25,0m e a 15,0m da "rolha". Na terceira fase de injeção, 36 furos com comprimento total de 495,0m, atingiram a base inferior da "rolha".

Informações a respeito da quarta campanha e das injeções que partiram da galeria transversal, estão descritas no item referente ao "lake piercing".

Além destas campanhas, a partir da plataforma do poço de controle das comportas (Figura 1), realizou-se uma outra com 50 furos, quase todos verticais, com mais de 1000,0m de perfuração com a finalidade de impedir percolação d'água pelas paredes do poço.

7.3.1. Equipamentos e método empregado

A distribuição geométrica dos furos de injeção de calda de cimento a partir do túnel caracterizou-se pela execução de sucessivos cones concêntricos, cujos eixos localizavam-se aproximadamente sobre o eixo do túnel. As extremidades dos furos que se afastavam da escavação atingiram aproximadamente um diâmetro de túnel. Empregou-se equipamento de rotoperfuração nas perfurações, e o comprimento variou em função da distância entre a face de escavação e o reservatório. Todas as perfurações foram executadas com broca de $\phi = 3"$ contendo esferas de "wídia".

De modo geral, a injeção em cada furo foi efetuada em trechos de 2 e 3m, o primeiro trecho injetado corresponde ao trecho mais distante do início do furo.

As pressões máximas de injeção aplicadas seguiram a seguinte relação:

$$P_m = P_a + P_e + P_c$$

onde :

P_m = pressão máxima de injeção medida no manômetro

P_a = pressão de água medida no manômetro

P_e = pressão efetiva de injeção (min. 0,5kgf/cm²)

P_c = pressão devido à coluna de calda de cimento (furo ascendente).

A pressão efetiva de injeção, sugerida pelo projeto, limitava-se a 0,5kgf/cm², entretanto durante a evolução do tratamento o limite máximo atingiu 0,7kgf/cm².

Previamente à injeção de cada trecho de um furo, foram coletados dados de pressão neutra. O peso da coluna de cimento, a princípio não foi considerado, entretanto com o desenrolar dos trabalhos passou a ser rotineiramente calculado previamente à injeção de furos ascendentes.

7.3.2. Cargas utilizadas

A importância da estabilidade de caldas de injeção, enfatizada nos estudos de HOULSBY (1982), DEERE (1982) e LOMBARDI (1985), foi uma das preocupações técnicas que exigiu a execução de

inúmeros ensaios de laboratório, até a determinação dos traços das caldas de cimento. É importante lembrar, que estes ensaios estiveram sob a responsabilidade técnica do Laboratório Central de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo - CESP.

Um baixo fator de sedimentação, por exemplo, é importante para assegurar o completo preenchimento de uma fratura. Foram observados alguns furos de injeção que apresentavam preenchimento apenas de seu semi-círculo inferior. Tal fato foi interpretado como decorrente de fatores de sedimentação acima dos limites e/ou relacionado à dificuldade de esgotamento do furo previamente à injeção da calda. A tentativa de se obter as viscosidades das caldas, através do viscosímetro tipo Fann, não foi bem sucedida devido aos problemas mecânicos no equipamento.

As características reológicas das caldas de cimento utilizadas na obra de Pirapora são apresentadas na Figura 6. Variações de valores além dos limites foram controlados ao longo do tempo e foram atribuídos a fatos prosaicos, como por exemplo a presença de água nas tubulações que não era computada na dosagem, ou erros humanos de dosagem dos componentes da calda de cimento.

TRAÇO A/C	ADITIVO BENTON	ESCOAMENTO (S)	SEDIMENT. (%)	RESIST. (kg/cm ²)		
				7	14	28 dias
0,5	0,0	45 a 50	2 a 3	20	25	30
0,65	1,0	35 a 38	4 a 5	15	23	28
0,7	1,0	32 a 35	5 a 7	11	13	16
0,8	1,0	30 a 31	5 a 8	7	10	13

Figura 6

7.3.3. Dados de consumo de calda de cimento

O consumo linear de cimento apresenta alguns picos no início do tratamento do maciço, que alcançam até 137 kg/m como se observa na Figura 7. Esses consumos elevados, intercalados por uma série de pequenos consumos (da ordem de 6 a 10 kg/m), diminuíram à medida que o tratamento avançava. Durante os trabalhos de injeção, constatou-se que após a ocorrência de grandes absorções de cimento, portanto, com o preenchimento das estruturas mais abertas, havia sensível diminuição no consumo dos furos subsequentes.

O consumo médio de cimento nas campanhas da primeira e segunda fases atingiram valores relativamente baixos, respectivamente, 10,4 kg/m e 12,1 kg/m. Na terceira fase o consumo foi ainda menor, 5,6 kg/m, devido à sobreposição de trechos tratados nas fases anteriores.

7.3.4. Consumo de cimento por posição dos furos em relação ao túnel

A análise dos dados da campanha de injeção da

fase I, que partiu do túnel, mostrou que as principais absorções de calda ocorreram no lado esquerdo hidráulico do túnel, no piso e na porção frontal da escavação (VECTOR, 1991). Sondagens mecânicas de investigação realizadas no lado esquerdo e na parte frontal, não permitiram identificar estruturas geológicas que justificassem tais consumos. Porém, o mapeamento das escavações próximas à "rolha", indicaram maiores aberturas da foliação e fraturas, devido provavelmente à relaxação do maciço.

Nestas campanhas, em um mesmo furo, o consumo médio de cimento apresenta valores diferenciados, sendo maiores no primeiro e terceiro trechos. Absorção maior no primeiro trecho é justificada por atingir regiões ainda intactas do maciço. No segundo trecho, sob influência do primeiro, o consumo é menor, e no terceiro, o maior consumo deve-se à proximidade da frente de escavação, onde o maciço está perturbado pelas detonações.

7.3.5. Consumo de cimento por ordem de execução

O consumo de cimento nas diversas ordens de execução das injeções, exibe tendência de redução à medida que decorriam as injeções das ordens anteriores. Sob este aspecto as injeções ocorreram em conformidade com as expectativas e experiências de outras obras.

