

## TÚNEL DA LAGOINHA - MÉTODO CONSTRUTIVO E COMPORTAMENTO OBSERVADO

Antônio Cezer Motta Caleiro  
Construtora Andrade Gutierrez S/A.  
Carlos Augusto Campanhã  
Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda.  
Luiz Guilherme F. S. de Mello  
Victor F. B. de Mello & Associados S/C Ltda.

### RESUMO

O presente trabalho visa descrever o método construtivo e o monitoramento do túnel da Lagoinha, em Belo Horizonte, cujo maciço foi objeto de vários estudos de tratamento devido às suas condições altamente desfavoráveis.

#### 1. MÉTODO CONSTRUTIVO DO TÚNEL - SUA EVOLUÇÃO COM O ANDAMENTO DA OBRA

O túnel da Lagoinha apresenta uma seção transversal em forma de ferradura, com cantos arredondados, altura de 16,70m e largura máxima de 15,80m. Tendo em vista a elevada altura da seção transversal (motivada pela existência de duas pistas de tráfego superpostas), o método construtivo previsto consistiu em escavar a calota e parcializar a escavação do rebaixo em duas fases (rebaixo I e II). O passo de avanço do rebaixo inicialmente utilizado foi de 1,20 a 1,80m, com previsão de chumbadores no maciço entre cambotas, concreto projetado e tela. A calota tem revestimento primário constituído por cambotas metálicas (10"), espaçadas a cada 60cm, e concreto projetado totalizando uma espessura total de 30cm. No trecho em rocha sã, foram empregados tirantes com diâmetro de 1" e comprimento de 4m. O revestimento secundário, em concreto armado, apresenta espessura mínima de 1,00m (no teto).

No trecho inicial a partir do Emboque Sul, foi necessário efetuar tratamento do maciço, nas profundidades iguais ou inferiores à abóbada do túnel, face às condições geotécnicas desfavoráveis encontradas neste local. O tratamento do maciço consistiu de:

a) colunas CCP no trecho inicial, até as proximidades da galeria antiga, para consolidação do material coluvionar ou de aterro antigo lançado, em espessura equivalente a 4m a partir da abóbada do túnel.

b) injeções de cimento, sob volume controlado, do final da galeria antiga até a região em que o teto do túnel encontra rocha sã, consolidando essencialmente o trecho de cobertura em rocha alterada.

c) enfilagem injetada na seção 23 + 10,50 de Norte para Sul, sob o prédio da Rua Araxá, nas proximidades do contato rocha-solo saprolítico. Estas enfilagens foram executadas em 3 linhas, com inclinação de 10°, 23° e 33°; e comprimento variando de 9 a 12m. A injeção foi efetuada sob volume controlado, em 3 fases (100, 50 e 50 litros por válvula manete nas fases 1, 2 e 3).

d) tirantes de diâmetro 1" e comprimento de 4m, no trecho escavado em rocha, executados no meio do vão entre cambotas na abertura da abóbada do túnel.

O método construtivo empregado na escavação do rebaixo para completar a meia-seção a partir do emboque Sul, pode ser descrito, resumidamente, pelas seguintes fases (Fig.1):

- escavação a fogo do rebaixo
- complementação das cambotas
- execução do revestimento primário de concreto

Ou seja, escava-se um volume relativamente grande do maciço, e o suporte é colocado após um intervalo de tempo "elevado", condicionado pela necessidade de complementar as cambotas da calota.

A aceleração dos recalques observados (a partir da 2a. quinzena de janeiro) estaria associada à escavação deste rebaixo, efetuado de acordo com o perfil geológico dis-

ponível, em saprolito a rocha pouco alterada.

Com a aceleração de recalques observada na 2a. quinzena de janeiro de 1986, discutiu-se a hipótese de subfundar as edificações próximas ao emboque Sul, de forma a evitar trincas e eventuais danos estruturais. Porém, a alternativa de subfundação possui diversos inconvenientes, entre os quais se destacam os seguintes:

- a relação benefício-custo não seria compensadora (a redução de recalques da estrutura - já diminutos - seria muito pequena e o custo envolvido elevado).
- com a calota do túnel já executada, a eficiência da subfundação como meio de reduzir os recalques estaria bastante reduzida (a maior parte destes já teria ocorrido).
- os serviços de subfundação, durante sua execução, também geram recalques. A subfundação não permitiria garantir recalques inferiores aos já lidos, cuja magnitude é pequena.

Com base nas interpretações rotineiras de comportamento propôs-se em fim de janeiro de 1986 adotar algumas medidas para otimizar o método construtivo, a saber:

- redução do passo de avanço de bancada.
- escavação do rebaixo iniciando-se pela valeta central.
- escavação da lateral da bancada com fogo cuidadoso evitando-se descalçar o pé da cambota.
- escavação e colocação cuidadosa do complemento das cambotas aonde possível.

Nos locais em rocha não se dispensou o prolongamento das cambotas.

Na lateral do rebaixo aplica-se tirantes, procreto e tela para evitar possíveis deslocamentos e minimizar a convergência da escavação (Fig.1).

Estas medidas refletiram-se de imediato no desempenho da obra, já que os resultados de instrumentação passaram a indicar reduções consideráveis na velocidade dos recalques induzidos pela escavação. Em alguns instrumentos, as leituras tenderam inclusive para a estabilização.

