

APLICAÇÃO DO MÉTODO OBSERVACIONAL À CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS EM ROCHA *

The observational method applied to the construction of road tunnels in rock

RAÚL SARRA PISTONE**

ANTÓNIO PINTO DA CUNHA***

RESUMO - Nos últimos cinco anos foram construídos em Portugal diversos túneis rodoviários, tendo os autores desta comunicação estado envolvidos nos estudos geológicos e geotécnicos e no projecto e acompanhamento da sua construção. Nesta comunicação são destacados os casos dos Túneis da Gardunha, no IP2, e da Régua e do Varosa no IP3, escavados em maciços rochosos com diferentes litologias e diferentes graus de alteração e de fracturação. Os túneis foram construídos utilizando o Método Observacional, a partir de Anteprojectos Detalhados, contendo metodologias, especificações, medições e orçamentos que permitiram o lançamento dos concursos.

SYNOPSIS - During the last five years several road tunnels have been constructed in Portugal. The authors were involved in the geological and geotechnical studies, and in the design and monitoring of the construction. Those tunnels were excavated using the observational method, starting from a basic design including general specifications and bill of quantities, prepared for the invitation to tender. As selected case histories, the IP2-Gardunha and IP3-Régua and Varosa tunnels are focused in this paper, all of them excavated in rock masses with different lithologies, weathering and fracturing degrees.

1 - INTRODUÇÃO

O Método Observacional tem por base necessidade de se dispor de informação segura para a definição do projecto, a qual, no caso particular dos túneis, a maioria das vezes apenas pode ser obtida na fase de construção. Transcrevendo Terzaghi: “Na engenharia de certos tipos de obras tais como (...) Túneis (...) muitas variáveis mantêm-se desconhecidas. Consequentemente, os resultados dos cálculos não são mais do que hipóteses de trabalho, a serem confirmados ou alterados durante a construção” (Peck, 1969).

Os projectos dos túneis abordados nesta comunicação foram elaborados ao nível de anteprojecto detalhado, não se tratando, por isso, de projectos definitivos para construção, mas antes de projectos preliminares, incluindo medições, orçamentos e especificações, que completam as peças contratuais e permitem o lançamento das empreitadas.

Em todos os casos, foi feita uma prospecção do terreno com vista a definir o zonamento geotécnico do maciço rochoso, identificando em cada zona o método de construção e o suporte primário a aplicar.

* Comunicação apresentada ao 8º Congresso da Associação Internacional de Geologia de Engenharia, Vancouver, 1998.

** COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa

*** LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

Com o zonamento geotécnico foram definidas para cada zona as condições médias mais prováveis, e as singularidades desfavoráveis detectadas foram descritas e representadas nos perfis longitudinais e transversais dos túneis.

Os suportes primário e definitivo foram projectados utilizando métodos empíricos e numéricos, tendo em conta as diferentes características das várias zonas geotécnicas.

Previram-se várias soluções para os cenários mais prováveis, considerando as condições médias estabelecidas para as diversas zonas geotécnicas. Situações extremas foram também modeladas com vista a aquilatar da necessidade de aplicar tratamentos especiais ao terreno durante a escavação.

No âmbito do método observacional preconizado foram previamente definidas, no projecto, as grandezas a medir durante a construção, o método de observação a prosseguir e os critérios de alarme a aplicar tendo, em alguns casos, sido implementada instrumentação adicional durante as obras.

As medições foram feitas de forma sistemática e por equipas especializadas e os resultados interpretados de imediato para que eventuais intervenções pudessem ser implementadas atempadamente e de modo eficiente.

Deve notar-se que o Método Observacional apenas pode ser aplicado se for possível introduzir alterações ao projecto base durante a construção. Tais alterações devem ser consideradas como consequências lógicas, e não deficiências, do Método Observacional. Esta é a razão porque o projecto de execução só é completado em obra durante a construção.

Nos casos versados neste trabalho foram feitas, saudavelmente, algumas alterações ao projecto com vista à sua adequação às situações reais. Tais decisões foram sempre tomadas, por consenso, por uma equipa de técnicos dos diferentes intervenientes no empreendimento: o Dono da Obra (Junta Autónoma de Estradas), o projectista (COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente), o consultor técnico do Dono da Obra (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e os empreiteiros (Teixeira Duarte-EPOS para o túnel da Gardunha I e Somague-Adriano-MSF-EPOS, para os túneis da Régua e do Varosa).

Diversas vantagens adicionais do Método Observacional, já assinaladas, aliás, por Powderham (1994), foram constatadas pelos autores durante a construção, nomeadamente:

- . Maior ligação entre o projecto e a construção
- . Maior segurança durante a construção
- . Melhor entendimento da interacção solo-estrutura
- . Melhor utilização e performance da instrumentação
- . Registos de obra com mais e melhores dados
- . Maior motivação e consenso dos intervenientes na obra.

2 - TÚNEL DA GARDUNHA I (IP2)

O túnel da Gardunha I é uma galeria bi-direccional com cerca de 1600 m de comprimento e uma secção com área média de cerca de 84 m², escavada em formações graníticas e xistosas, com um recobrimento máximo de 220 m. O túnel está localizado entre a cidade de Fundão e Alpedrinha, na região da Beira Interior, estando integrado no IP2.

2.1 - Prospeccção geotécnica

Partindo do emboquilhamento norte, o túnel atravessa zonas graníticas, gneisses anfibolíticos, gneisses migmatíticos e de novo granitos até ao emboquilhamento sul. A profundidade de alteração da rocha é de cerca de 50 m, afectando sobretudo os

emboquilhamentos, construídos em saprólito, ou seja, um solo residual granítico, incluindo blocos de rocha com formas arredondadas distribuídos aleatoriamente.