Análise semelhante realizada entre linhas concêntricas de furos, apresentou a mesma tendência, ou seja, os furos da linha externa (primeira ordem), absorveram mais cimento do que as linhas internas.

7.3.6. Eficiência do tratamento com injeção de cimento

A avaliação técnica da eficiência dos tratamentos efetuados, nas três campanhas de injeções, foi obtida de forma qualitativa e quantitativa. O mapeamento geológico-geotécnicos das frentes de escavações forneceram as informações para avaliação qualitativa, com indicações da presença de calda de cimento em forma de película ou veio, sua espessura, persistência, etc.

A avaliação quantitativa fundamentou-se na análise dos resultados de consumo e medidas de vazões e pressões, realizadas ao longo de furos antes de serem injetados.

7.3.6.1. Valores medidos de vazões nos furos antes das injeções

Na primeira campanha de injeção (fase I), compreendida entre as distâncias de 55m e 30 m do reservatório (estacas 2 + 10,00 a 3 + 15,00), obteve-se 50 valores medidos em diferentes trechos de furos, durante o tratamento. A média destes valores ficou em torno de 8,0 l/min, com vazão máxima, determinada em um único ponto, de 82,0 l/min. A vazão específica média por metro linear de furos foi de 0,2 l/min x m.

A região do maciço compreendida entre as distâncias de 20m e 30m, correspondente à campanha da fase II, apresentou vazões médias de 6,0 l/min e máxima de 100 l/min. Considerando-se que houve percolação em 216 trechos de furos dos 374 examinados, o caldai médio, em relação à campanha anterior, caiu para 3,5 l/min. De forma oposta a vazão específica média por metro linear de furo subiu para 0,9 l/min x m.

A fase III da campanha de injeção abrangeu a região do maciço situada entre 10m e 20m do reservatório. Nesta porção do maciço dos 154 trechos de furos observados, 91 apresentaram vazões médias de 6,0 l/min e máxima de 120 l/min. A vazão específica média, nesta região mais próxima ao reservatório, elevou-se para 1,2 l/min x m.

A análise destes dados permite relacionar situações de vazões de água maiores nos furos de primeira ordem, com maior consumo de cimento, e uma constância de valor de consumo de cimento nos furos de ordem superior.

Observa-se ainda redução substancial das vazões média coletada nos furos posteriores aos de ordem primária de injeção. Furos subsequentes de mesma ordem, também apresentaram vazões menores.

Nos furos pertencentes aos de ordem terciária e quaternária as percolações d'água foram praticamente nulas.

7.3.6.2. Medidas piezométricas no maciço

Análise cronológica das medidas das pressões piezométricas, em diferentes etapas do tratamento por injeções de cimento, não apresenta tendência de declínio. No entanto, estudos comparativos das pressões em função das ordens de injeção (primária, secundária, terciária e quaternária) apresentam resultados que merecem ser apreciados.

As pressões neutras atuantes na porção do maciço situada em distâncias maiores da frente de escavação, estão propensos à redução (VECTOR, 1992), à medida que evoluíram os trabalhos injeção (Figura 8). Com a introdução da calda de cimento no interior do maciço, vedaram-se as estruturas mais abertas, tomando o maciço menos permeável, nesta região e com a distribuição espacial mais homogênea da permeabilidade.

Esta alteração imposta ao maciço direcionou a rede de fluxo d'água para as proximidades da superfície das paredes escavadas, aumentando as pressões neutras nesta região.

7.3.6.3. Medidas de permeabilidades

No trecho do maciço compreendido entre as fases I e III das campanhas de injeções, obteve-se, em dois furos de sondagens rotativas, valores de 0,0 até 5.10^{-4} cm/s de permeabilidade equivalente. Durante as investigações do projeto básico a permeabilidade do maciço situava-se entre 1.10^{-4} a 5.10^{-4} cm/s, ou perda específica de 1 a 5 l/min.m.kgf/cm².

8. REGIÃO DO 'LAKE PIERCING'

A região do "lake piercing" corresponde a porção final do túnel, ou seja, corresponde à porção de rocha remanescente entre o túnel escavado e o reservatório, que é removida em uma única detonação.

8.1 Geologia e Geotécnica da "Rolha"

Esta região e seu entorno foi investigada por uma série de sondagens antes do início do projeto executivo, e complementadas por outras perfuradas a partir do interior do túnel e da galeria transversal.

As sondagens executadas a partir do túnel, designadas de SRT-9, SRT-10, SRT-13 e SRT-14, foram direcionadas para o interior da "rolha". As sondagens SRT-11 e SRT-12, igualmente perfuradas a partir do túnel, foram dirigidas para a região imediatamente acima da "rolha", com a finalidade de caracterizar o maciço que ficaria descalçado após a retirada da rocha. A partir da galeria transversal foi executada a sondagem integral SRG-6, direcionada para a parte inferior da "rolha". A Figura 9 mostra a disposição destas sondagens e daquelas perfuradas em etapas anteriores ao projeto executivo.

Além de detalhar a classificação geomecânica do maciço, as sondagens tiveram a finalidade de avaliar os dados da batimetria da superfície da "rolha". Detalhes da perfuração destes furos podem ser obtidos em IYOMASA et al. (neste volume) e YASSUDA, (neste volume).

Nesta área ocorrem apenas os metapelitos compactos e localizadamente bandado. O bandamento é resultado da alternância de bandas de metassilito e metargilito.

A região inferior da "rolha" é constituída por rocha pouco alterada. Há alternâncias de rocha mais e menos decomposta à proporção que se aproxima do reservatório, onde a alteração é mais intensa.

Os mapeamentos das frentes de escavação permitiram identificar seis famílias de descontinuidades, a saber:

Estrutura	Direção	Mergulho
Foliação	N25W	45NE
Fatura 1	N74E	43NW
Fatura 2	N70W	76SW
Fatura 3	N83W	40SW
Fatura 4	N42E	61NW
Fatura 5	N31E	58NE

Considerando-se a classificação adotada na obra (Figura 5), estão presentes nesta região as classes II, III e IV, de acordo com a ilustração da Figura 9.