## 2. COMPORTAMENTO DA OBRA DURANTE A ESCAVAÇÃO PROPRIAMENTE DITA

Conforme pode ser visualizado na locação da instrumentação (Fig.2), a interpretação do processo executivo do túnel e suas conseqüências tanto na escavação propriamente dita quanto nos prédios lindeiros ateu-se principalmente ao trecho entre estacas 20 + 8,0 a 24 + 15,0.

Várias edificações de porte médio, algumas recentes e outras mais antigas se situam na região lindeira ao eixo da escavação e foram instrumentadas.

### 2.1. Interpretação da instrumentação instalada no maciço

Nas figuras 3 a 9 encontram-se plotados gráficos de recalques medidos ao longo do tempo nos marcos superficiais e tassômetros existentes nas proximidades do emboque Sul e dos prédios mencionados.

Nesses gráficos nota-se um súbito acréscimo dos recalques a partir de meados de janeiro de 1986, que vieram a se desacelerar ou até se estabilizar no começo de fevereiro. Confrontando-se este comportamento com os principais eventos de execução do túnel que poderiam ter induzido tais recalques (Fig.10), verifica-se que nem as injeções de tratamento do maciço nem o rebaixamento do nível d'água (com suas variações observadas) ocorrem simultaneamente aos recalques. Nota-se, porém, que a evolução dos recalques está intimamente ligada à escavação dos rebaixos do túnel a partir do emboque Sul. Tal explanação de ligação causa-e-efeito nos parece suficiente para justificar o comportamento observado.

Cumpre notar que os maiores recalques do maciço foram observados nos instrumentos instalados nas proximidades da estaca 22, embora a menor cobertura de solo encontra-se mais ao Sul, nas proximidades da estaca 20. O fato de ter ocorrido maior recalque numa região de maior cobertura, seria explicado pelo tipo de material que constitui a cobertura. Enquanto entre as estacas 19 + 16m e 21 + 4m o tratamento do maciço foi feito através de colunas CCP, a partir desta última seção o tratamento passou a ser feito com injeção de cimento-bentonita. Na região em que termina a galeria antiga, nas proximidades da estaca 22, o maciço encontra-se num estado pouco consolidado, apresentando a incorporação de um grande volume de entulho, de madeira proveniente do escoramento da galeria antiga, etc. Estas características do maciço, que resultam em um grande volume de vazios e elevada compressibilidade, aliado ao fato da injeção de tratamento ter sido efetuada sob volume controlado, teriam potencialmente contribuído para reduzir a eficiência do tratamento por injeções neste trecho. Ambos tratamentos se

demonstraram eficientes; aquele realizado com colunas CCP gerou menores deformações do maciço, mesmo em região com pequenas coberturas e material de botafora pouco consolidado.

## 2.2. Interpretação da instrumentação instalada nas estruturas

A instrumentação nas estruturas consiste predominantemente de pinos de recalque colocado em ambos prédios, e na calçada e muro da Rua Ubá. Foram medidos apenas os deslocamentos verticais desses pinos.

No prédio da Rua Araxá existem pinos colocados em ambos os lados das juntas de dilatação.

A figura 11 apresenta as leituras de recalques para pinos do prédio da Rua Araxá. Estes pinos situam-se na face deste prédio mais próxima ao emboque Sul. A figura 12 apresenta as leituras de recalques para pinos, na face oposta ao emboque Sul. A figura 13 apresenta as leituras de recalques para pinos do prédio da Rua Ubá. Estes pinos estão colocados na face adjacente ao túnel, e encontram-se instalados no passeio (P2A, P3A e P4A) e nos pilares do prédio (P3 e P4).

Conforme se pode perceber pelo confronto entre os recalques medidos no maciço, através dos marcos superficiais e tassômetros e aqueles medidos nas estruturas através dos pinos, estes apresentam valores significativamente menores. Tal fato se justifica, uma vez que o comportamento do maciço é condicionado por variações volumétricas do solo o qual, conforme já visto, seria bastante compressível acima da camada de saprolito, enquanto que as estruturas estão apoiadas, através dos tubulões, no próprio solo saprolítico, não sofrendo, portanto, com a compressão da camada sobrejacente.

No prédio da Rua Ubá os recalques medidos variaram entre 11 e 18mm aproximadamente. Este incremento de recalques, não causou nenhum dano estrutural aparente, exceto por uma fissura capilar em uma das lajes.

No que se refere ao prédio da Rua Araxá, os recalques variam de 6 (P12) a 14mm (P9), aproximadamente, na face adjacente ao emboque Sul, e 0 a 2mm oposta a este emboque.

As oscilações verificadas nas leituras destes tipos, tanto para este prédio como para o prédio da Rua Ubá, deve-se provavelmente a efeitos de variação de temperatura, ajuste da mira, tolerância na precisão dos instrumentos, etc., e podem ser considerados normais.

Considerando-se que a largura do prédio da Rua Araxá é da ordem de 18m, o recalque diferencial específico máximo correspondente a estes valores seria de 1:1000. Este valor de recalques diferencial específico máximo é reconhecidamente insuficiente para causar danos estruturais no edifício.

Desconhecemos se a estrutura em questão já apresentava, anteriormente ao início da execução do túnel, problemas de comportamento materializados em fissuramentos. Cumpre lembrar que todos os recalques medidos são incrementais, isto é, refletem apenas as movimentações ocorridas após instalações dos instrumentos.

Analisando-se a evolução dos recalques vê-se que, para os pinos de face adjacente ao emboque Sul, houve uma tendência de aceleração de recalques na 2a. quinzena de janeiro, ao passo que em fevereiro a tendência foi de redução na velocidade de recalque e eventual estabilização.

