

Resumo

As obras de arte e as demais estruturas, são dimensionadas para um tempo de vida útil em serviço. Com o passar do tempo as estruturas começam a apresentar patologias e assim sendo há que intervir em serviços de manutenção ou, no limite, de recuperação e reforço.

Estas intervenções servem para beneficiar ou reforçar as estruturas, com o intuito de evitar acidentes, pois estes, levariam a grandes prejuízos e contratempos, principalmente quando estas obras se situam em meios urbanos.

Os problemas patológicos que surgem numa estrutura são ocasionados pela sua antiguidade, por manutenção inadequada ou mesmo ausência de total de manutenção, têm na sua origem o desconhecimento técnico e/ou problemas financeiros.

Este trabalho consiste num projecto de beneficiação e reforço de um túnel ferroviário, fazendo uma abordagem das patologias existentes nos vários elementos construtivos e uma apresentação das técnicas de reabilitação e reforço utilizadas.

Palavras-chave: Túnel, Reabilitação, Reforço, Túnel Ferroviário.

Abstract

The works of art and other structures are sized for a lifetime of service. Over time the structures begin to present pathologies and therefore must be involved in maintenance services and, ultimately, recovery and strengthening.

These interventions serve to benefit and strengthen the structures in order to avoid accidents, as these, would lead to great damage and inconvenience, especially when these works are situated in urban areas.

The pathological problems that arise in a structure are caused by its antiquity, for maintenance or even total lack of maintenance, have their origin in the lack of technical knowledge and / or financial problems.

This paper is a draft improvement and reinforcement of a railway tunnel, making an approach of pathologies in the different building elements and a presentation of the techniques used for rehabilitation and strengthening.

Keywords: Tunnel, Rehabilitation, Reinforcement, Tunnel Rail.

Agradecimentos

Primeiro quero agradecer ao meu orientador Eng.º Carlos Ferraz por esta oportunidade, de fazer um estágio numa empresa de projectos tão conceituada e com um historial fantástico, a *Edgar Cardoso, Laboratório de Estruturas*.

Quero agradecer:

- ao António Alberty pela sua preocupação e disponibilidade que demonstrou ao longo do meu estágio;
- à Eng.º Maria Emília pelas suas explicações, sugestões que me deu ao longo deste tempo e pela sua simpatia;
- ao David Cassiano e ao Edgar Ferreira pelas suas apreciações e sugestões, e pelo apoio que sempre me deram. Obrigado;
- à equipa de desenhadores, Natália Cruz, Vasco Nobre, Carla Fernandes, Mónica Lopes e os demais, que sempre se mostraram disponíveis para me ensinar novas técnicas de desenho e para me explicar qualquer dúvida que surgisse;
- quero agradecer aos meus pais e avó pelo apoio que sempre me deram e nos momentos mais frágeis sempre me incentivaram a nunca desistir;
- ao meu grande amigo Pedro Edgar pela sua amizade, apoio e confiança demonstrada na minha pessoa;
- à Marta por tudo o que se privou para a realização deste estágio.

Sem eles este trabalho não seria possível, a todos o meu grande e sincero Obrigado.

Índice do Texto

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Introdução..... | 1 |
| 1.1. | Preâmbulo..... | 1 |
| 1.2. | Conteúdo do Trabalho..... | 3 |
| 2. | Túneis – História..... | 5 |
| 3. | Informação geral sobre túneis..... | 11 |
| 3.1. | Informação Geral sobre o túnel em estudo | 11 |
| 3.1.1. | Características do Túnel e maciço envolvente..... | 11 |
| 3.1.2. | Condições Técnicas – Dono de Obra..... | 12 |
| 3.1.3. | Descrição das anomalias | 16 |
| 4. | Técnicas de Reabilitação Utilizadas..... | 23 |
| 4.1. | Reabilitação não Estrutural | 23 |
| 4.1.1. | Limpeza mecânica..... | 23 |
| 4.1.2. | Limpeza com água à pressão..... | 23 |
| 4.1.3. | Jacto de areia por via húmida..... | 24 |
| 4.1.4. | Hidrofugação..... | 24 |
| 4.1.5. | Manutenção:..... | 24 |
| 4.1.6. | Tratamento de juntas:..... | 24 |
| 4.2. | Reabilitação Estrutural | 24 |
| 4.2.1. | Refechamento das Juntas..... | 25 |
| 4.2.2. | Drenagem – rebaixamento do nível freático..... | 25 |
| 4.2.3. | Injecções de consolidação da alvenaria com o maciço | 25 |
| 4.3. | Escavação de Túneis | 26 |
| 4.3.1. | Pregagens | 26 |
| 4.3.2. | Betão Projectado | 26 |
| 5. | Processos Construtivos..... | 27 |
| 5.1. | Limpeza das superfícies | 27 |
| 5.2. | Alegramento e refechamento das juntas de alvenarias; | 28 |
| 5.3. | Injecção de colagem do revestimento; | 28 |
| 5.4. | Substituição de blocos..... | 29 |
| 5.5. | Rede de drenagem do maciço encaixante;..... | 29 |
| 5.6. | Rede de drenagem da Plataforma / Passadiços; | 30 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.7. | Nichos de resguardo de pessoal..... | 31 |
| 5.7.1. | Nichos existentes..... | 31 |
| 5.7.2. | Nichos novos a executar | 32 |
| 5.8. | Trabalhos Finais no interior do túnel..... | 33 |
| 5.8.1. | . Pintura dos da totalidade das superfícies e dos nichos..... | 33 |
| 5.8.2. | Sinalização dos nichos de resguardo de Pessoal e de emergência ao longo do túnel. 33 | |
| 5.9. | Túnel de Acesso Lateral e Passadiço..... | 34 |
| 6. | Cálculos..... | 39 |
| 6.1. | Introdução..... | 39 |
| 6.2. | Características dos materiais | 39 |
| 6.3. | Modelo de Cálculo para as Secções do túnel..... | 40 |
| 6.4. | Modelo de Cálculo para os Nichos e Câmaras de Serviço | 47 |
| 6.5. | Cálculos da Rede de Drenagem..... | 48 |
| 6.6. | Cálculos do Túnel de Acesso Lateral | 51 |
| 7. | Resultados..... | 54 |
| 7.1. | Modelo das Secções do Túnel..... | 54 |
| 7.2. | Nichos e Câmaras de Serviço | 58 |
| 7.3. | Rede de Drenagem Longitudinal | 59 |
| 7.4. | Túnel de Acesso Lateral..... | 61 |
| 8. | Plano de Monitorização | 65 |
| 8.1. | Acompanhamento e Observação na construção de Túneis | 65 |
| 8.2. | Principais actividades de observação geotécnica | 68 |
| 8.2.1. | Medição de Convergências | 68 |
| 8.2.2. | Inclinómetros..... | 69 |
| 8.2.3. | Extensómetros..... | 70 |
| 8.2.4. | Medição de assentamentos à superfície | 71 |
| 8.2.5. | Medição da pressão/níveis de água..... | 72 |
| 8.2.6. | Medição de assentamentos | 72 |
| 8.3. | Frequência de Leituras | 73 |
| 8.4. | Instrumentação..... | 74 |
| 8.5. | Limites de Alerta e Alarme | 75 |
| 9. | Conclusões..... | 77 |
| | Bibliografia..... | 80 |