Após um reconhecimento geológico detalhado da superfície, especificou-se um programa de prospecção geotécnica incluindo perfis sísmicos na zona dos emboquilhamentos, com vista a avaliar a profundidade da rocha alterada; furos de sondagens (802 m de comprimento total); ensaios *in situ*, nomeadamente absorção de água e dilatometria; ensaios em laboratório.

As amostras de rocha foram primeiramente classificadas em termos de litologia, grau de alteração e de fracturação. Esta primeira abordagem permitiu o zonamento preliminar do maciço rochoso.

De seguida foram realizados ensaios de dilatómetro e de absorção de água para caracterização da deformabilidade *in situ* e do comportamento hidrogeológico do maciço rochoso, respectivamente. Nessa zona, as águas subterrâneas são consideradas de muito boa qualidade e um recurso natural muito importante para os seus habitantes.

Os parâmetros geomecânicos foram correlacionados principalmente com o grau de meteorização e de fracturação (categorias *W* e *F* da classificação da SIMR), com vista a estabelecer critérios sólidos de avaliação “*in situ*” das condições do terreno durante a construção (Fig. 1).

Esta abordagem final permitiu ajustar o modelo anterior e a definição do Zonamento Geotécnico considerado no desenvolvimento do projecto.

Assim foram definidas três zonas geotécnicas associadas aos seguintes índices médios RMR da classificação de Bieniawski:

ZG1 (rocha boa): RMR: 74

ZG2 (rocha razoável): RMR: 50

ZG3 (rocha fraca): RMR: 33

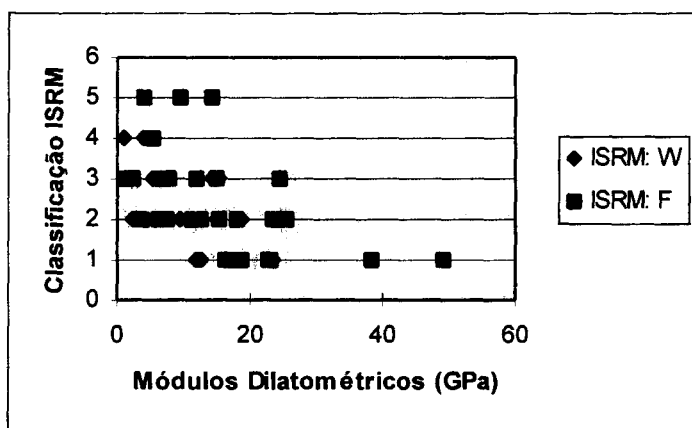


Figura 1 - Túnel da Gardunha I. Resultados dos ensaios de dilatómetro relacionados com os graus de meteorização e de fracturação do maciço rochoso.

2.2 - Projecto do suporte primário

O projecto base previa diferentes tipos de suporte primário, em função das características geotécnicas do maciço rochoso, definidas a partir de métodos empíricos de dimensionamento

(classificações geomecânicas) e de modelos numéricos, incluindo análises de interacção rocha-suporte e modelos de elementos finitos e de fronteira (Sarra Pistone e Oliveira, 1995).

O método de escavação e o suporte primário definidos naquele documento para cada zona geotécnica são os que, de forma resumida se apresentam seguidamente:

- ZG1: Rocha boa, granito ou migmatite são
Escavação em secção total ou em meia secção
Pregagens localizadas e betão projectado (5 cm).
- ZG2: Rocha de qualidade intermédia, alterada e fracturada
Duas fases de escavação: calote e destroça
Pregagens sistemáticas com 4 m, espaçadas de 1,5 m
Betão projectado reforçado com malha electro-soldada ou fibras de aço, com 15 cm de espessura
- ZG3: Rocha fraca e solo residual
Cambotas de aço HEB 180, distanciadas de 1,0m e betão projectado reforçado com malha metálica, com 20 cm de espessura.

Durante a construção, as metodologias de colocação do suporte primário e de escavação foram algumas vezes modificadas, sempre de forma consensual por uma equipa de engenheiros das diferentes entidades envolvidas no empreendimento, como se mencionou anteriormente, no sentido de as adaptar às condições reais da obra, reveladas pela escavação.

2.3 - Construção

O avanço do túnel nas zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 foi realizado sem problemas significativos com recurso ao método tradicional de escavação a fogo em duas fases: calota e destroça. A média de escavação foi de cerca de 3,5 m/dia, em meia secção, utilizando pregos tipo Swellex e betão projectado reforçado com fibra de aço, com 5 cm e 15 cm de espessura, nas zonas ZG1 e ZG2, respectivamente.

As maiores dificuldades de construção surgiram, todavia, na zona ZG3, sobretudo no emboquilhamento norte. A construção do túnel iniciou-se exactamente no meio de um vale tectónico, pelo que para o início da escavação teve que se desviar uma linha de água sazonal através da construção de canais em betão, câmaras de dissipação e outras estruturas hidráulicas.

Apesar disso, os primeiros 200 m do túnel tiveram que ser escavados em saprólito saturado com muito baixa resistência e alta deformabilidade. Para caracterização do maciço rochoso de muito baixa resistência, comportando-se mais como um solo residual onde, de forma espaçada e aleatória, algumas diaclases remanescentes constituíam outras tantas superfícies de rotura, realizaram-se ensaios triaxiais com base em amostras obtidas de blocos prismáticos indeformados que permitiram adoptar os seguintes parâmetros mecânicos no projecto de execução: $\phi' = 30^\circ$; $C' = 0$; $E_d = 50$ MPa.

Nesta zona geotécnica muito difícil o suporte primário consistiu em cambotas metálicas espaçadas de 1,0 m a 0,3 m e em betão projectado com malha electro-soldada, com 0,20 m de espessura. As paredes laterais também foram reforçadas com pregagens injectadas com 10 m de comprimento, instaladas em quatro filas ao longo do túnel, a fim de fazer face à pressão do terreno lateral, que era maior do que se previa, como se evidenciou pelos grandes deslocamentos horizontais da secção do túnel. Utilizou-se sistematicamente uma estrutura de

micro-estacas perimetrais, recorrendo a tubos metálicos com 12 m de comprimento (Fig. 2), para garantir a protecção dos avanços.