Estes resultados estão coerentes com a alteração do método construtivo para o rebaixo.

Em comparação à instrumentação instalada no maciço, observam-se as seguintes distorções nos padrões de comportamento:

a) a ordem de grandeza dos deslocamentos é menor nas estruturas (aprox. 14mm de recalque máximo nos pinos do prédio da Rua Araxá, contra 23mm do marco superficial M22).

b) os recalques nesta edificação não apresentam tendências tão acentuadas de aceleração na 2a. quinzena de janeiro.

Ambos os efeitos acima, conforme já mencionado, devem-se ao fato de a estrutura do prédio da Rua Araxá ter suas fundações assentes a grande profundidade, em solo saprolítico mais rígido e consistente do que o aterro de entulho sobrejacente, sofrendo assim menor influência das deformações de maciço.

A figura 9 apresenta algumas características de interesse:

- a aceleração de recalques a partir da 2a. quinzena de janeiro de 1986 (início da escavação do rebaixo a partir do emboque Sul).

- redução da velocidade de recalques e tendências de estabilização a partir de fevereiro de 1986.

- inexistência de atenuação de recalques do teto do túnel para a superfície (as leituras dos instrumentos T9, T10 e M22 são praticamente iguais).

A inexistência de atenuação de recalques pode ser melhor compreendida considerando-se que o aterro existente na estaca 23 é constituído de material não-consolidado e entulho. As deformações induzidas pela escavação do túnel provocam variações volumétricas consideráveis no material de cobertura, o que tende a aumentar os recalques observados no maciço. Estes recalques devidos a variações volumétricas tendem a igualar as leituras dos instrumentos situados ao longo da profundidade.

#### CONCLUSÃO

As adaptações introduzidas no método construtivo mostraram-se eficientes para oferecer a necessária segurança à Obra, demonstrando o valor de uma instrumentação bem acompanhada e interpretada. Espera-se que os dados aqui apresentados venham a ser utilizados para comparações com obras semelhantes.

#### AGRADECIMENTOS

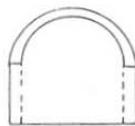
Os autores agradecem à equipe técnica da Proprietária, à equipe da Construtora Andrade Gutierrez S/A., na pessoa dos Eng<sup>os</sup>. Rogério Nora de Sá e Sérgio Quintanilha e aos Eng<sup>os</sup>. Eduardo do Val, Roberto Kochen e Maria Regina Cintra pelo apoio rotineiro à Obra. O sucesso obtido deveu-se em grande parte ao espírito cooperativo dessas pessoas.

#### BIBLIOGRAFIA

- CALEIRO, A.C.M., CAMPANHÃ, C.A. e DE MELLO, L.G.F.S. - 1986 - "Túnel da Lagoinha - Método Construtivo e Comportamento Observado", - 6<sup>o</sup> COBRAMSEF, Porto Alegre.
- CAMPANHÃ, C.A. - 1982. Tratamento de maciços por injeção - Anais do Simpósio sobre Escavações Subterrâneas - ABGE, Rio de Janeiro.
- DE MELLO, V.F.B. - 1981. Proposed Bases for Collating Experiences for Urban Tunelling Design - Symposium on Tunelling and Deep Excavations in Soils - ABMS, São Paulo.
- Relatórios internos elaborados pela Consultoria para a Construtora e Proprietária.



Escavação do rebaixo

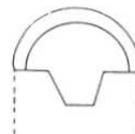


Complementação das Cambotas e Procreto

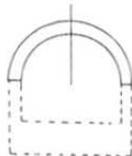
#### A) Metodologia Inicialmente Prevista



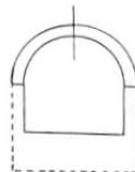
Escavação do Rebaixo com maior parcialização