Índice de Ilustrações

| | |
|--|----|
| Ilustração 1 - Túnel sob o Monte Posilipo (Nápoles, Itália). | 5 |
| Ilustração 2 - Túnel de Saint Gothard (Esq.) e Túnel do Maipas no Canal Midi (França, séc XVII (Dir)). | 6 |
| Ilustração 3 - Método Alemão de escavação e suporte de túneis..... | 8 |
| Ilustração 4 - Método Belga de escavação e suporte de túneis..... | 8 |
| Ilustração 5 - Método Austríaco Clássico de escavação e suporte de túneis..... | 9 |
| Ilustração 6 - Método Inglês de escavação e suporte primário. | 9 |
| Ilustração 7 - Pormenor construtivo do método Belga (Adaptado de LNEC [22], 1991). | 10 |
| Ilustração 8 - Localização do Túnel de Ferroviário. | 11 |
| Ilustração 10 - Infiltrações com profusão de musgos, estalactites e água perto da Boca de Saída. | 21 |
| Ilustração 9 - Manchas decorrentes da existência de água/humidade, marcas de lamas nos hasteais. | 21 |
| Ilustração 11 - Canaletes externos radiais e em “árvore” de drenagem das águas entre os 460m e os 520m..... | 22 |
| Ilustração 12 - Pormenor da drenagem longitudinal e passadiços laterais. | 31 |
| Ilustração 13 - Geometria dos novos nichos a executar. | 32 |
| Ilustração 14 - Localização do Túnel de Acesso Lateral. | 34 |
| Ilustração 15 - Marcação topográfica do Túnel de Acesso Lateral..... | 35 |
| Ilustração 16 - Sequência de Execução do Túnel de Acesso..... | 35 |
| Ilustração 17 - Geometria da Secção do Túnel de Acesso. | 36 |
| Ilustração 18 - Escoramento constituído por perfis HEB 160 e 100..... | 38 |
| Ilustração 19 - Localização do passadiço..... | 38 |
| Ilustração 20 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Estáticas..... | 41 |
| Ilustração 21 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Dinâmicas..... | 41 |
| Ilustração 22 - Esquema da determinação da acção vertical..... | 42 |
| Ilustração 23 - A distribuição das reacções do terreno sobre o revestimento..... | 44 |
| Ilustração 24 - Esquema de cálculo dos nichos e câmaras de serviço. | 47 |
| Ilustração 25 - Esquema da consideração de acções nos nichos e câmaras de serviço..... | 48 |
| Ilustração 26 - Zonas ao longo do túnel com enorme presença de água. | 49 |
| Ilustração 27 - Secção transversal em estudo..... | 50 |
| Ilustração 28 - Composição da Secção 0+750m..... | 54 |
| Ilustração 29 - Composição da Secção 0+720m..... | 56 |
| Ilustração 30 - Composição da Secção Transversal de Drenagem. | 60 |
| Ilustração 31 - Solução adoptada da Secção da Drenagem Longitudinal. | 61 |
| Ilustração 32 - Classe e características do maciço. | 62 |
| Ilustração 33 - Indicações de escavação e suporte a aplicar na execução do túnel de Acesso. | 62 |
| Ilustração 34 - Método de desmonte recorrendo ao gráfico de Franklin..... | 63 |
| Ilustração 35 - Ilustração dos possíveis anomalias durante uma escavação..... | 65 |
| Ilustração 36- Secções possíveis de medição de convergências (adaptado de Cunha [16]). | 68 |
| Ilustração 37 - Sonda inclinométrica - inclinómetro (adaptado de Melâneo [10])...... | 69 |

| | |
|--|----|
| Ilustração 38 - Castro de Aire - Leitura Inclínométrica (adaptado Melâneo [10]). | 70 |
| Ilustração 39 - Extensómetro de superfície de cabeça tripla embutida (Amaral [15],2006). | 71 |
| Ilustração 40 - Esquema da instalação de uma marca topográfica de nivelamento (adaptado Loureiro [12]). | 72 |
| Ilustração 41 - a) Marca de nivelamento com tubo de PVC, b) Colocação no furo, c) Tampa de protecção (adaptado Loureiro [12]). | 72 |
| Ilustração 42 - Exemplos de um fissurómetro e de um alvo topográfico (adaptado de Melâneo [10]). | 73 |
| Ilustração 43 - Pormenor da instrumentação instalada em cada secção. | 75 |

Índice de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Períodos de construção, quantidades e comprimentos dos Túneis da rede ferroviária (Adaptado de LNEC [22], 1991)..... | 6 |
| Quadro 2 - Quadro resumo por regiões. (Adaptado de LNEC [22], 1991)..... | 7 |
| Quadro 3 - Valores obtidos dos ensaios de compressão simples do revestimento..... | 18 |
| Quadro 4 - Valores obtidos dos ensaios de compressão simples do maciço..... | 19 |
| Quadro 5 - Características geomecânicas do maciço envolvente do túnel. | 39 |
| Quadro 6 - Classificação de Terzaghi para os maciços rochosos (Adapatado de Miranda [25], 2003)..... | 43 |
| Quadro 7 - Coeficientes correspondente às acções varáveis..... | 46 |
| Quadro 8 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para as acções..... | 46 |
| Quadro 9 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para os parâmetros do terreno. | 47 |
| Quadro 10 - Aplicação do sistema RMR..... | 52 |
| Quadro 11 - Recomendações de escavação e suporte com base nas classes do sistema RMR. | 53 |
| Quadro 12 - Valores de esforços e tensões na secção 0+720m, para Combinação ELU..... | 55 |
| Quadro 13 - Valores de esforços e tensões na secção 0+720m, para a Combinação Frequente..... | 55 |
| Quadro 14 - Esforços e tensões sem influência do Hotel. | 57 |
| Quadro 15 - Esforços e Tensões com influência do Hotel..... | 57 |
| Quadro 16 - Verificação das deformações nos Nichos. | 59 |
| Quadro 17 - Verificação das deformações nas Câmaras de Serviço. | 59 |
| Quadro 18 - Tabela com a identificação dos limiares de segurança durante a execução do túnel..... | 76 |

Lista de Siglas e Abreviaturas

Referente ao Túnel

A – Ascendente

D – Descendente

C – Central

CA – Central Ascendente

CD – Central Descendente

PM – Ponto métrico

PL – Ponto longitudinal

CP – Caminhos de Ferro de Portugal

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

b - Largura

Bar - Unidade de medida da pressão atmosférica, no sistema C.G.S.

cm – centímetros

E – Módulo de Elasticidade

F – Estado de fracturação do maciço rochoso de acordo com a classificação da ISRM.

h - altura

Ir – Índice de resistência point-load.

kPa – kilo Pascal

kN – kilo Newton

m – metros

mm² – milímetros quadrados

MPa – Mega Pascal

P.k. – Ponto kilométrico

P.V.C. - cloreto de polivinila

q – carga, acção

Q – Índice utilizado pela classificação de Barton (Barton et al., 1993).

q_{máx} – Carga máxima

Qu – Tensão de rotura

RMR – Índice Rock Mass Ratio utilizado pela classificação de Bieniawski (1984).