Seções geológicas traçadas paralelamente à da Figura 9 evidenciaram significativas variações das classes de maciço rochoso, mesmo em espaço de meio diâmetro de túnel, entretanto todas as seções mostram a ocorrência da classe IV junto ao reservatório.

As sondagens indicaram presença de maciço de qualidade inferior no lado direito hidráulico do túnel. No lado esquerdo hidráulico a ocorrência da classe IV é quase inexistente, predominando o maciço tipo III mais homogêneo.

8.2 Método de Escavação

A escavação do túnel até a parte inferior da "rolha" seguiu as mesmas orientações do método NATM, porém com

detonações cuidadosas em nove etapas para remover 30 a 35m³ de material, ou seja, avanços de 0,8m.

Os avanços iniciavam na parte superior para tratar o maciço descalcado, evitando blocos de rocha instáveis. Após a remoção do material proveniente do pilão direcionava-se o alargamento da escavação para o lado do maciço de qualidade inferior, procurando-se manter o maciço de melhor qualidade como suporte.

8.3 Tratamentos Efetuados

Antes do início do processo de escavação cuidadosa para atingir a parte inferior da "rolha", efetuou-se a última campanha de injeção. Estas injeções abrangeram a parte ascendente do túnel (Figura 1) para evitar altas percolações d'água através dos furos destinados à instalação de explosivos.

Encerrada a campanha de injeção, seguiram-se os trabalhos de avanço do túnel. Imediatamente após cada detonação, na frente de escavação, iniciava-se os tratamentos preliminares para estabilização do maciço, através de chumbadores, concreto projetado e furos de alívio de pressão. A contenção definitiva das paredes do túnel foi executada logo após a escavação total do avanço previsto com acréscimos nos suportes e drenos.

Tratamento especial foi executado na superfície da "rolha", portanto em situação submersa, para remoção de materiais soltos sobre a "rolha" e diminuir as percolações d'água, através do lançamento de argamassa plástica.

8.3.1. Concreto projetado

Imediatamente após as detonações aplicou-se 5cm de espessura de concreto projetado sob o maciço exposto. Ao término da escavação, a superfície final das paredes do túnel foi protegida com a sobreposição de tela metálica e mais 5cm de concreto projetado.

As bases intermediárias da "rolha", ou seja, a parte frontal de cada avanço, foram protegidas com 5cm de concreto projetado sem tela metálica.

A base da "rolha" final recebeu reforço no tratamento com concreto projetado, passando para 7cm de espessura, devido ao período relativamente longo (um mês) entre a configuração final da "rolha" e o seu punçãoamento (última detonação).

8.3.2. Drenos

Foram efetuadas perfurações radiais e paralelas ao eixo do túnel de forma a aliviar as pressões neutras atuantes na "rolha" e arredores. Executadas com martelo de coluna, as perfurações, com diâmetro de 1¼", alcançaram a profundidade de 4,0m.

As perfurações radiais, num total de 48 furos e divididas em 4 seções, distanciadas de 1,5m, exigiram o acompanhamento sistemático de um técnico especializado para orientação nos direcionamentos, em função das estruturas geológicas permeáveis.

De forma semelhante, instalaram-se outros 27

drenos na base final da "rolha". Neste frontal, considerando-se os aspectos geológico-geotécnicos e as percolações do maciço, foram perfurados mais 6 drenos, com diâmetro de 3", objetivando medidas de vazões e pressões ao longo dos furos.

8.3.3. Injeção de cimento

As injeções a partir da galeria transversal e da base da "rolha" tiveram importância na diminuição do fluxo d'água pela região de "rolha" (Figura 1).

A campanha de injeção que partiu da galeria de transversal envolveu 50 furos com comprimento total de 780,0m, distribuídos em sete linhas. Esta distribuição vista em planta assemelha-se a um leque aberto.

A última campanha de injeção partiu do início do trecho ascendente do túnel, cerca de 12,0m aquém do reservatório. Compõe-se de 6 linhas concêntricas ao eixo da "rolha", totalizando 71 furos injetados, perfazendo um total de 845,0m perfurados. Alguns furos atingiram distâncias menores do que 0,5m do reservatório.

8.3.3.1. Equipamentos, método e caldas empregadas

Os equipamentos utilizados nestas injeções foram os mesmo das campanhas anteriores. Os furos com diâmetro de 3" alcançaram profundidades diferentes em função da distância entre o seu início e o reservatório.

Os trechos dos furos injetados variaram de 2 a 3 m em virtude da impossibilidade de obter na posição desejada. A pressão de injeção seguiu a relação apresentada anteriormente, estabelecendo-se o valor máximo de 0,7kgf/cm².

Os traços das caldas utilizadas nesta etapa dos trabalhos foram, essencialmente, na proporção em massa de A/C 0,8:1 e 0,5:1. No traço 0,8:1 foi acrescido 1% de bentonita em relação à massa de cimento, para manter a estabilidade desejada da calda. Raramente empregou-se traços mais densos (A/C 0,4:1) ou intermediários (A/C 0,65:1).

8.3.3.2. Consumo de cimento

As injeções realizadas da galeria transversal, indicam consumo sensivelmente superiores em relação às injeções anteriores. Nestas injeções o consumo médio de cimento por metro linear, atingiu 30,4 kg/m (VECTOR, 1993). Porém ao analisar as absorções dos furos situados próximo ao reservatório, a média supera 48,0kg/m.

As injeções na base da "rolha" apresentaram absorções médias relativamente pouco menores, da ordem de 41,5kg/m. Entretanto, deve-se ressaltar que esta campanha foi executada posteriormente àquelas injeções, ou seja, em maciço previamente tratado.