Figura 2. Suporte primário instalado na zona ZG3.

Realizaram-se ensaios *in situ* de arranque de pregagens para definir a sua resistência e rigidez. O programa de ensaios consistiu no arranque axial das barras instaladas nas paredes do túnel, utilizando macacos anelares (Figura 3). As pesagens ensaiadas tinham comprimentos diferenciados, para permitir obter informação sobre o comportamento do sistema em função da variação das condições de confinamento do terreno em redor do túnel.

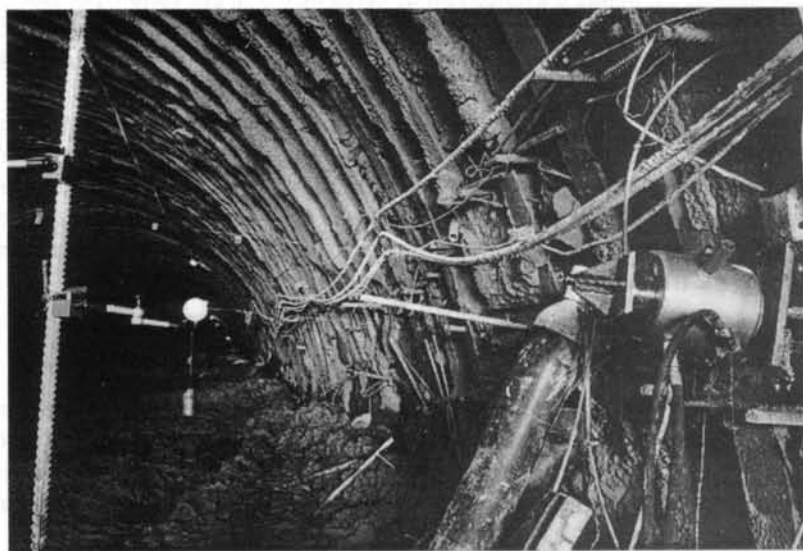


Figura 3. Ensaio de arranque de pregagens no interior do túnel.

Dadas as precárias características do maciço e a dificuldade de manutenção da estabilidade das secções o túnel foi escavado em 4 ou 5 fases: duas galerias laterais, com paredes

diafragmas e um pilar central para suportar a abóbada e a frente de avanço (Fig. 4), seguida da escavação da destroça com 3 m de profundidade, executada em uma ou duas fases.

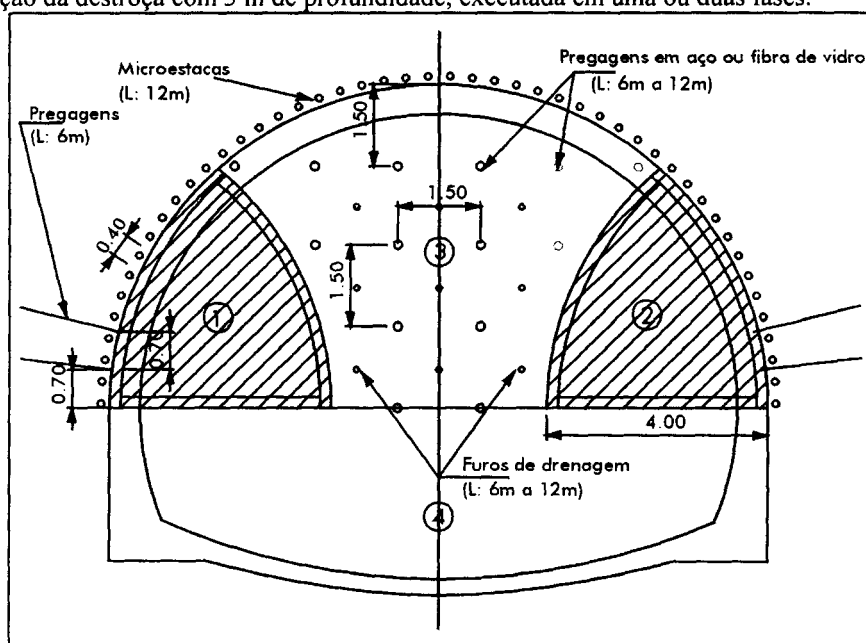


Figura 4. Túnel da Gardunha I. Fases de escavação na zona ZG3.

Apesar dos fortes suportes instalados, foram medidos grandes assentamentos à superfície. Assim, foram registados deslocamentos verticais totais de quase 0.20 m para um recobrimento de cerca de 20 m (Fig. 5). Sendo o avanço real de cerca de 0.5 m por ciclo e por fase, o mínimo para se criar o espaço necessário para instalar uma cambota metálica e aplicar o betão projectado, concluiu-se que a maioria dos assentamentos ocorreram devido à perda de solo na frente da escavação.

Durante a construção em ZG3 ocorreu um aluimento de terras com formação de uma chaminé de cerca de 30 m, quando a escavação intersectou o contacto geológico entre o saprólito e as rochas graníticas alteradas, numa zona saturada, com diversas galerias antigas, não registadas, escavadas para o abastecimento de água (Fig. 6). A estabilização do aluimento de terras foi efectuada por meio da bombagem de betão até conseguir a estabilização dos materiais soltos e que o arco da abóbada fosse reconstruído.

2.4 - Observação

A observação dos deslocamentos do túnel associado à escavação foi sistemática e cuidadosamente efectuada em todas as fases de construção por meio de secções de convergência triangulares, com distância variável entre si de acordo com a zona geotécnica, complementadas pela realização de nivelamentos à superfície nas zonas dos emboquilhamentos.