Escavação da Valeta Central



Escavação da Lateral com fogo cuidadoso



Tirantes de Procreto e Tela para Garantir a Estabilidade das Paredes Laterais

#### B) Metodologia Revista

Fig. 1

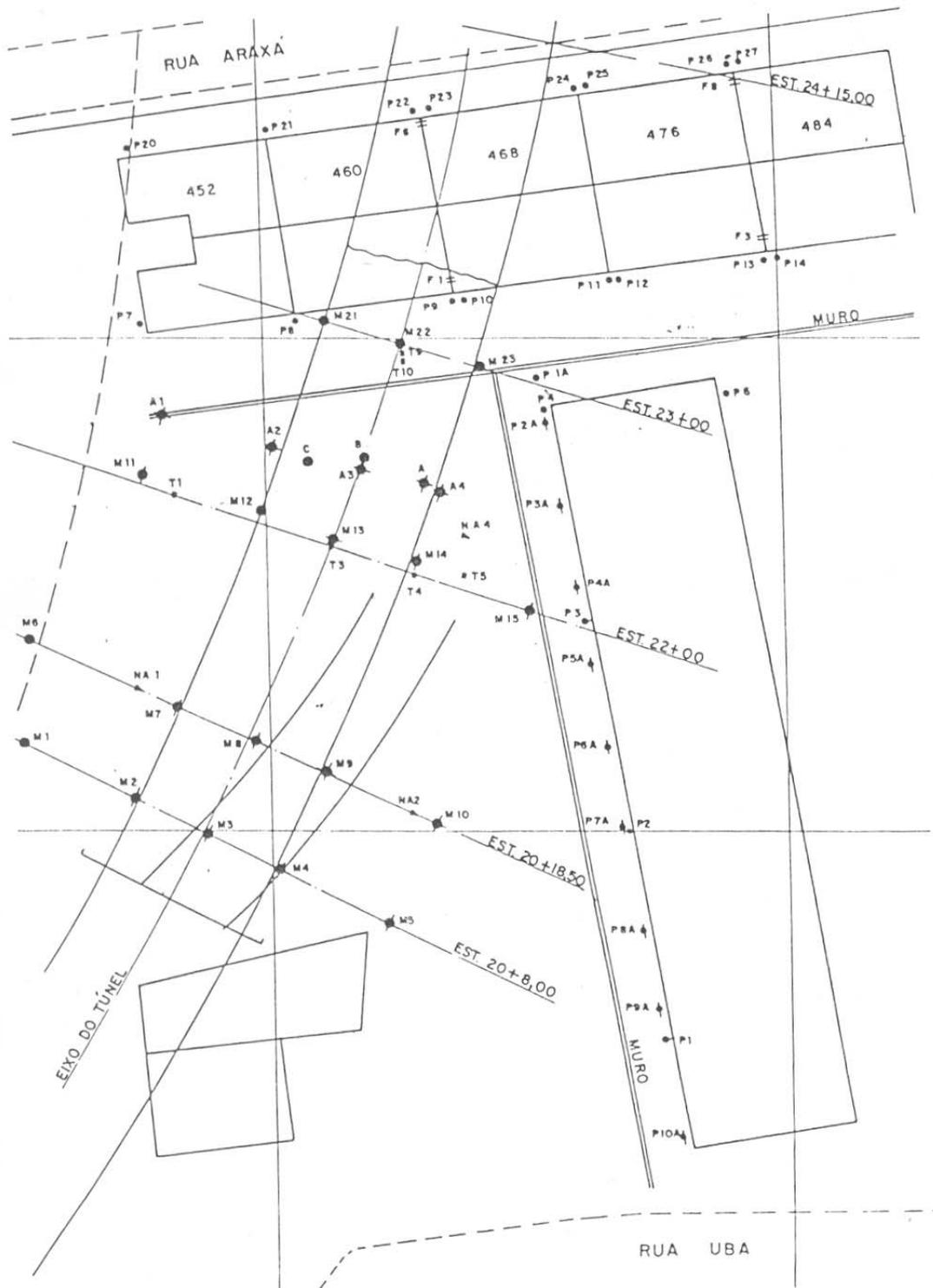