Análise de consumo médio de cimento ao longo do

tempo, não permite concluir a diminuição relativa da tomada de calda, mesmo com o fechamento gradativo da malha de distribuição dos furos. Este comportamento, é devido aos altos consumos de cimento nos trechos próximo ao reservatório, independentemente da ordem de injeção (primária, secundária, etc). Esta absorção excessiva é justificada pela inexistência de tratamentos anteriores e pela possível comunicação das fraturas com o reservatório.

Estudos demonstram que 71,8 % dos furos absorveram até 100 kg/m no trecho junto ao reservatório e foram paralisadas por ter atingido a nega (consumo zero para a pressão máxima estabelecida). Por outro lado, 28,2% dos furos apresentaram consumo superior, com sucessivas injeções sobrepostas, sem alcançar a nega.

Estas informações associadas à descrição da área da superfície pelo mergulhador (em etapa posterior dos trabalhos) demonstram que parte da alta absorção de cimento próximo ao reservatório, deve-se aos vazamentos ocorridos.

Excetuando-se a região próxima ao reservatório, o consumo médio de cimento por metro linear não ultrapassou 25kg/m, na campanha de injeção da base da "rolha". Os furos anteriores, pela galeria transversal, havia atingido valores menores, da ordem de 8,4kg/m.

A comparação destas médias demonstram a baixa eficiência do tratamento pela galeria, possivelmente motivada pelo pequeno ângulo formado entre as direções das injeções e a foliação do metapelito.

A última campanha de injeção foi finalizada com nove furos, sendo oito direcionados para o interior da "rolha". A média geral de consumo não ultrapassou de 15kg/m. Considerando que próximo ao reservatório houve vazamento de calda, excetuando-se portanto os segmentos finais dos furos, as absorções dos demais trechos indicam média de 2,8kg/m.

Estes resultados tendem demonstrar a boa eficiência dos tratamentos efetuados.

8.3.3.3. Eficiência do tratamento

A associação dos dados de pressão e vazão coletados em furos realizados na frente de escavação permitiram avaliar a permeabilidade equivalente do maciço rochoso, compreendido entre o reservatório e o túnel.

Ensaio realizado na "rolha" através das antigas sondagens de investigação (SM-7, SM-8, SM-10 e SM-28), cuja localização pode ser vista na Figura 9, apresentam valores de permeabilidade, predominantemente, superiores a 10^{-3} cm/s no maciço tipo III e percolações menores, até 5.10^{-4} cm/s, no maciço tipo II / III. Correspondem a estas permeabilidades, respectivamente, as perdas específicas de 16,0 e 5,0 l/min x m /kgf/cm².

Após os tratamentos por injeção de cimento, e antes da abertura do sistema de drenos, os ensaios para avaliar a permeabilidade foram realizados nos furos das sondagens SRT-9 e SRT-10. Os resultados mostram que houve redução nas permeabilidades, o maciço II / III tornou-se praticamente impermeável, o do tipo II com permeabilidade da ordem de 3.10^{-3} cm/s (perda específica de 3,3 l/min x m /kgf/cm²).

Permeabilidades superiores ainda ocorreram próximo ao reservatório, onde há associação de maciços do tipo II com IV. As perdas específicas medidas variaram de 76,9 a 113,5 l/min x m kgf/cm², correspondendo às permeabilidades de 7.10^{-3} a 6.10^{-2} m/s.

Após a instalação do sistema de drenagem da "rolha", a avaliação das percolações foram realizadas através de medidas de vazões e pressões em 15 furos, sendo 6 especificamente perfurados para tal fim e os outros 9 furos, destinados para instalação de explosivos.

A perda específica média de 25 pontos observados foi de 6,7 l/min x m/kgf/cm² ou $6,4.10^{-4}$ cm/s de permeabilidade equivalente.

É sensível a redução da permeabilidade do maciço após as injeções demonstrando a eficiência do tratamento adotado, entretanto restaram fraturas esparsas não tratadas que correspondem a vazões elevadas apresentadas em furos comprovatórios.

As pressões neutras atuantes no maciço, atenderam parcialmente aos critérios preconizados no projeto.

8.3.4. Enfilageme e cable bolting

As condições geológico-geotécnicas do maciço situado imediatamente acima "rolha" trouxe preocupações com relação à sua estabilidade, durante e após a detonação final, tendo em vista a quantidade necessária de explosivos para a remoção do material.

A foliação neste segmento do maciço atua de forma desfavorável à estabilidade e está orientada subparallelamente à encosta, aproximadamente semelhante à distribuição das classes de maciço (Figura 9). Um outro fator negativo para a estabilidade foi a presença, localizada, de maciço de classe IV entremeados ao maciço classe III.

Para garantir a estabilidade deste segmento de maciço realizaram-se duas campanhas distintas de tratamento para estabilidade do maciço. Através da galeria transversal instalaram-se os "cable bolts" e chumbadores de aço através do túnel.

Com comprimentos variáveis de 8 a 18m, os 42 "cable bolts" foram distribuídos de forma alternada em sete linhas. O tirante utilizado foi do tipo cordoalha com sete fios e $\phi = 15,2$ mm. Para melhor aderência, na parte inferior das cordoalhas foram fixadas duas luvas de 10cm de comprimento.

Devido ao nível d'água dinâmico do maciço, a instalação destes tirantes foi bastante difícil, sendo necessário recorrer à argamassas (grautes)

específicas de pega rápida. Com exceção de três tirantes que apresentaram problemas nos ensaios de recebimento, os demais foram protendidos com 13tf.

O tratamento pelo túnel envolveu a instalação de 39 chumbadores ascendentes (entilagens), subparalelos ao eixo do túnel. Ocorreram problemas de lavagem da calda de cimento durante a instalação destas barras, devido à percolação constante da água. Entretanto, foi possível obter sucesso na ancoragem através de cimento comum (portland) CP 32 sem uso de aditivos. Estas barras, com diâmetro de 25mm e comprimento de 10m, ficaram ancoradas no maciço rochoso até cerca de 1,0m do reservatório.