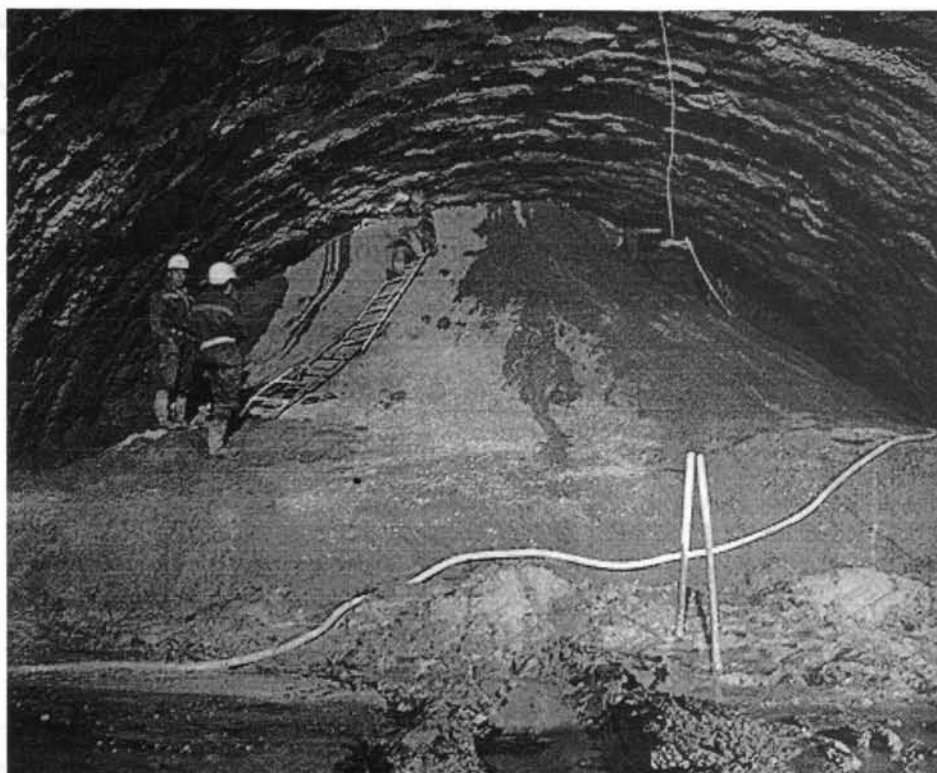


Figura 5. Assentamentos à superfície medidos na secção de observação SS2, situada a 40 m de distância do emboquilhamento norte.

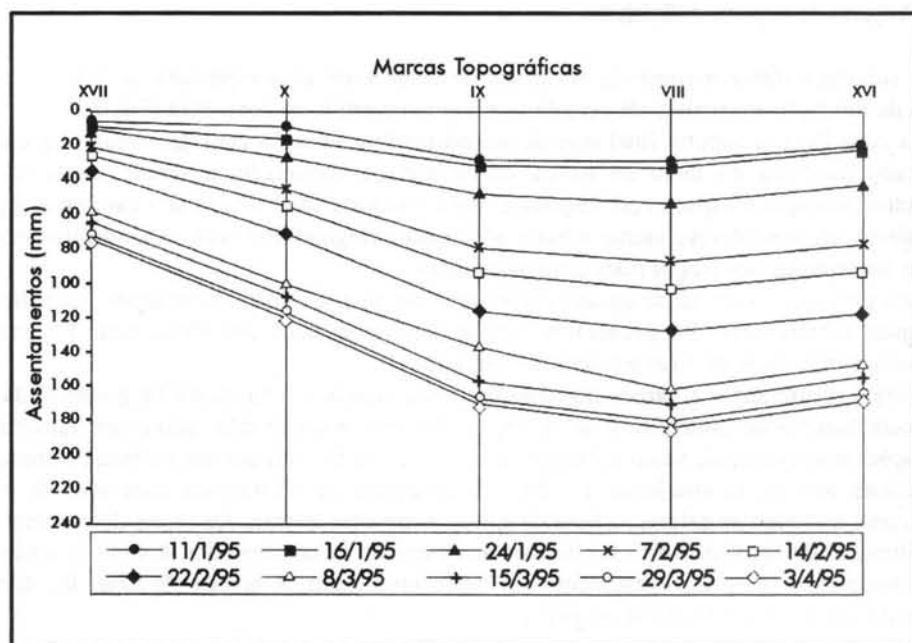


Figura 6. Aluimento de terras que ocorreu no contacto entre o solo residual e o maciço rochoso granítico fracturado.

No maciço de saprólito saturado, devido à previsão de grandes deformações, foram ainda instalados quatro inclinómetros e piezómetros, (zona do emboquilhamento norte). Foram ainda realizadas medições da convergência logo que possível após cada avanço, e junto à frente, com uma distância média entre secções de cerca de 3 m.