FIG 2 - LOCAÇÃO INSTRUMENTAÇÃO

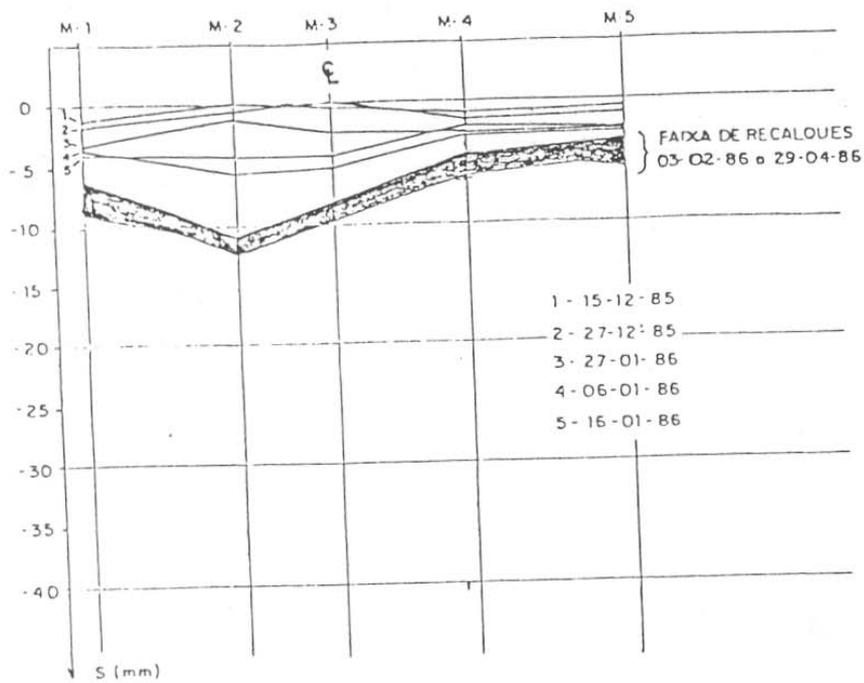


FIG. 3 - MARCOS SUPERFICIAIS - EST. 20 + 8,0

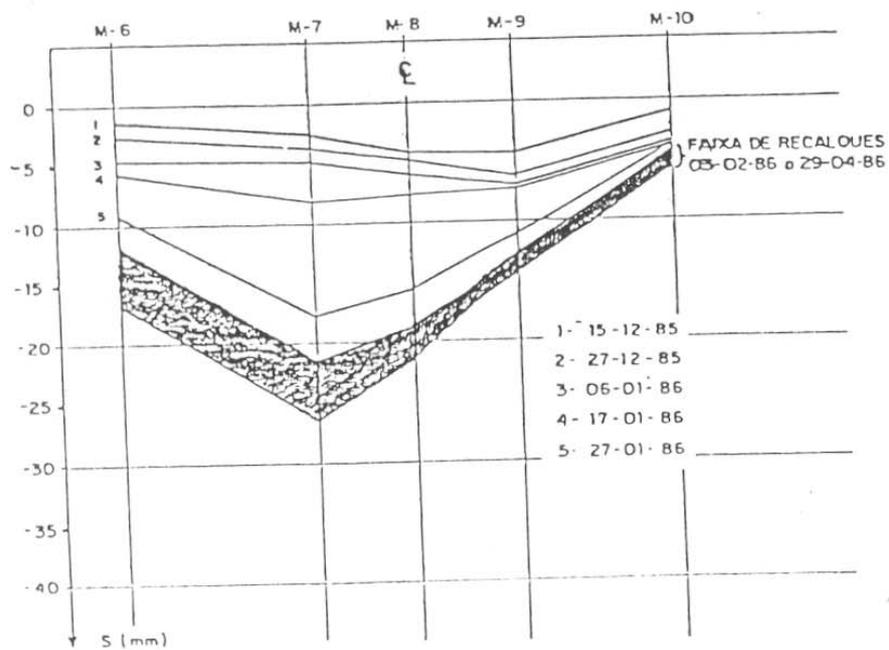


FIG. 4 - MARCOS SUPERFICIAIS - EST. 20 + 18,5