8.3.5. Chumbadores de fibra de vidro

As condições geológico-geotécnicas do maciço, na região da "rolha", exigiram escavações cuidadosas e tratamento sistemático por meio de suportes, a cada trecho escavado. A partir dos 10m finais da "rolha", com avanços de 0,8m, a escavação foi parcializada em nove etapas.

A necessidade de estabilização temporária das diversas frentes escavadas e a sua posterior remoção, condicionou a utilização de fixadores que fossem facilmente destruídos na parte detonada mas que se mantivessem atuantes no maciço remanescente.

Com a finalidade de atender estas condições, os chumbadores de fibra de vidro foram submetidos aos ensaios de laboratório e campo, antes de seu emprego sistemático na frente de escavação.

Aprovado nos testes executados o frontal do túnel recebeu 74 chumbadores de fibra de vidro, em duas seções de 37 elementos cada e dispostos em malha de 1m x 1m.

As características do chumbador, suas propriedades e os resultados dos ensaios podem ser apreciados no trabalho apresentado por GUIMARÃES FILHO et al. (no prelo).

8.3.6. Tratamento na superfície da "rolha"

A necessidade de instalar explosivos próximos ao reservatório, cerca de 0,5m trouxe preocupações com relação às altas percolações pelo maciço rochoso, conforme indicavam as últimas medidas de vazões realizadas nesta região. Sob estas condições, com jato d'água de péssima qualidade, os trabalhos para instalação de explosivos poderia sofrer interferências indesejáveis, comprometendo até mesmo o sucesso da detonação final.

Para diminuir estas percolações recorreu-se ao lançamento na superfície da "rolha", portanto em situação submersa, de uma argamassa plástica.

Antes deste lançamento, foi necessária a remoção de materiais soltos através de uma draga de arraste. A eficiência desta limpeza foi confirmada, posteriormente, pelos mergulhadores.

A avaliação do emprego da argamassa plástica ficou prejudicada pela impossibilidade de medidas das vazões d'água pela "rolha", antes e após ao tratamento. Baseando-se nas previsões de vazões que os furos de carregamento da detonação final trariam para a escavação, pode-se estimar que a argamassa plástica apresentou bom desempenho na impermeabilização do talude submerso da "rolha".

8.4. Configuração Final da "Rolha"

Na técnica norueguesa ("lake piercing") a espessura constante da "rolha" contribui para o sucesso da detonação final. Entretanto, a espessura do segmento de rocha no túnel de Pirapora, apresentou variações de 5,0m a 6,5m. Estas variações são devidas, principalmente, às irregularidades na superfície da "rolha". Em parte se deve também, às características geotécnicas do maciço, uma vez que evitou-se avançar a escavação nas áreas com qualidade inferior de maciço rochoso.

De forma geral, a parte média inferior da "rolha" ficou com espessura maior e o lado direito hidráulico superior apresentou espessura menor.

As perfurações para instalação dos explosivos foram realizadas para que o diâmetro nominal da "rolha" atingisse 7,0m.

9. GRANULOMETRIA DO MATERIAL APÓS A DETONAÇÃO

O material removido da "rolha" foi coletado na região do emboque jusante do túnel. Para certificar-se da procedência do material, primeiramente identificou-se o tipo litológico correspondente à área detonada foi a primeira constatação. Outros indícios, tais como, fragmentos de explosivos não detonados, blocos de rocha com pedaços de chumbadores de fibras de vidro e a válvula de vedação ainda fixada no furo de um bloco de rocha (Figura 10) caracterizaram que o material analisado originou-se da "rolha".

O volume coletado de 0,75m³ permitiu a contagem e a obtenção das dimensões dos fragmentos, cujo resultado é apresentado na Figura 11.

10. CONCLUSÕES

Por ser a primeira atividade deste tipo de trabalho no Brasil e também devido às características geológico-geotécnicas da área, tomaram-se várias precauções técnicas, algumas vezes aparentemente exageradas. Porém, ao se considerar a necessidade do sucesso do empreendimento não apenas sob o ponto de vista técnico, mas pela existência da cidade de Pirapora do Bom Jesus, cerca de 2km a jusante da obra, os critérios técnicos admitidos na execução do empreendimento, podem ser considerados justos, face à necessidade das medidas de segurança.

Imprevistos geológicos não ocorreram, além dos detectados anteriormente à execução do projeto, quais sejam, processos de dissolução de rocha metacarbonática no emboque jusante e a baixa qualidade geotécnicas na parte montante da "rolha".

Os tratamentos efetuados para estabilização do maciço, através de injeções, chumbadores de aço e fibra de vidro, "cable bolting", drenos e tirantes não apresentaram dificuldades nas instalações,

exceto na região da "rolha" com presença de água sob pressão. Dados das instrumentações não estão sendo apresentados neste texto por tratar-se de atividade específica e executada por outra equipe. Entretanto, pode-se afirmar que a análise dos resultados de medidas de extensômetros de haste mostram pequenas variações, aquém do permissível em projeto, provavelmente associado à alteração sazonal. Mesmo na ocasião da passagem da escavação sob os pontos instrumentados a movimentação foi baixa.

Resultados sem anormalidades também ocorreram com as medidas de convergência obtidas por meio de pinos instalados para acompanhamento das escavações.

Experiências adquiridas neste projeto permitem a execução de novas obras semelhantes, sobretudo por tratar-se de tipo de obra que menor interferências ocasionam no meio ambiente.

Visita técnica realizada ao "TVAR PROJECT" em Stavanger, Noruega, demonstra claramente a importância destas obras na adução de esgotos tratados, especialmente, para as cidades litorâneas que necessitam de efluentes para transporte ao mar. Outra obra visitada foi a usina hidrelétrica de Canutillar, Chile. O túnel escavado de jusante para montante atingiu um lago da região serrana, cuja água foi direcionada para a geração de energia elétrica.