RQD – Índice que varia de 0 a 100 e que traduz o grau de fracturação do maciço.

V_l – Velocidade de propagação de ultra-sons.

W – Estado de alteração do maciço identificado de acordo com a classificação da ISRM.

Φ – Diâmetro

σ_c – Resistência à compressão uniaxial da rocha.

γ - Peso Volúmico do maciço.

α_n – Ângulo formado pela radial do nó, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

α_0 - Ângulo formado pela radial do ponto de acção nula, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

β_n – Ângulo formado pela radial do nó, com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

β_0 – Ângulo formado pela radial do nó de encastramento com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

γ_g – Coeficiente de segurança relativo às acções permanentes

γ_q – Coeficiente de segurança relativo às acções variáveis

S_G – Acção permanente

S_Q – Acção variável

S_d – Esforço de cálculo

Ψ_{0j}, Ψ_{2j} – Coeficiente Ψ correspondente à acção variável j

Ψ_1 – Coeficiente Ψ correspondente à acção variável principal

1. Introdução

1.1. Preâmbulo

O projecto de uma via ferroviária em região montanhosa, isto é, de topografia acidentada, conduz em primeira análise a um traçado sinuoso e extenso, exigindo a realização de obras acessórias responsáveis por elevados impactos negativos no meio ambiente.

Para melhorar a qualidade destes traçados, tornando-os mais curtos e reduzindo os impactos das obras sobre o ambiente, as alternativas que se colocam passam por obras especiais que vençam obstáculos naturais, como por exemplo, montanhas e vales, são respectivamente, túneis e viadutos. Estas obras de arte também se encontram em meio urbano, em que a ocupação da superfície tem elevado índice de construção e de tráfego.

Um túnel é uma abertura realizado no subsolo para ligação entre dois locais com o objectivo de estabelecer a circulação de pessoas, cargas ou o transporte de fluidos.

Com o passar do tempo, qualquer obra de arte, neste caso de túneis, começa a padecer de patologias típicas, como infiltrações de água, erosão das alvenarias do revestimento e outras demais, que com uma manutenção e monitorização constantes poderiam ser evitadas ou detectadas num menor espaço de tempo, fazendo com que a sua reparação fosse uma actividade menos demorada e causa-se menos transtornos aos utentes que usufruem todos dos dias das linhas ferroviárias.

Neste relatório descrevem-se as patologias existentes típicas dos túneis bem como os métodos de construção, descrições baseadas em documentos oficiais de entidades de investigação e laboratórios certificados.

São descritas as soluções construtivas e o seu processo de execução para a realização do reforço do túnel em questão e também outras obras referentes à beneficiação do mesmo.

Posteriormente é demonstrado e explicado os modelos de cálculo utilizados depois da beneficiação e comentário sobre os resultados obtidos.

Finalmente, através deste estágio foi possível ganhar uma maior percepção da realidade associada ao projecto de obras de arte, expandindo os conhecimentos adquiridos durante

a Licenciatura e Mestrado, identificando problemas e dificuldades e procurando discutí-los com engenheiros experientes, de forma a aumentar o leque de competências e a adquirir maior autonomia na realização de projectos.

1.2. Conteúdo do Trabalho

Este relatório apresenta-se dividido oito capítulos, sendo o primeiro capítulo uma breve introdução do presente trabalho.

O segundo capítulo onde se faz uma brevíssima abordagem da História dos túneis. O século em que realmente houve uma grande necessidade de recorrer á construção dos túneis. Este capítulo também se refere a distribuição de túneis ferroviários em Portugal e aos métodos de escavação utilizados neste século.

O terceiro capítulo faz uma descrição do túnel em estudo, onde se insere, a sua localização, a sua constituição e as características do maciço envolvente onde se encontra. Descreve as condições técnicas exigidas pelo Dono de Obra e as anomalias encontradas durante uma inspecção efectuada pela empresa.

O quarto capítulo descreve as técnicas de reabilitação utilizadas neste projecto e a sua funcionalidade.

O quinto capítulo descreve todo o processo construtivo das técnicas de reabilitação e beneficiação, a execução ordenada de todas as actividades referente a cada processo e a respectiva ordem de execução de cada processo.

O sexto capítulo refere-se aos cálculos efectuados para a verificação da segurança estrutural do túnel e dos elementos constituintes deste. Descreve-se os modelos matemáticos utilizados para o túnel e dos elementos constituintes.

O sétimo capítulo aborda os resultados obtidos do capítulo anterior e faz-se uma análise crítica, tentando explicar se o que foi obtido é congruente ou não, e os motivos que leva a discutir a veracidade dos métodos utilizados.

Por penúltimo, o oitavo capítulo que se faz uma abordagem de um plano de monitorização, como é constituído e a elevada importância que este tem sobre estruturas subterrâneas.

Por fim, o nono capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado.

2. Túneis – História

Os trabalhos subterrâneos são obras que têm características singulares. Isto não impediu a sua utilização desde os primeiros períodos da humanidade, como o prova a descoberta de escavações subterrâneas que estão entre os primeiros testemunhos da actividade humana

Diodoro refere a construção de um túnel sob o rio Eufrates para a passagem de pessoas, com uma extensão de 900m e com uma secção de 3,6 x 4,5 m² construído cerca de 2500 a.C.