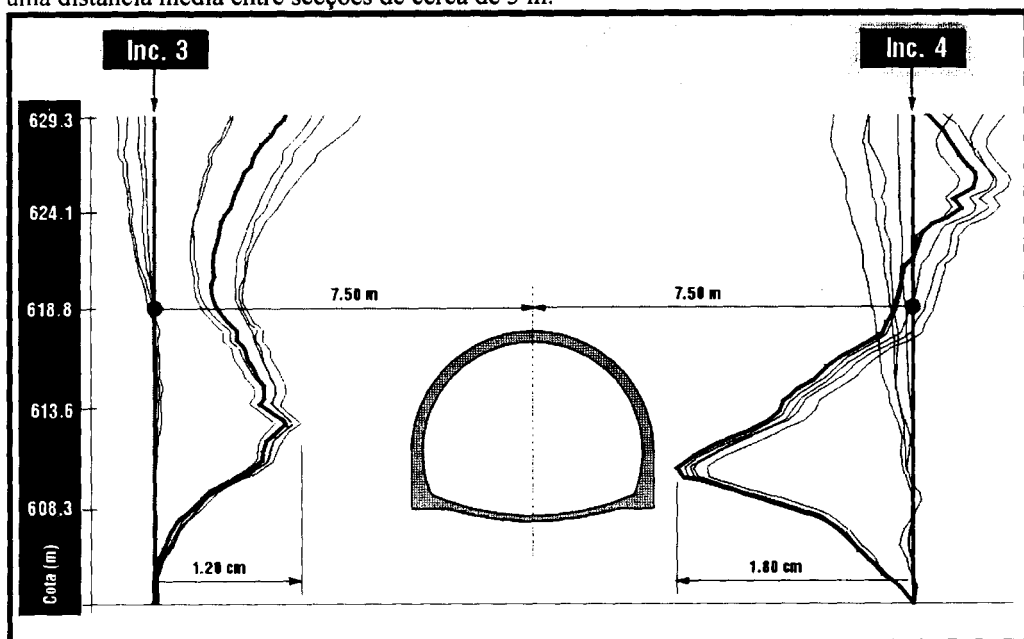


Figura 7 - Perfis dos inclinómetros mostrando as deflexões no sentido da galeria, a 25 m do emboquilhamento norte.

2.5 - Projecto do suporte definitivo

O suporte definitivo consistiu em arcos de betão com uma espessura de 0.30 m, sobre sapata de fundação em rochas sãs ou soleira em arco invertido na zona ZG3 (Fig. 8).

Na zona ZG3, o suporte final teve de ser adaptado à situação geológica real. O problema verificado decorreu do facto de os deslocamentos de convergência serem superiores aos esperados, pelo que o espaço real disponível para o suporte final de forma a garantir o gabarit de projecto, era consideravelmente inferior à espessura original. Por isso, as armaduras tiveram que ser aumentadas nos troços mais críticos do túnel.

Para prevenir a entrada de águas subterrâneas no túnel e evitar a drenagem descontrolada das águas subterrâneas, foi necessário instalar uma membrana em PVC, com 1.5 mm de espessura, entre o suporte final e o suporte primário.

Entre a membrana e a parede do túnel foi ainda instalada uma manta de geotêxtil de 500 g/m² com funções de protecção e de drenagem. Durante a construção, ocorreram importantes infiltrações imprevistas de águas subterrâneas, pelo que se decidiu por um sistema de drenagem mais eficaz, através da instalação de tubos de geodrenos perimetrais em cada arco de betão, assim como ao longo da galeria na base de ambas as paredes laterais. Os locais de concentração de infiltrações de água identificados durante a construção foram drenados através da instalação de drenos planos fixos ao revestimento em betão projectado. A soleira do túnel foi drenada através de um dreno longitudinal em betão.

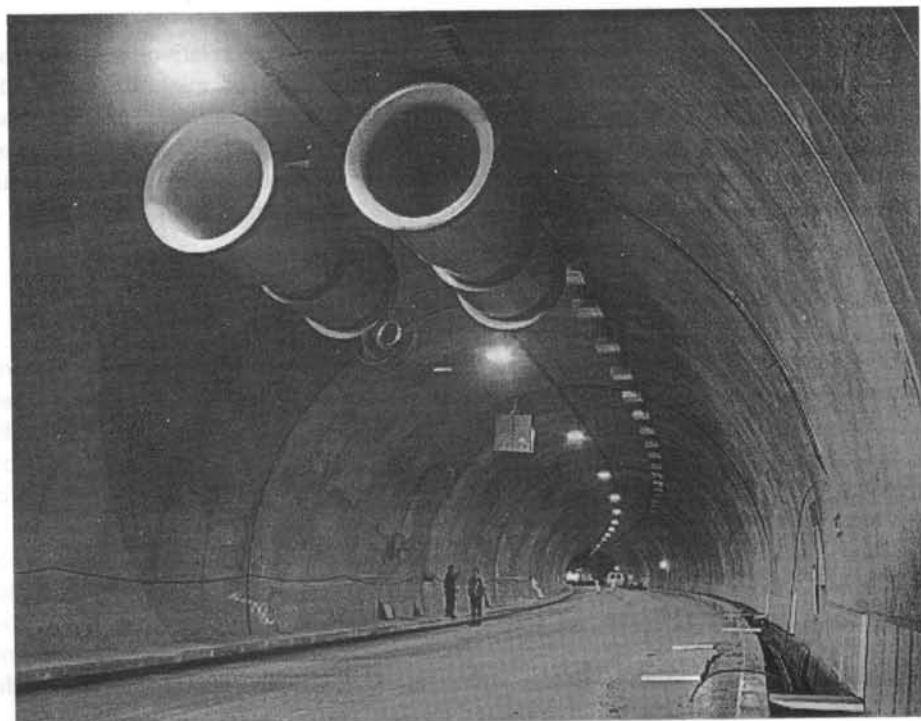


Figura 8. Túnel da Gardunha I. Suporte definitivo em betão.