A técnica do "lake piercing" tem lugar de aplicação em muitas obras brasileiras. É necessário portanto, a divulgação no meio técnico para encontrar respaldo e implantar de forma sistemática.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGMANN, M. 1988. Caracterização estratigráfica e estrutural da sequência vulcano-sedimentar do Grupo São Roque - na região de Pirapora do Bom Jesus - Estado de São Paulo. Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1988.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. Proc. of the Symposium on Exploration for Engineering, Johannesburg, Nov. 1976, p. 97-106.
- BISTRICHI, C. A. 1982. Geologia do Sinclínio de Pirapora, SP. Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1982.

DEERE, D. U. 1982. Cement-bentonite grouting for dams. In: Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, 1982. Proceedings..., New Orleans, American Soc. Civil Engineers, p. 279-300.

ENGE-RIO ENGENHARIA E CONSULTORIA S. A. 1991. Túnel Pela Margem Direita: estudos geológico-geotécnicos. São Paulo. Relatório, n.º PRP-E-0803-3019-RE, São Paulo.

HOULSBY, A. C. (1982) - Cement grouting for dams. In: Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, 1982. Proceedings..., New Orleans, American Soc. Civil Engineers, p. 1-33.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. 1991. Ensaios para determinação da condutividade hidráulica anisotrópica e do coeficiente de armazenamento específico do maciço rochoso da ombreira direita da barragem de Pirapora. São Paulo. Relatório IPT n.º H 29 202, DIGEM, São Paulo.

YOMASA, W. S. e MOTIDOME, M. J. (1992) - Geologia e análise do fraturamento da região da barragem de Pirapora - SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo, 1992. Boletim de Resumos, São Paulo, Soc. Bras. de Geologia.

LOMBARDI, G. (1985) - The role of cohesion in cement grouting of rock. In: Congrès des Grands Barrages, 15, Comptes Rendus, Commission Internationale des Grands Barrages, Q 58, R 13, p. 235-261.

VECTOR PROJETOS INTEGRADOS S/C LTDA 1991. Túnel de descarga: injeções de impermeabilização, fase 2 - etapa 2, São Paulo. Relatório de Progresso n.º 5, São Paulo.

VECTOR PROJETOS INTEGRADOS S/C LTDA 1992. Tratamento por injeções de cimento: -rea da "rolha", São Paulo. Relatório de progresso n.º 7, São Paulo.

VECTOR PROJETOS INTEGRADOS S/C LTDA 1993. Tratamento por injeções de cimento: -rea da "rolha", São Paulo. Relatório de progresso n.º 8, São Paulo.

YASSUDA, C. T. s.d. Dispositivo de segurança para injeção pelo interior do túnel (Trabalho a ser apresentado no Simpósio sobre o Túnel de Descarga de Pirapora no prelo).



FIGURA 1
SEÇÃO GEOLOGICA - GEOTÉCNICA
LONGO DO EIXO DO TÚNEL

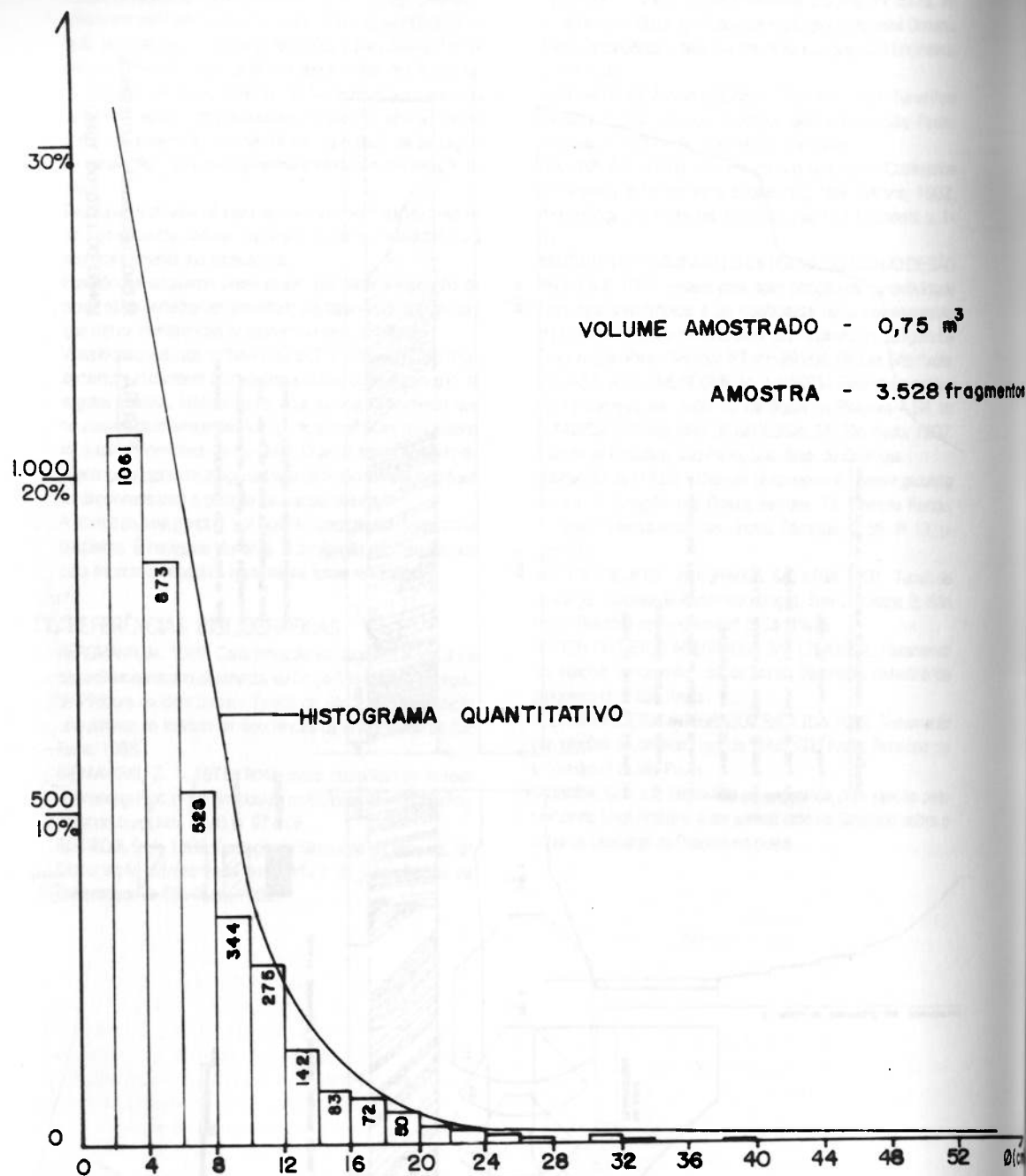


FIGURA II - GRANULOMETRIA DO METAPELITO ALTERADO (A3 E SUBORDINADAMENTE A2) APÓS A DETONAÇÃO DA "ROLHA"