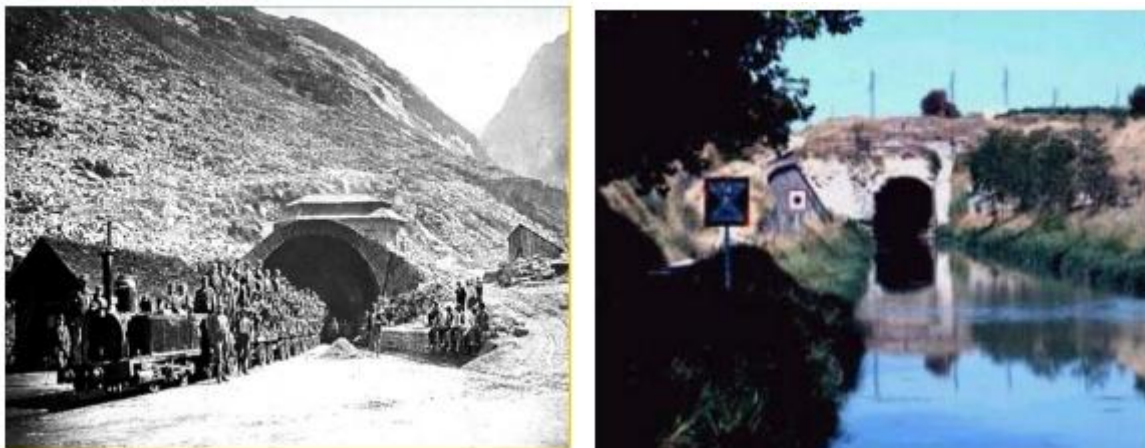
A História Antiga cita inúmeros túneis para o uso hidráulico, militar e mineiro, como o túnel hidráulico com 535m e 5m² de secção que Ezequias construiu para abastecer Jerusalém em 800 a.C., o da ilha de Samos (687 a.C.), o cruzamento do Monte Posilipo (630 m) entre Nápoles e Pozzuoli (Ilustração 1). (adaptado de Melâneo [10], 2009).

Ilustração 1 - Túnel sob o Monte Posilipo (Nápoles, Itália).



No entanto, o crescimento mais rápido em matéria de trabalhos subterrâneos só se produziu no século XIX, sob o impulso do desenvolvimento industrial. Nestas épocas deu-se um espectacular acréscimo da utilização do subsolo, no domínio dos transportes com o desenvolvimento dos caminhos de ferro, das estradas e das vias navegáveis, no domínio mineiro e nos domínios dos aproveitamentos hidroeléctricos/barragens.

Ilustração 2 - Túnel de Saint Gothard (Esq.) e Túnel do Maipas no Canal Midi (França, séc XVII (Dir)).



Em Portugal a maioria dos túneis foram construídos entre os quinquénios 1860 a 1910.

Na rede ferroviária nacional existem presentemente 118 túneis. A maioria destes localiza-se na Região Norte do país, de seguida a Região Centro e por fim a Região Sul. Para melhor esclarecimento a seguir mostra-se dois quadros, Quadro 1 e Quadro 2, que ilustram os vários túneis construídos ao longo dos quinquénios e distribuição percentual entre as regiões. (Adaptado de LNEC [22], 1991)

Quadro 1 - Períodos de construção, quantidades e comprimentos dos Túneis da rede ferroviária (Adaptado de LNEC [22], 1991).

| PERÍODOS DE CONSTRUÇÃO | QUANTIDADES | PERCENTAGENS (%) | | COMPRIMENTOS (m) |
|------------------------|-----------------------|------------------|-----------|------------------|
| | | Simples | Acumulada | |
| 1860/64 | 2 | 1,69 | 1,69 | 1310 |
| 1865/69 | 0 | 0,00 | 1,69 | 0 |
| 1870/74 | 0 | 0,00 | 1,69 | 0 |
| 1875/79 | 22 | 18,64 | 20,33 | 7939 |
| 1880/84 | 16 | 13,56 | 33,89 | 5254 |
| 1885/89 | 41 + 1 ⁽¹⁾ | 35,59 | 69,48 | 10227 + 72 |
| 1890/94 | 0 | 0,00 | 69,48 | 0 |
| 1895/99 | 0 | 0,00 | 69,48 | 0 |
| 1900/04 | 1 | 0,85 | 70,33 | 128 |
| 1905/09 | 11 | 9,32 | 79,65 | 1448 |
| 1910/14 | 20 | 16,95 | 96,60 | 846 |
| 1915/19 | 1 | 0,85 | 97,45 | 154 |
| 1920/24 | 0 | 0,00 | 97,45 | 0 |
| 1925/29 | 0 | 0,00 | 97,45 | 0 |
| 1930/34 | 0 | 0,00 | 97,45 | 0 |
| 1935/39 | 1 | 0,85 | 98,30 | 488 |
| 1940/44 | 0 | 0,00 | 98,30 | 0 |
| 1945/49 | 1 ⁽²⁾ | - | - | 72 |
| 1950/54 | 0 | 0,00 | 98,30 | 0 |
| 1955/59 | 0 | 0,00 | 98,30 | 0 |
| 1960/64 | 0 | 0,00 | 98,30 | 0 |
| 1965/69 | 1 | 0,85 | 99,15 | 425 |
| 1988-89 | 1 | 0,85 | 100,00 | 240 |
| TOTAL ⁽²⁾ | 118 | 100,00 | | 28351 |

(1) - Túnel geminado de Sintra. Cavidade (via descendente) construída no quinquénio 1885/89 e cavidade (via ascendente) construída no quinquénio 1945/49.

(2) - No total considerou-se que as duas cavidades constituíam um único túnel.

Quadro 2 - Quadro resumo por regiões. (Adaptado de LNEC [22], 1991).

| REGIÕES | EXISTENTES | | EXTENSÃO | |
|---------|------------|----------------|----------|-----------------|
| | Número | % [*] | Metros | % ^{**} |
| NORTE | 74 | 62,7 | 15328 | 63,7 |
| CENTRO | 41 | 34,7 | 12284 | 43,1 |
| SUL | 3 | 2,6 | 909 | 3,2 |
| TOTAL | 118 | 100 | 28531 | 100 |

O método construtivo que terá predominado na abertura das estruturas subterrâneas da rede geral de caminhos-de-ferro designa-se vulgarmente por método belga. Considera-se que este método construtivo é o principal responsável por um grande número de anomalias actualmente existentes nos túneis ferroviários.

Este método é um dos muitos métodos utilizados na altura para a escavação de túneis. Consiste basicamente numa técnica de escavação sequenciada.

Esta técnica de escavação sequenciada consiste na escavação de toda a secção por partes e aplica-se, posteriormente, o escoramento ou então escava-se apenas uma parte da secção escorando-a antes de se iniciar a escavação da próxima parte da secção. A execução desta técnica de escavação era devido às grandes dimensões da secção e por não ser possível ou impraticável, construtivamente ou por razões de segurança, a escavação da totalidade da secção.