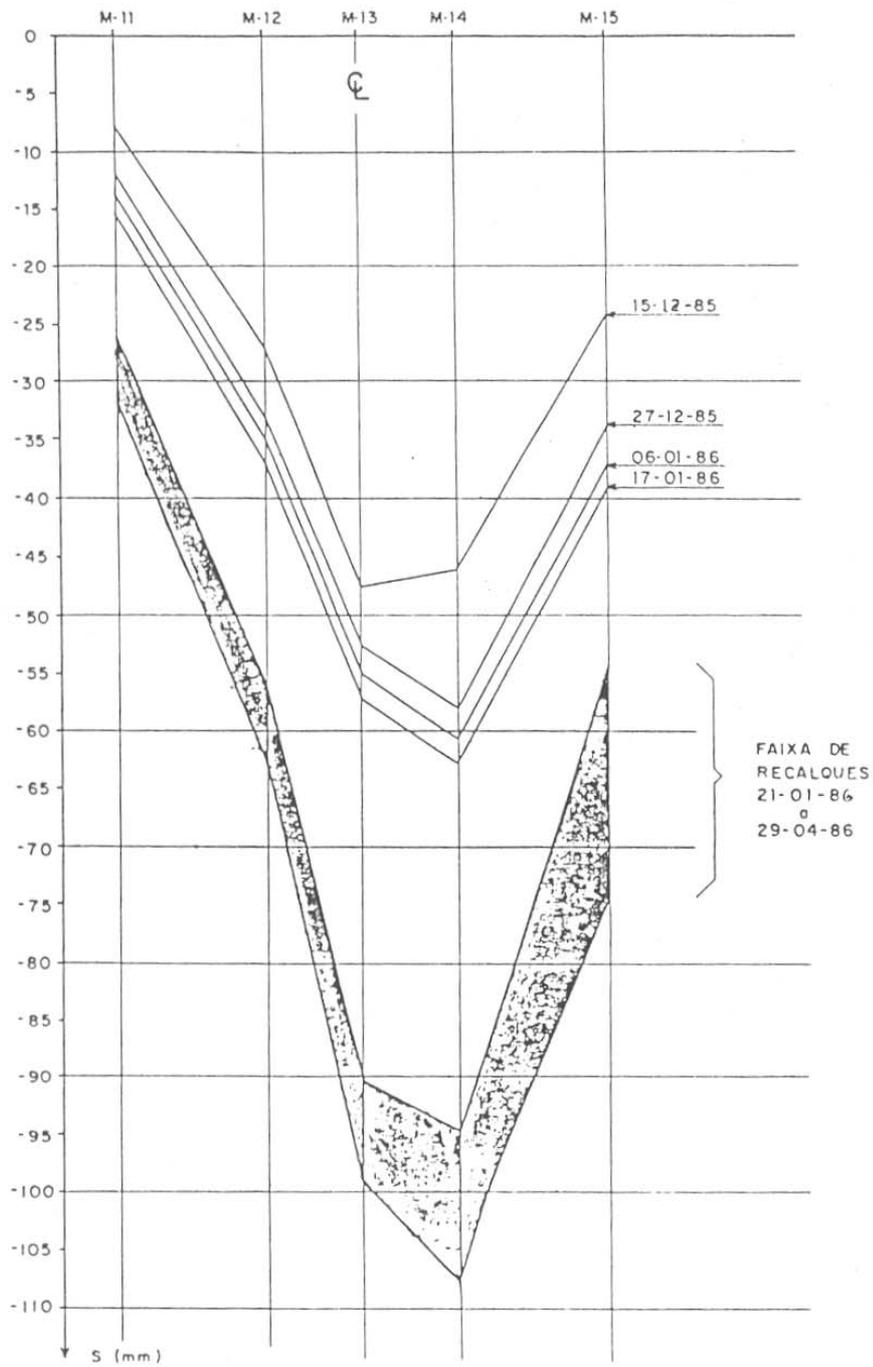


FIG. 5 - MARCOS SUPERFICIAIS - EST. 22+00

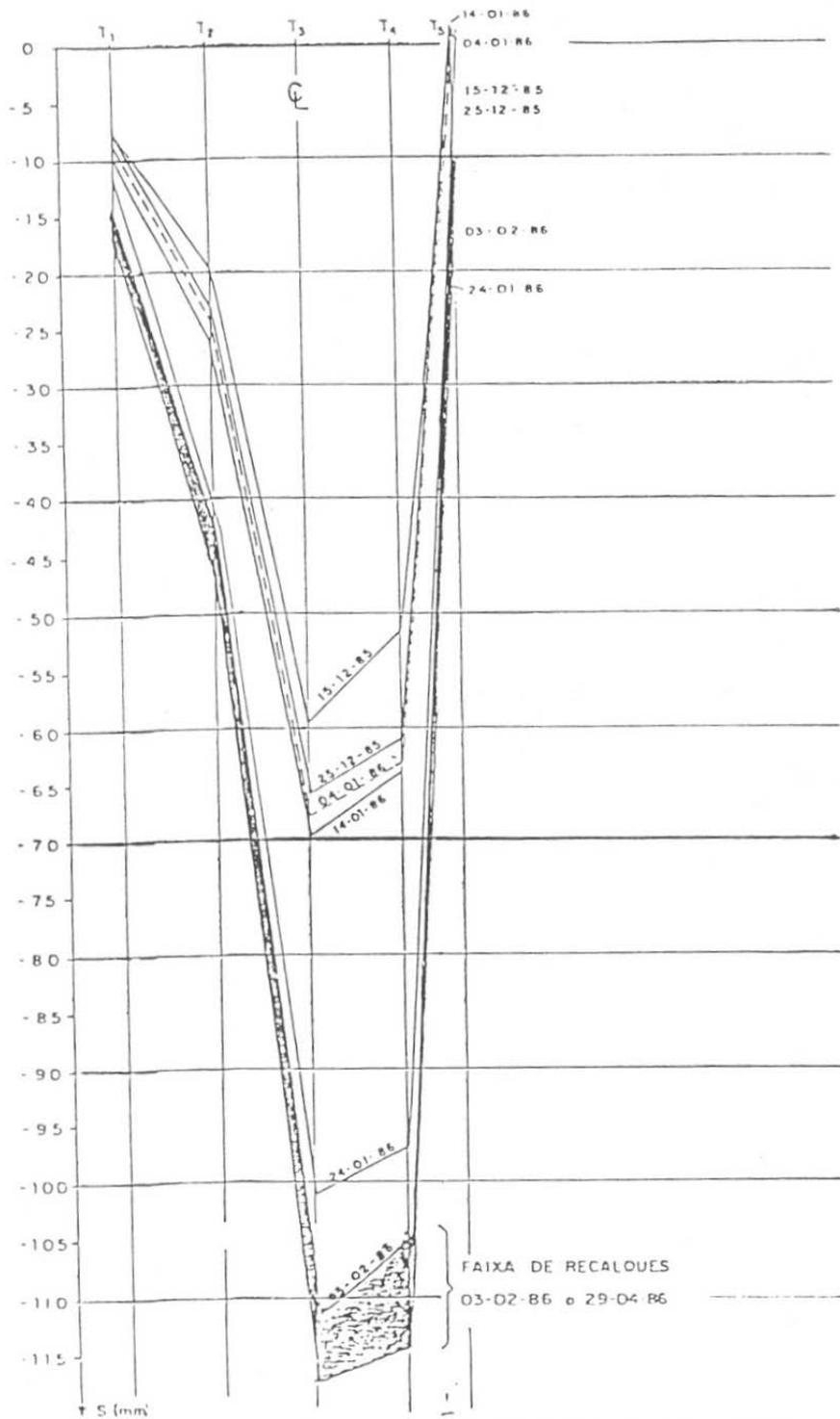


FIG. 6 - TASSÔMETROS - EST. 22+00

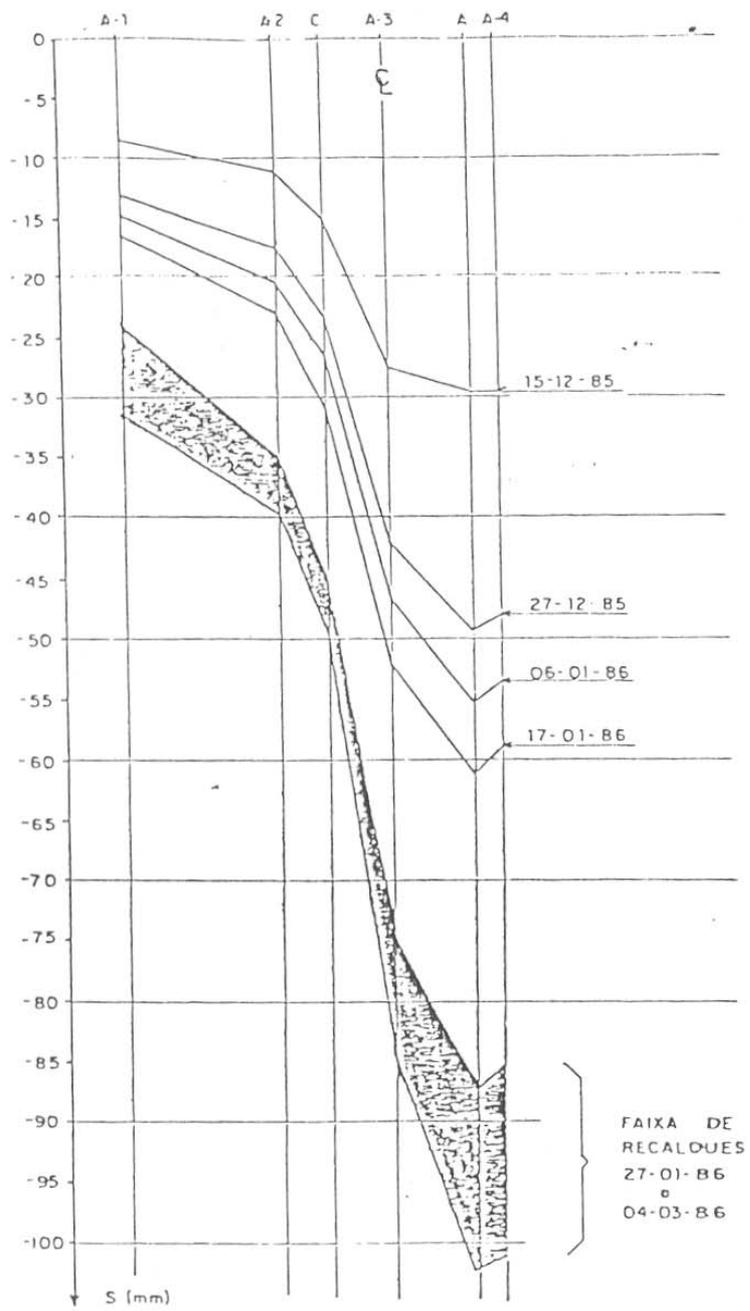