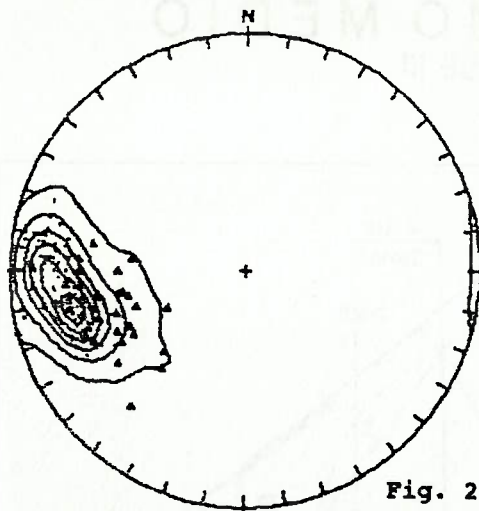


Fig. 2

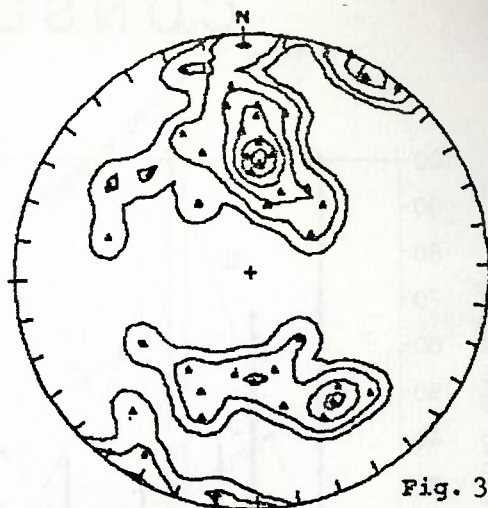


Fig. 3

Fig. 2-Estratificação Reliquiar. 171 polos
Contornos 1;5;10;15;20;25%, Max. 076/64

Fig. 3-Metapelito, fraturas com argila. 48 polos
Contornos 1;2;4;6;8;10%. Max. 186/41

Fig. 4-Metarenito, fraturas com argila. 14 polos
Contornos 1;5;10;15;20%. Max. 204/41