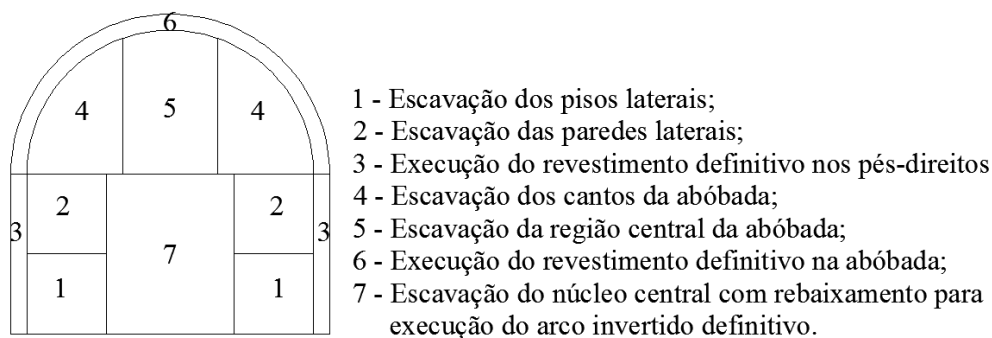
Os métodos desta técnica foram desenvolvidos a partir de experiências anteriores, adaptando-os às condições locais do maciço escavado sem avaliar ou preservar a sua qualidade. Estes métodos preocupam-se em fixar uma parte ou sequência de escavação e a instalação do suporte depende das condições geológicas e restrições de deslocamento. Os Métodos mais conhecidos são os seguintes:

- O Método Alemão;
- O Método Belga;
- O Método Austríaco;
- E o Método Inglês.

O Método Alemão foi um dos mais utilizados e tradicionais. Foi utilizado na França, em 1803, na abertura do túnel de Tronquoy e no Pouilly, em 1824. A sequência de escavação tem por princípio a colocação do escoramento definitivo nas laterais para posteriormente se retirar o núcleo de escavação. Este método pode ser aplicado para

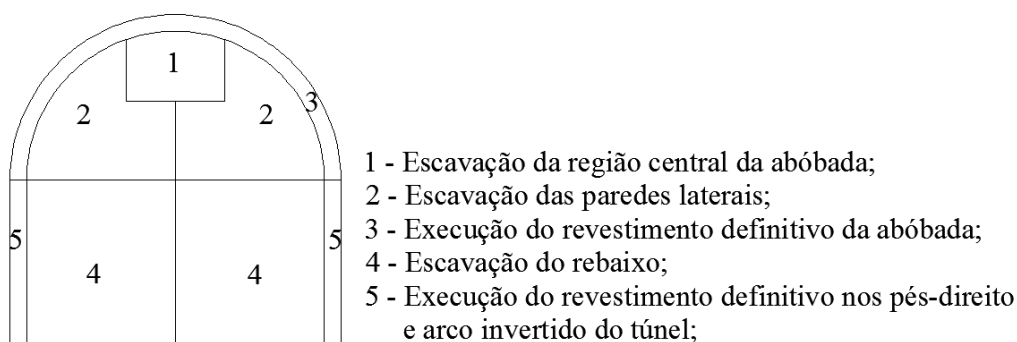
aberturas de grande secção transversal, pois como se apoia no núcleo central, sofre pequenas deformações. De seguida mostra-se uma ilustração, Ilustração 3, referente ao Método Alemão.

Ilustração 3 - Método Alemão de escavação e suporte de túneis.



O Método Belga foi utilizado pela primeira vez em 1828 no túnel de Charleroy, na Bélgica, e em outros túneis de grandes extensões nos Alpes, como o de Mont-Cenis (12,5 km) e no antigo St. Gothard (15 km). Neste método, as primeiras etapas de escavação prevêm a abertura da abóbada e a colocação do suporte definitivo, após escoramento provisório de madeira. As fases seguintes caracterizam-se pela abertura das laterais. A ilustração, Ilustração 4, demonstra a sequência de escavação do método.

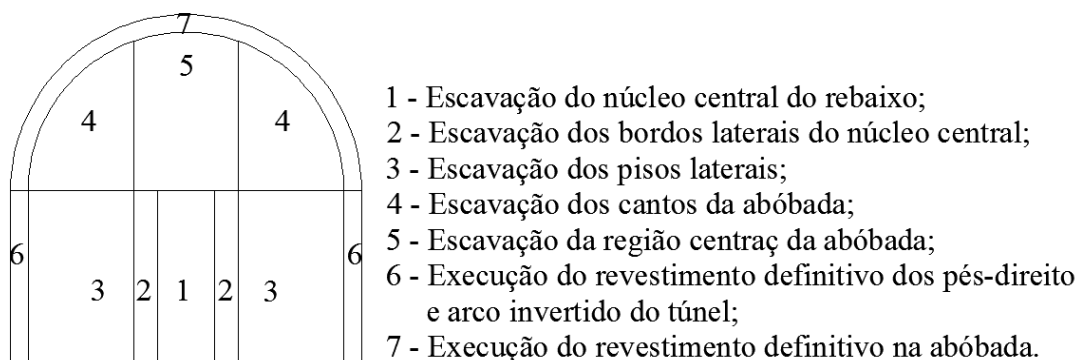
Ilustração 4 - Método Belga de escavação e suporte de túneis.



O Método Austríaco Clássico foi utilizado pela primeira vez em Leipzig-Dresden (Alemanha) em 1837 e em seguida nos Alpes, em 1848. Caracteriza-se pela abertura total da secção escavada e escorada provisoriamente por madeiras. Em seguida, é colocado o suporte definitivo a partir do pé das paredes laterais até ao fechamento da abóbada e, por último, executa-se o arco invertido. Tal método pode induzir grandes deformações no maciço, tornando-o não recomendável para grandes secções

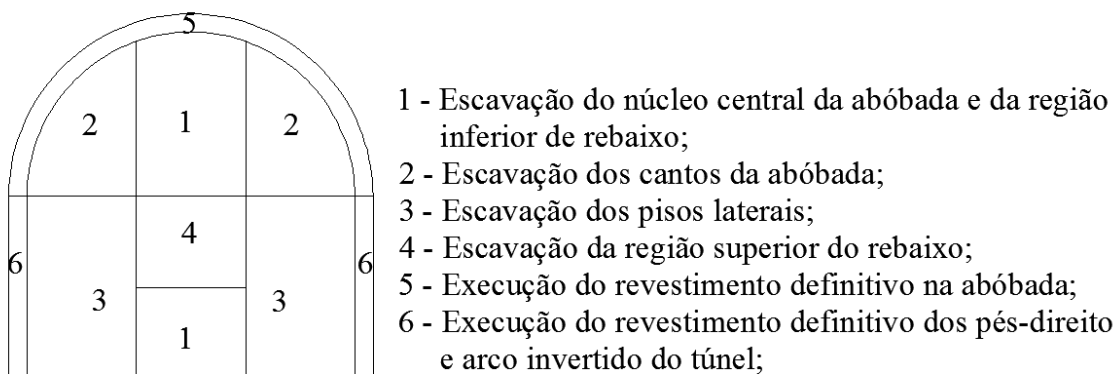
transversais, a seguir mostra-se uma ilustração, Ilustração 5, com a sequência de escavação deste método.

Ilustração 5 - Método Austríaco Clássico de escavação e suporte de túneis.