FIG. 7 - MARCOS SUPERFICIAIS - EST. 22 + 8,0

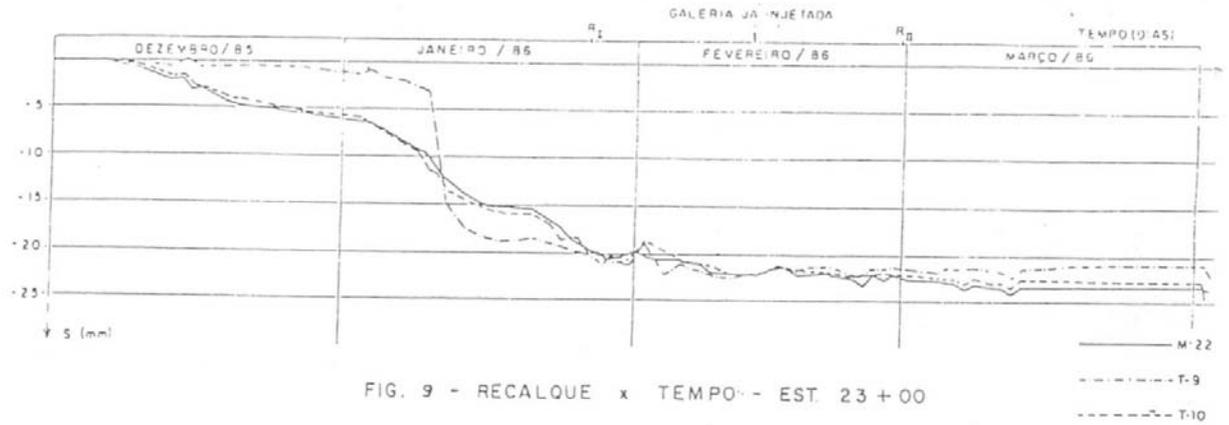


FIG. 9 - RECALQUE x TEMPO - EST. 23+00

196

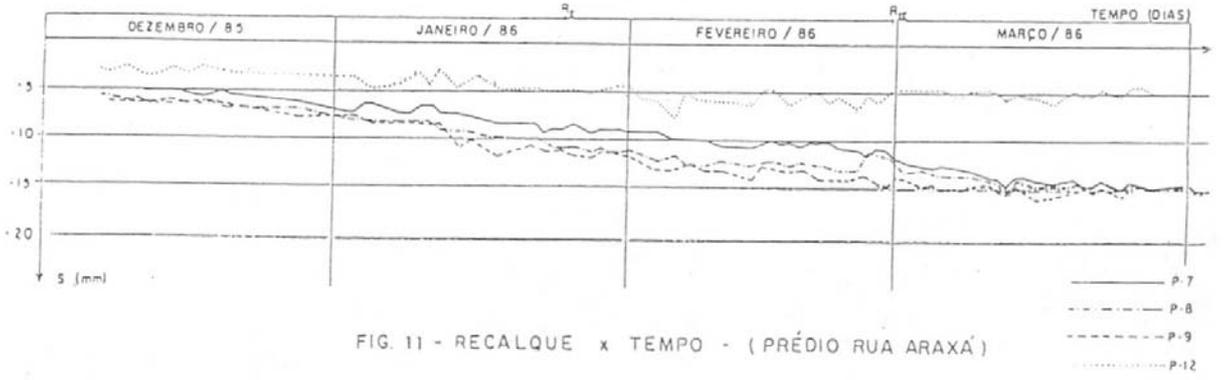


FIG. 11 - RECALQUE x TEMPO - (PRÉDIO RUA ARAXÁ)