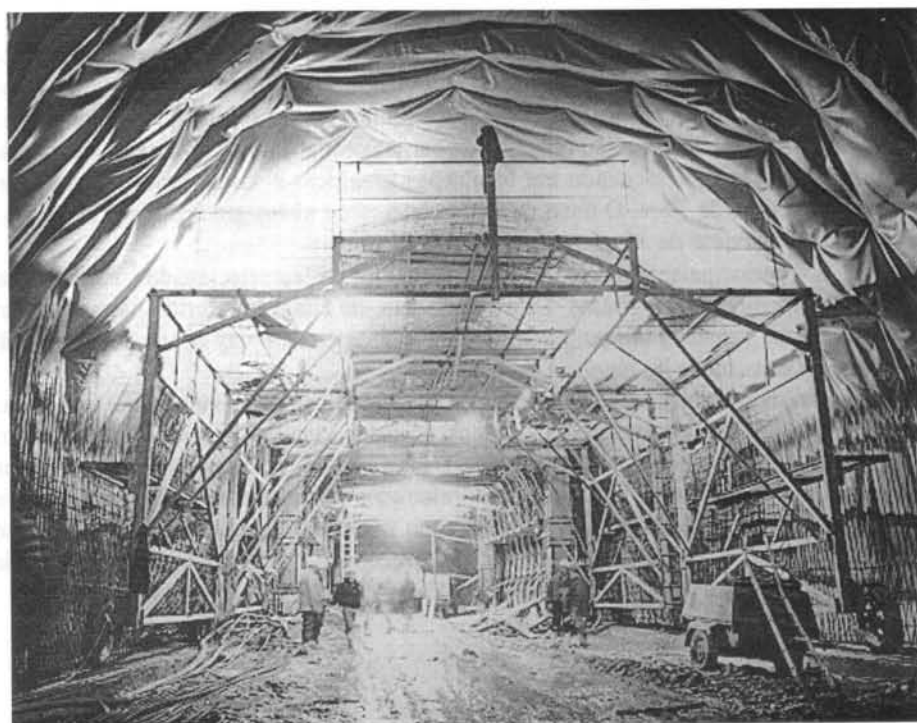


Figura 9. Instalação da membrana em PVC.

Atendendo aos potenciais impactes ambientais, especialmente relativos ao rebaixamento dos níveis freáticos, foram tomadas diversas medidas para evitar ou minimizar os problemas identificados. Assim, com vista a evitar descidas súbitas do nível freático, as discontinuidades em rochas que concentravam maiores infiltrações de águas foram seladas utilizando espuma de poliuretano. Infelizmente neste caso, os túneis funcionam como enormes drenos e alguns aquíferos sofreram importantes descidas. Sempre que afectavam pessoas, esses casos eram imediatamente reparados.

3 - TUNÉIS DO VAROSA E DA RÉGUA (IP3)

Os Túneis da Régua e de Varosa estão situados no itinerário principal IP3, no Norte do país, junto do Rio Douro, no coração da região do vinho do Porto. Esses túneis estavam, também eles, alojado em formações graníticas e xistosas. As galerias do Varosa foram escavadas próximo do encontro esquerdo da barragem - abóbada de Varosa, o que determinou um rigoroso controlo das vibrações associadas às escavações a fogo por forma a evitar a eventualidade de qualquer dano.

O túnel de Varosa está integrado no IP3, sendo constituído por duas galerias unidireccionais, com diferentes comprimentos - 337 m e 375 m - para uma melhor adaptação à topografia e à paisagem locais. O túnel da Régua, composto por uma única galeria bidireccional, com 275 m de comprimento, encontra-se localizado no nó de ligação entre a cidade da Régua e o IP3. Ambos os túneis têm uma área de escavação transversal média de cerca de 84 m² e a sua geometria é semelhante à do túnel da Gardunha I (Fig. 10).

3.1 - Condições geológicas e geotécnicas

O programa de prospecção geotécnica compreendeu a execução de sondagens rotativas com amostragem, perfis sísmicos, ensaios sísmicos nos furos ("cross-hole" e "down-hole"), interpretados através da técnica de tomografia sísmica, ensaios Lugeon e dilatométricos e ensaios laboratoriais de compressão uniaxial, de carga pontual e de deslizamento de diaclases.

O túnel do Varosa foi escavado em formações graníticas e xistos grauváquicos, com um recobrimento máximo de 70 m. O túnel da Régua interessou xistos grauváquicos alterados, com um recobrimento máximo de 35 m.

Alguns dos principais parâmetros geotécnicos foram correlacionados com o grau de alteração e de fracturação das rochas. Esta abordagem, tal como já referido para o projecto do túnel da Gardunha, forneceu um guia prático para a interpretação das condições geomecânicas locais durante a construção do túnel.

O programa de prospecção geotécnica permitiu identificar três zonas distintas. No caso do Varosa, foram definidas as zonas ZG1 (a melhor, correspondendo a granito são) e ZG2 (granito e xisto moderadamente alterados e fracturados). Para o túnel da Régua, foi ainda delimitada uma zona adicional ZG3, com materiais muito alterados e fracturados. Durante as escavações das galerias do Varosa, detectou-se ainda uma zona ZG3 restringida ao emboquilhamento sul, onde para além das características geotécnicas precárias, a topografia desfavorável impôs dificuldades acrescidas de execução da obra.

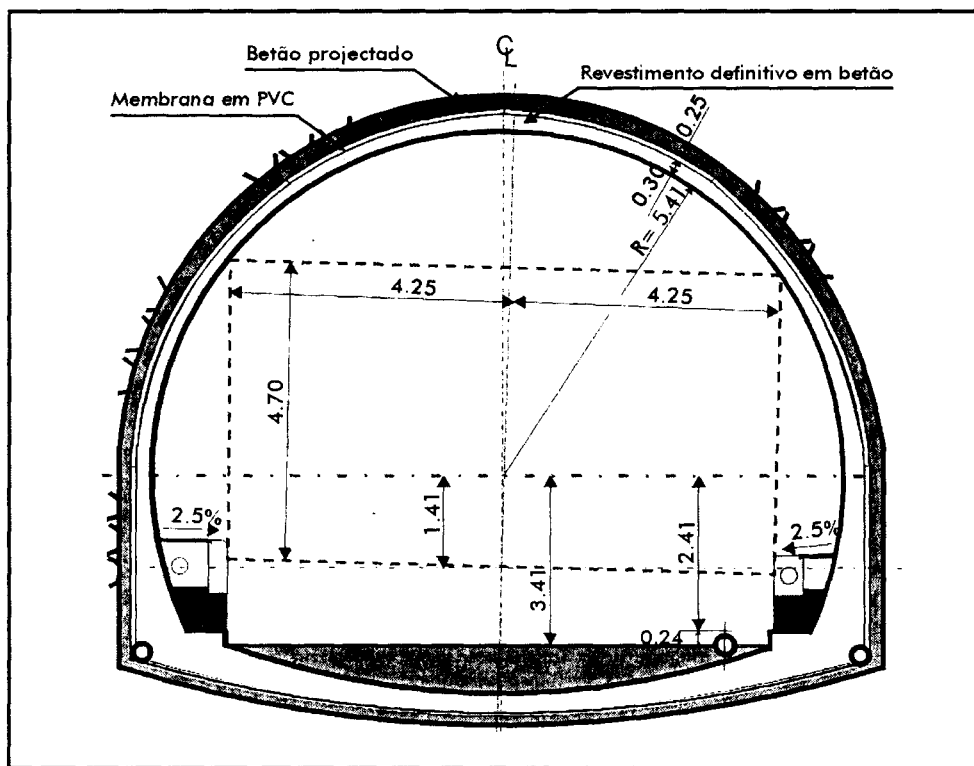


Figura 10. Perfil transversal-tipo dos túneis para as condições geotécnicas ZG3.