O Método Inglês, semelhante ao Austríaco, foi aplicado pela primeira vez em 1830, na Inglaterra, em túneis ferroviários. A face é totalmente escavada e escorada provisoriamente por madeira. Logo após, é iniciada a colocação do suporte definitivo. Com este método foram registados avanços diários de 3 a 6 m, este método também pode gerar grandes deformações no maciço. De seguida mostra-se uma ilustração, Ilustração 6, com a sequência de escavação deste método.

Ilustração 6 - Método Inglês de escavação e suporte primário.



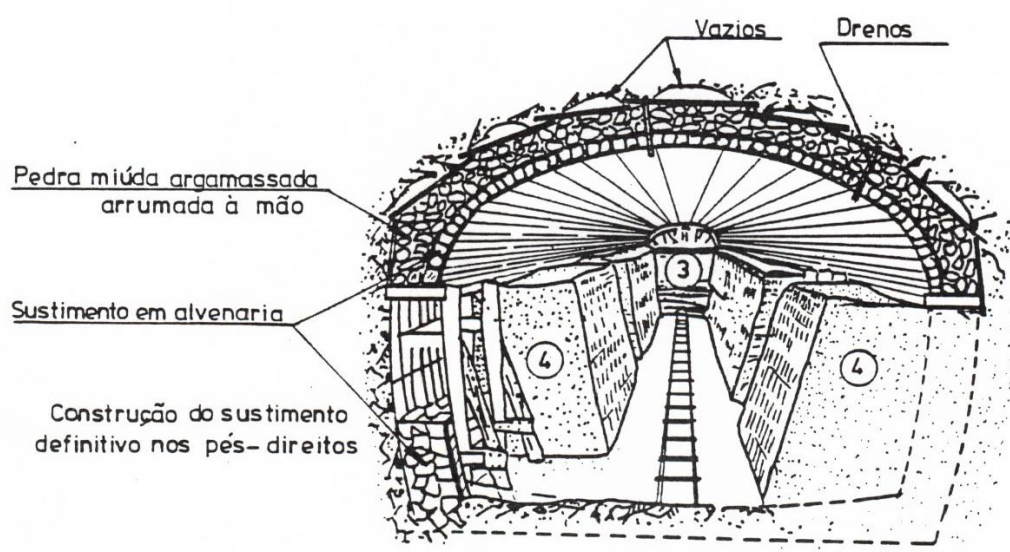
Na escavação sequenciada, a escolha para o Método Clássico que seria empregue, dependia com o tipo de método que melhor se adaptava ao maciço a ser escavado, de modo a obter-se os menores deslocamentos possíveis ou uma maior segurança.

Os grandes inconvenientes dos métodos clássicos são o tempo entre a instalação do suporte e as imperfeições no contacto entre o suporte e o maciço encaixante. Estas imperfeições devem-se aos tipos de materiais utilizados nos métodos clássicos, ou seja,

os escoramentos de madeira e as alvenarias, pois deixava-se um espaço entre o maciço escavado e o suporte. Este espaço permitia que o maciço sofresse variações de volumétricas, gerando deformações assimétricas nas alvenarias, causando danos ao maciço encaixante e os elementos de suporte.

Os suportes temporários de madeira eram responsáveis por violentas pressões de relaxação do maciço, causando grandes deformações, sobretudo na abóbada do túnel, enquanto o revestimento não estivesse concluído. (adaptado de Quirino [23], 2005).

Ilustração 7 - Pormenor construtivo do método Belga (Adaptado de LNEC [22], 1991).



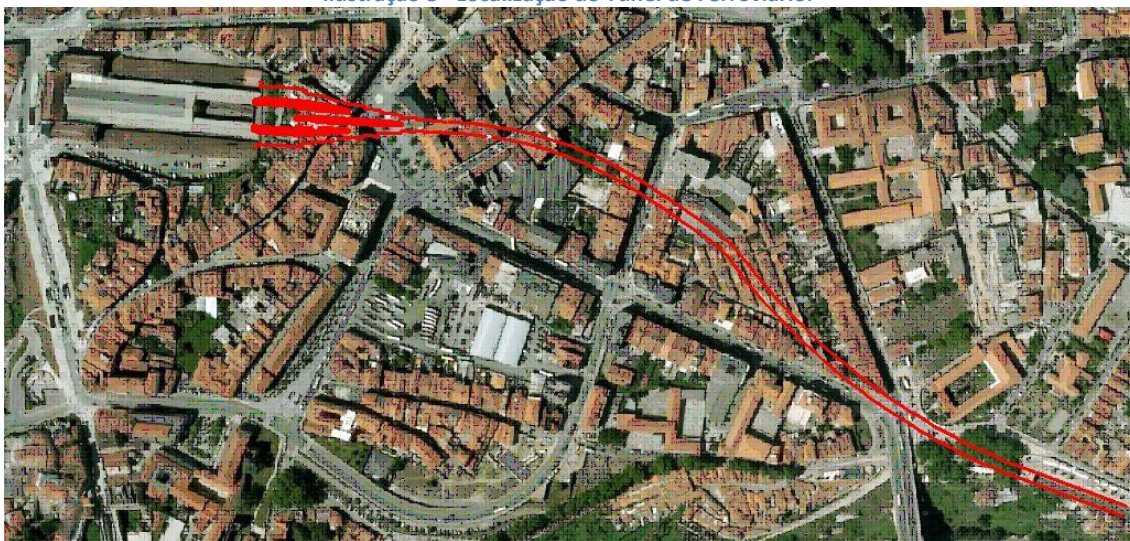
3. Informação geral sobre túneis

3.1. Informação Geral sobre o túnel em estudo

3.1.1. Características do Túnel e maciço envolvente

A obra em estudo é a Reabilitação de um Túnel Ferroviário, trata-se de um túnel com mais de cem anos, inaugurado no ano de 1896, situado na Linha do Minho, e é uma estrutura viária essencial para o estabelecimento de duas estações importantes.

Ilustração 8 - Localização do Túnel de Ferroviário.



Sendo o tráfego ferroviário actual muito intenso, com um conseqüente número de composições diárias muito alto (em média de aproximadamente 95 (nos dias úteis)), o número de utentes é também elevado, naturalmente proporcional ao número de composições.

O túnel tem uma extensão de sensivelmente 750 metros de comprimento.

Trata-se de um túnel singular possuindo vários tipos de secção com diferentes dimensões, a secção corrente tem uma altura média de 6,7 m e uma largura média de 8,5 m, prolongando-se desde da boca de entrada até cerca dos 615 m de comprimento.

A partir dos 615 m o túnel vai aumentando as dimensões e aos 638,20 m divide-se em duas galerias, galeria Ascendente e Descendente. Dos 679 m até aos 720 m, volta a subdividir-se em quatro galerias sendo as centrais designadas por galeria central ascendente (CA) e galeria central descendente (CD). A partir dos 720,00m e até à boca

de saída, ambas as galerias dão lugar a uma única, a galeria central (C), com um vão de 17m.