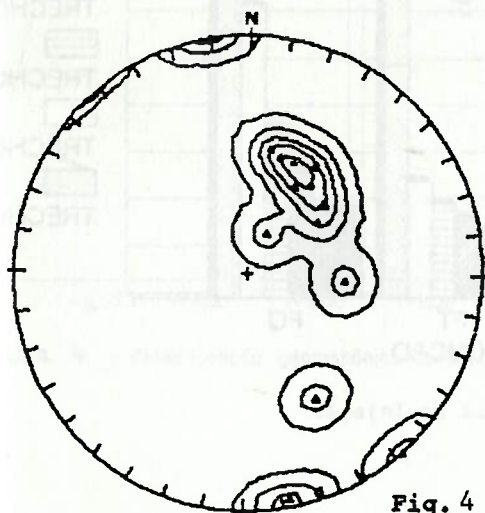


Fig. 4

CONSUMO MEDIO FASE III

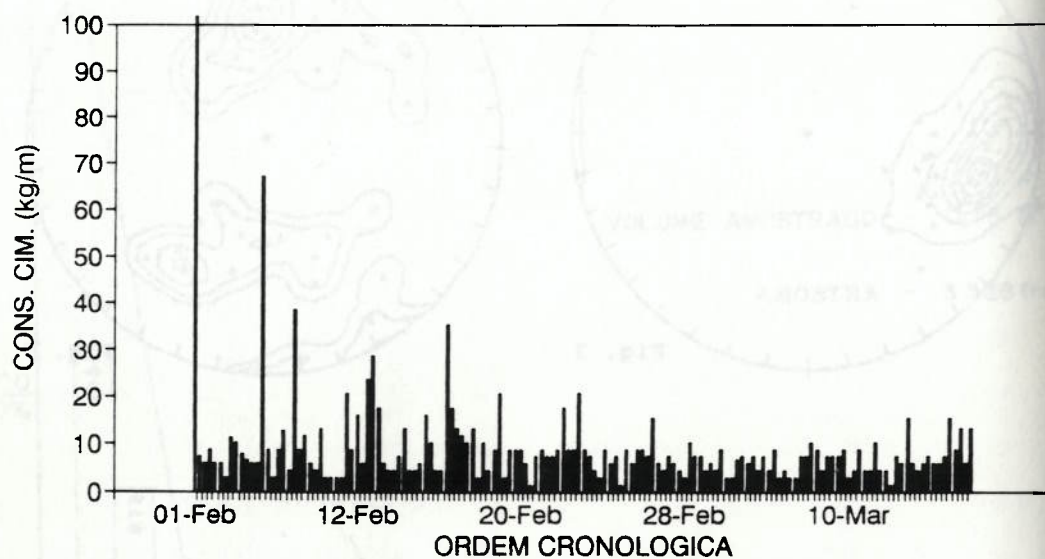


Fig. 7 - Consumo de Cimento x Cronologia de Injeção

PRESSAO OBSERVADA FASE 2 - 3a. ETAPA

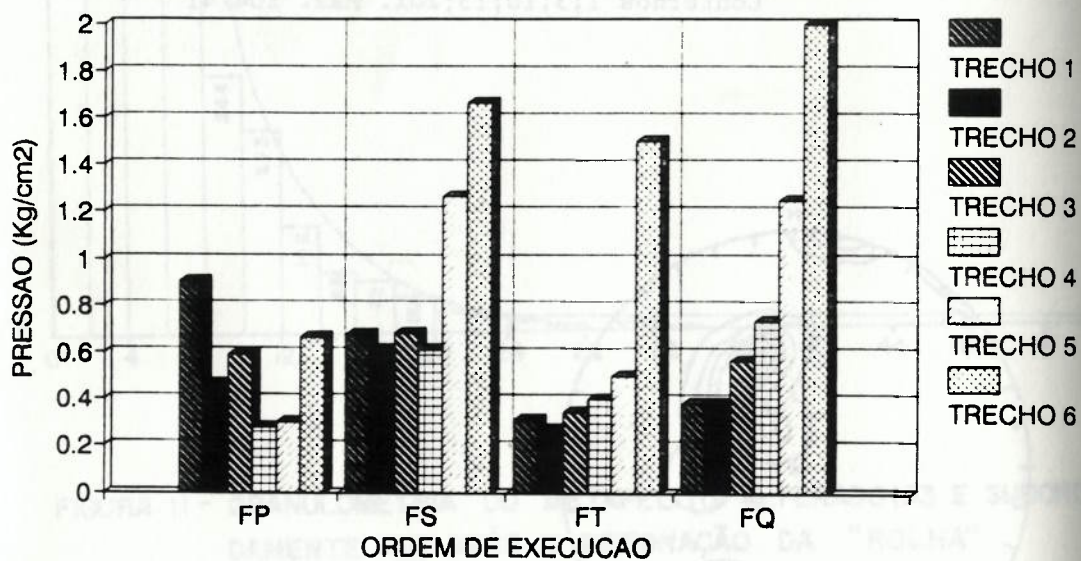


Fig. 8 - Pressão x Cronologia de Injeção

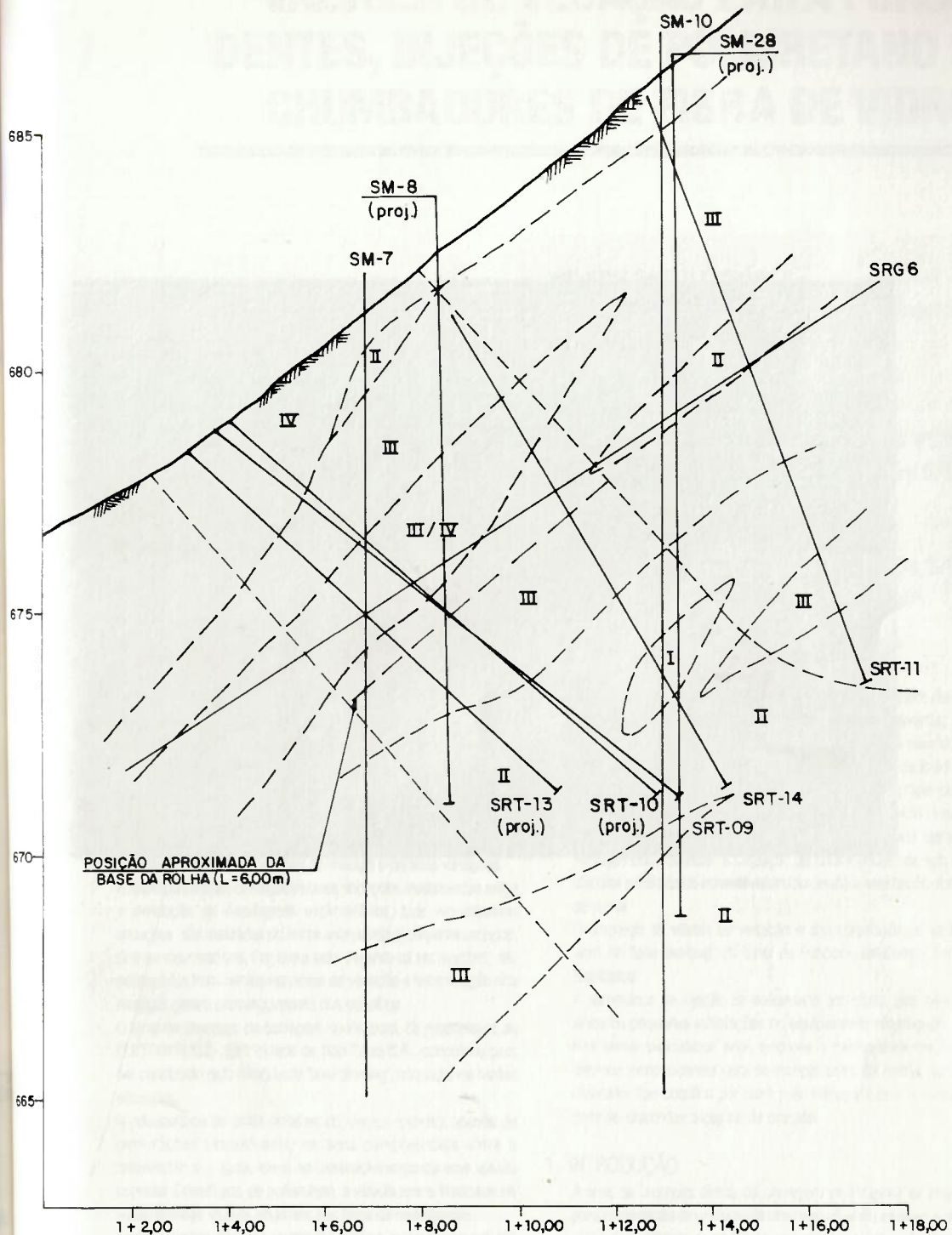


FIGURA 9 - Classificação geomecânica do maciço rochoso em seção ao longo do eixo.

CONSUMO MEDIO

PAGE 11