3.2 - Projecto do suporte primário

Para a zona ZG1 foi prevista uma escavação em secção completa, pregagens sistemáticas ($L = 3$ m, espaçadas de 2 m) e betão projectado reforçado com fibra de aço, com uma espessura de 5 cm.

Para a zona ZG2, previu-se uma escavação em meia-secção, pregagens sistemáticas ($L = 4$ m, espaçadas de 1.5 m) e betão projectado reforçado com fibra de aço com 10 cm de espessura.

Para a zona ZG3, foi prevista a escavação em quatro ou cinco fases, com galerias laterais, semelhantes às do túnel da Gardunha (ver Fig. 4), com cambotas metálicas, do tipo TH 21, espaçadas de 1.0 m, e betão projectado armado com 20 cm de espessura. Nesta zona, foi também previsto o suporte ocasional e provisório da frente de escavação (Sarra Pistone e Oliveira, 1995).

Uma condicionante importante do projecto do túnel de Varosa foi a sua proximidade da barragem-abóbada homónima com 80 m de altura, apenas a 130 m de distância do túnel (Fig.11). Esta barragem tinha sofrido reparações dez anos antes, exactamente por se terem detectado alguns problemas de estabilidade no encontro esquerdo (onde o túnel foi construído). Nessa altura, foi construída uma forte estrutura ancorada, a jusante do encontro, onde importantes deslocamentos haviam sido medidos.

Por forma a evitar qualquer dano na barragem, foi efectuado um controlo sistemático das detonações durante a construção do túnel, através da medição da velocidade de vibração das partículas em, pelo menos, três pontos sensíveis da barragem e na galeria das válvulas. Os

níveis de disparo foram mantidos muito baixos por forma a se obter a máxima sensibilidade do sistema.

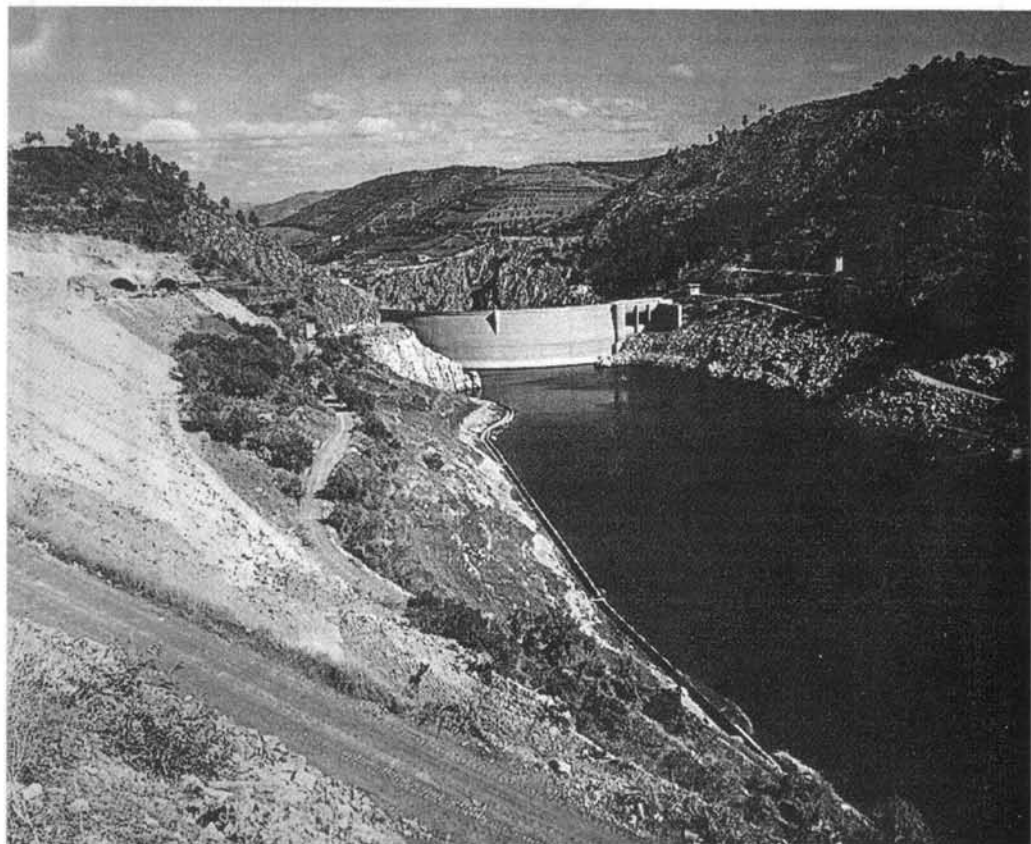


Figura 11. Túneis e barragem do Varosa.

As velocidades registadas foram comparadas com os valores estabelecidos pela norma NP-2074/83, tal como previsto, não surgiu qualquer problema, uma vez que os valores foram sempre inferiores aos 20% dos níveis máximos permitidos pela norma.