O túnel é totalmente revestido em alvenaria de blocos prismáticos de granito são a pouco alterado e com uma espessura média de 0,60 m. O maciço encaixante tem uma espessura de recobrimento variável entre um mínimo de 3m e um máximo de 14m.

O túnel foi escavado em fácies de granito alcalino de cor clara, de grão médio a grosseiro, de duas micas.

O maciço apresenta-se pouco alterado, com fracturas medianamente afastadas, entre 0,20 a 0,60 m. As diáclases apresentam-se, de um modo geral, fechadas e quando abertas não preenchidas.

3.1.2. Condições Técnicas - Dono de Obra

Nesta alínea apresentam-se as condições técnicas do Dono de Obra, para a elaboração do Projecto de Execução.

3.1.2.1. Nichos de Resguardo de Pessoal

Os Nichos destinados à segurança de pessoas, serão executados nos hasteais direito e esquerdo, distanciados entre si, no máximo, cerca de 25 ml e devem ter aproximadamente as seguintes dimensões:

- Comprimento - 2,00 ml;
- Altura - 2,00 ml;
- Profundidade - 1,00 ml.

A geometria será igual aos nichos já existentes no Túnel.

3.1.2.2. Câmaras de Serviço

Nos Túneis com comprimento igual ou superior a 600 metros, como é o caso, deverão ser executados, nos hasteais direito e esquerdo, aproximadamente ao meio do Túnel, com desfasamento de 50 metros duas Câmaras de Serviço, revestida em betão armado, com as seguintes dimensões:

- Comprimento 4,00 metros;

- Profundidade 2,50 metros.

A secção interior é constituída por hasteais verticais com 1,85 metros de altura e abóbada circular com 3,40 metros de raio sendo a altura da linha de fecho de 2,50 metros.

Estas câmaras servem para apoio de pequenas reparações no interior do Túnel.

3.1.2.3. Sustimento actual, Alegramento e Refechamento das Juntas de Alvenaria

Nos trechos onde se mantiver como sustimento a alvenaria já existente, e a degradação das características mecânicas das juntas atinjam 5 cm de profundidade, estas deverão ser devidamente refechadas.

O refechamento das juntas exige sempre o seu prévio alegramento e este deve ser feito com as maiores precauções para não se instabilizar a estrutura de suporte.

Deste modo, o Projectista deverá mencionar de forma muito precisa qual a tecnologia mais aconselhável (segundo os diversos estados e profundidade da degradação das argamassas) necessária ao alegramento prévio das juntas.

Quanto ao refechamento das mesmas, se o Projectista também propuser injeções com essa finalidade, o projecto deverá conter toda a informação necessária, sobretudo em relação aos cuidados a tomar pelo empreiteiro em termos de pressão e de ordenamento das injeções.

A constituição das respectivas argamassas deverá ser indicadas no Projecto.

Ainda no que se refere ao refechamento de juntas o Dono de Obra impõe desde já as seguintes limitações:

- a) O desguarnecimento (total ou parcial) deve ser sempre realizado por pequenas áreas não excedendo a possibilidade de o empreiteiro as poder refechar no mesmo período de trabalho.
- b) Será obrigatório colocar "cunhas" em todas as juntas cuja profundidade de desguarnecimento seja superior, por qualquer razão, a 0,10m, enquanto não se proceder ao refechamento.

3.1.2.4. Iluminação/Instalação Eléctrica

Em termos de iluminação, e uma vez que o túnel só se encontra iluminado até às primeiras agulhas, a iluminação será prolongada, quer na via A quer na via D, até ao sinal S2 (PK 2,000), partindo duas alimentações independentes desde o quadro eléctrico existente ao PK 2,500, que poderá ser alterado.

Ao longo do Túnel deverá ser instalado um sistema de iluminação de emergência, para que em caso de acidente ou falta de corrente o sistema de emergência ligue automaticamente, com a indicação da saída mais próxima, esse sistema deverá estar preparado contra incêndios.

Definir uma solução, para o quadro geral da instalação eléctrica do Túnel, que poderá ficar localizado junto ao gabinete do Chefe da Estação de São Bento, emitindo um sinal sonoro ou outro, para informar a existência de uma anomalia.

3.1.2.5. Boca de Entrada

Para efeitos do presente projecto, consideram-se como elementos da boca de entrada o muro de retorno, o muro tímpano, a moldura, o contraforte, o muro lateral esquerdo, o gradeamento por cima da moldura e o gradeamento lateral esquerdo existente ao nível da plataforma da via, nos seus primeiros 7m. Não será aqui considerado o muro de contenção de terras existente do lado direito.

As alvenarias devem ser limpas de impurezas, tintas e sujidade diversa. A vegetação será extraída, bem como todas as partes metálicas cravadas nas paredes, que actualmente se encontrem sem utilização. As juntas serão tratadas e no final, deve-se contemplar um tratamento das alvenarias, não agressivo, incolor e que as proteja contra a agressividade do ambiente externo, evitando a acumulação de sujidade e fuligem.

Os elementos de alvenaria partidos, nomeadamente os existentes no coroamento do parapeito, devem ser substituídos utilizando-se rocha idêntica à original.

O gradeamento existente por cima do parapeito será substituído, por outro de desenho nobre, sem pontas aguçadas e com estilo do final do século XIX. A estrutura terá que ser ligada à terra.

O gradeamento existente ao nível da plataforma da via será substituído, nos seus primeiros sete metros, seguindo-se em termos de traça, o que for definido para o gradeamento do parapeito.

3.1.2.6. Boca de Saída

Consideram-se aqui, para efeitos de projecto, como elementos da boca de saída, toda a fachada principal do Túnel, os muros de ala e de contenção de terras laterais e a zona do patamar existente após o parapeito até ao limite do terreno do domínio da estação.

As alvenarias devem ser limpas de impurezas, tintas e sujidade diversa. A vegetação será extraída, bem como todas as partes metálicas cravadas nas paredes, que actualmente se encontrem sem utilização. As juntas serão tratadas e no final, deve-se contemplar um tratamento das alvenarias, não agressivo, incolor e que as proteja contra a agressividade do ambiente externo, evitando a acumulação de sujidade e fuligem.

Os elementos de alvenaria partidos, nomeadamente os existentes no coroamento do parapeito, devem ser substituídos utilizando-se rocha idêntica à original.

Toda a zona do patamar existente a seguir ao parapeito até ao limite do terreno da estação, será convenientemente impermeabilizado e reformulado, se necessário, o sistema de drenagem e condução de águas, quer pluviais, quer resultantes das surgências existentes no talude frontal.

Pretende-se que sejam removidas todas as estruturas de construção posterior ao Túnel, existentes no patamar, incluindo a escada de acesso às traseiras do Hotel da Batalha.