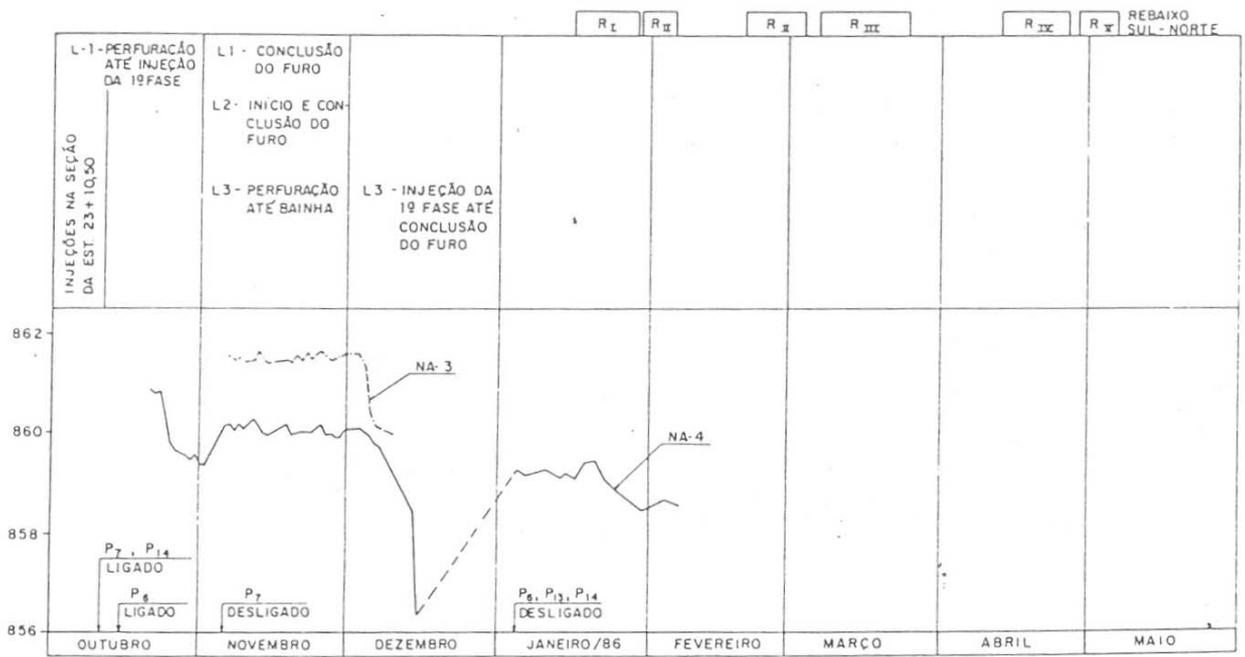


FIG. 10 - SINTESE DOS EVENTOS DE ESCAVAÇÃO

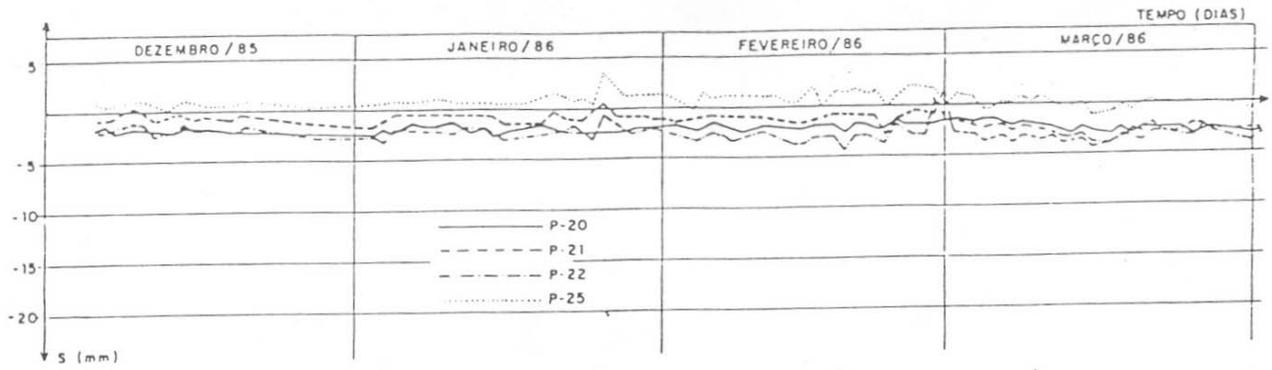


FIG. 12 - RECALQUE x TEMPO - (PRÉDIO RUA ARAXÁ)

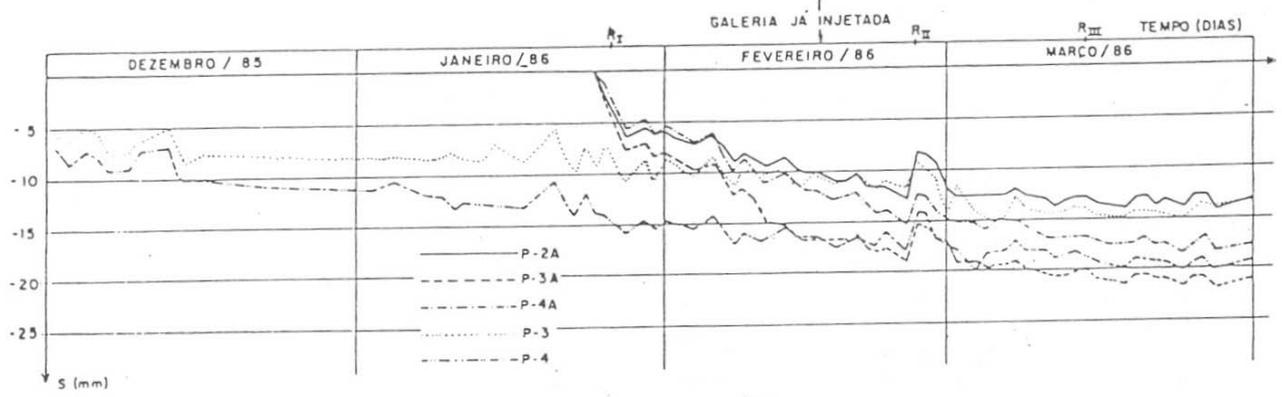


FIG. 13 - RECALQUE x TEMPO - (PRÉDIO RUA ARAXÁ)