Outro factor importante na construção do túnel de Varosa relacionou-se com os emboquilhamentos a norte, que tiveram de ser escavados desde o interior das galerias, contrariamente ao projecto original, devido à impossibilidade de se construírem atempadamente adequados acessos ao local da obra, como consequência dos problemas relacionados com a expropriação das terras.

Assim foi feita a escavação de um túnel piloto da galeria para a superfície, permitindo uma análise estrutural do maciço rochoso e a instalação do suporte primário. A definitivo

A descrição geral feita para o projecto de execução do Túnel da Gardunha é válida para estes túneis. Neste caso, não foi necessária a construção de uma soleira em arco invertido porque as condições geotécnicas foram sempre consideradas adequadas para a fundação em sapatas.

No que concerne a drenagem e impermeabilização foi instalada uma membrana impermeabilizante em PVC por detrás do revestimento final tendo-se detectado alguns

problemas com o enchimento do fecho do arco com betão. Os vazios foram finalmente preenchidos com injeção de argamassa de cimento.



Figura 12. Emboquilhamento norte do túnel do Varosa

3.4 - Observação

No interior dos túneis foram realizadas medições sistemáticas de deslocamentos, através de secções de convergência e da instalação de extensómetros a iniciar tão próximo da frente quanto possível. Antes de se iniciar a escavação foram instalados, a partir da superfície, extensómetros multipontos e marcas topográficas.

As medições de convergência foram muito úteis para a interpretação do comportamento da secção do túnel, nomeadamente durante a destroça. Curvas típicas em forma de “S” como a da Fig. 13 foram características dos gráficos deslocamentos vs. tempo, com pontos de inflexão coincidentes com a data em que a destroça atravessou a secção de medição.

4 - CONCLUSÕES

A aplicação sistemática do Método Observacional provou ser um instrumento seguro na escavação dos túneis em rocha descritos nesta comunicação, permitindo a optimização de soluções em termos de segurança e custo das obras.

As condições essenciais para a aplicação bem sucedida do referido método construtivo foram as seguintes:

- Disponibilidade de um modelo geológico-geotécnico de base, bem documentado, contendo toda a informação reunida durante a fase de estudos, com vista à avaliação das condições mais prováveis e especificidades geológicas possíveis de encontrar durante a construção.
- Possibilidade contratual de alterar o projecto durante a construção.

Permanência de equipa activa no local para encontrar as soluções adequadas a cada situação problemática. Ao mesmo tempo, foi muito importante que todos as partes intervenientes tivessem o seu papel claramente definido.

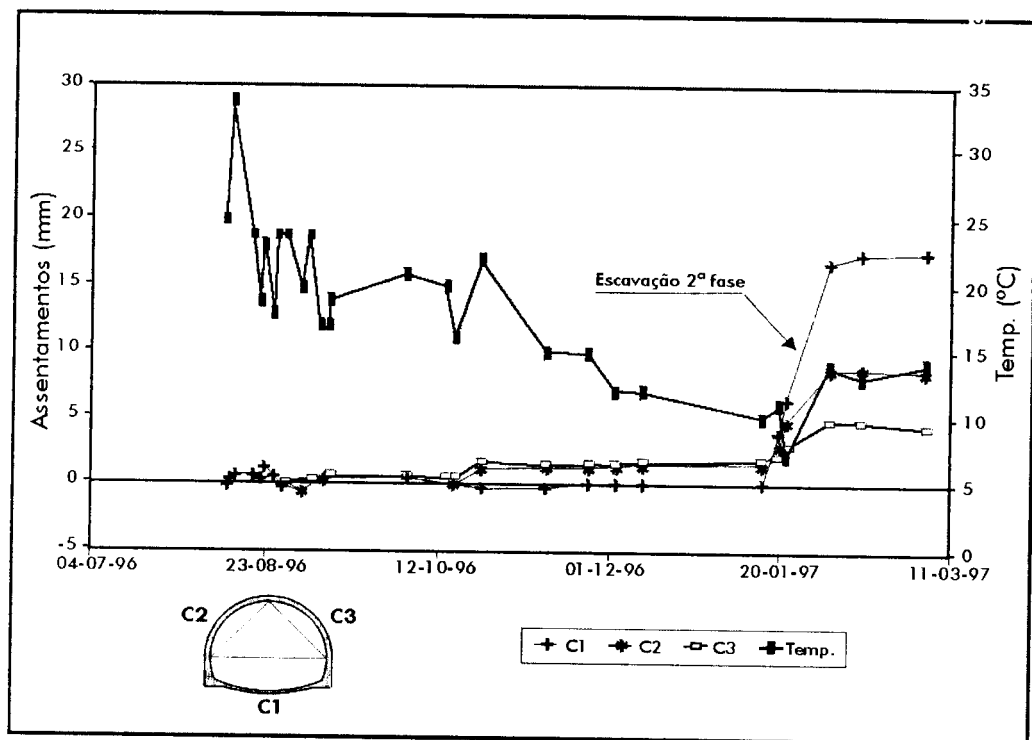


Figura 13. Medições de convergência mostrando o efeito da destroça em termos de deslocamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores desta comunicação agradecem à Junta Autónoma de Estradas por ter autorizado a publicação desta comunicação e ao Prof. Ricardo Oliveira pelos seus comentários críticos aos manuscritos.

REFERÊNCIAS

- PECK, R. - *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*. Publicado no "Observational Method in Geotechnical Engineering" (1996). T. Telford. Londres, 1969.
- PINTO DA CUNHA, A. - *Comportamento e segurança de estruturas subterrâneas em rocha*. LNEC, Lisboa, 1991.
- POWERDERHAM, A.J. - *An overview of the observational method: development in cut and cover and bored tunnelling projects*. "The Observational Method in Geotechnical Engineering". T. Telford. Londres, 1996.
- SARRA PISTONE, R. e R. OLIVEIRA - *Metodologia de projecto para túneis rodoviários. Aplicação aos túneis do IP3*. Anais do 5º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 3. Coimbra, 1995.