Será executada a estabilização do talude frontal ao Túnel, prevendo o adjudicatário, caso considere necessário na sua proposta, a limpeza e desmatação, quer do patamar, quer do talude.

Deverá ser avaliada a natureza e a origem das águas das surgências existentes, através de análises químicas completas.

A zona do patamar após o parapeito tem estado ao abandono, servindo para depósito de lixo e para cultivo do solo aí existente por um confinante. Pretende o Dono de Obra terminar com a degradação aí existente, procedendo à reabilitação paisagística do patamar. Será realizada a limpeza do patamar até ao talude frontal, executada a sua

impermeabilização e construída uma vedação que impossibilite os confinantes de deitarem o lixo para o interior do domínio da estação. Terá, contudo, o Adjudicatário que considerar sempre a manutenção da palmeira aí existente.

3.1.2.7. Implementação de Medidas de segurança contra Incêndios

No âmbito da segurança deverá o Projecto considerar:

- Instalações de coluna seca com colocação de bocas de saída afastados de 50 em 50 metros dentro do Túnel;
- Estudo e instalação de ventilação junto das bocas do Túnel;
- Precaver acessibilidade rodoviária, via Estação lado Norte, para veículos de emergência até junto da alimentação da coluna seca.

3.1.2.8. Acessos

Estudar nas imediações da boca de entrada a criação de um acesso pedonal restrito. A localização aprovada pelo Dono de Obra, passará para a fase de projecto de execução a elaborar pelo Adjudicatário;

3.1.2.9. Monitorização do Túnel

O Túnel de São Bento ficará dotado, no final da obra, de um sistema de monitorização estrutural automática. A Memória descritiva, as condições técnicas e a estimativa de custos serão elaborados pelo Órgão de Túneis do Dono de Obra, que após a aprovação do estudo prévio de reabilitação do Túnel, serão entregues ao Adjudicatário, que terá a incumbência de os enquadrar no projecto de execução.

3.1.3. Descrição das anomalias

Como já foi referido, o método de construção utilizado na altura na construção dos túneis, método belga, poderá ser o grande responsável pelas actuais anomalias existentes nos túneis, refere-se a seguir as anomalias mais importantes, de acordo com o relatório oficial: (adaptado de LNEC [21], 1992)

- a) Forte desconsolidação do terreno escavado, resultante de sucessivas descompressões inerentes às etapas construtivas, sobretudo as relacionadas com a entivação e a descofragem;
- b) Imperfeição do fecho da abóbada;
- c) Existência de vazios mais ou menos significativos entre o extradorso do sustimento e o maciço encaixante;
- d) Juntas ocas.

Para além do método construtivo existem ainda outras causas, tais como:

- a) Qualidade dos materiais empregues;
- b) Alteração do terreno encaixante;
- c) Ambiente atmosférico;
- d) Natureza e intensidade do tráfego.

Como se trata de um túnel revestido na sua totalidade por blocos de alvenaria de pedra granítica e os trabalhos de reabilitação e reforço são variados, dividiu-se as questões em duas áreas principais, no interior do túnel e no exterior.

As questões que se colocam no interior do túnel relacionam-se com:

- O próprio revestimento e sobre este, o seu estado de conservação e ligação ao maciço encaixante;
- A drenagem das águas do maciço encaixante e da plataforma da via;
- A segurança, que abrange a questão de nichos para resguardo de pessoal de utentes e nichos de serviço, e ainda do facto de vir a conferir ao túnel pequenas plataformas de ambos os lados, que servirão de passadiços junto às nascenças dos hasteais ao nível do carril contíguo, bem como dotá-lo de rede de iluminação e tomadas;
- E a via propriamente dita, que no caso presente e adicionalmente será objecto de beneficiação e implicará o rebaixamento parcial da plataforma do túnel.

3.1.3.1. Interior do Túnel

Segundo o relatório dos Trabalhos de Campo da Prospeção Geológica-Geotécnica, que serviu para caracterizar relativamente ao revestimento as questões seguintes:

- Resistência mecânica da pedra do revestimento;
- Resistência mecânica da rocha do maciço encaixante;
- Espessura dos revestimentos;
- Dimensões dos vazios entre revestimento e maciço encaixante;
- Levantamento do estado da alvenaria, blocos, juntas de argamassa, fissuras, rachas, deformações e infiltrações.

Questões estas que se caracterizam seguidamente.

3.1.3.1.1. Resistência mecânica da pedra do revestimento

Os ensaios efectuados sobre as amostras recolhidas, estão patentes no referido relatório e transcrevem-se para a presente memória, como segue, não podendo ser, contudo, exemplo de todo o revestimento por não constituírem amostra suficiente:

Quadro 3 - Valores obtidos dos ensaios de compressão simples do revestimento.

| Provete N° | PL | PM | Amostra N° | Prof. (m) | COMPRESSÃO SIMPLES | | |
|------------|----|-----|------------|-------------------|---------------------------|--------------|----------------------------|
| | | | | | Secção (mm ²) | Força F (kN) | Tensão de Ruptura Qu (MPa) |
| 1 | 1 | 388 | 1.1-REV | Revestimento 0,60 | 3,739 | 215,9 | 58,0 |
| 3 | 4 | 444 | 2.2-REV | Revestimento 0,55 | 3,739 | 40,8 | 11,0 |
| 4 | 4 | 368 | 3.1-REV | Revestimento 0,60 | 3,739 | 47,2 | 12,5 |
| 6 | 5 | 281 | 4.1-REV | Revestimento 0,60 | 3,739 | 250,7 | 67,0 |
| 8 | 2 | 455 | 6.1-REV | Revestimento 0,50 | 3,739 | 71,9 | 19,5 |

As tensões de ruptura determinadas nos ensaios, constituem elementos base para os modelos de cálculo.

Porém, pode-se desde já inferir que se trata de rocha com características resistentes baixas/satisfatórias para o desempenho da função que lhe está conferida, apresentando resultados de tensão de ruptura entre ~ 11 MPa e ~ 67 MPa, ou seja muito díspares.

3.1.3.1.2. Resistência mecânica de rocha do maciço encaixante

A amostragem sobre este elemento apresenta igualmente resultados baixos / satisfatórios variando a tensão de ruptura entre ~ 11 MPa e ~ 58 MPa, tendo apenas sido

detectado um provete com ~ 5 MPa, mas que se assume estar alterado e não ser contabilizado. Esta amostra foi recolhida a cerca de 388 m da boca do lado da Campanhã no hasteal direito a 1,50 m acima dos carris.

Quadro 4 - Valores obtidos dos ensaios de compressão simples do maciço.

| Provete N° | PL | PM | Amostra N° | Prof. (m) | COMPRESSÃO SIMPLES | | |
|------------|----|-----|------------|---------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| | | | | | Secção (mm ²) | Força F (kN) | Tensão de Rotura Qu (MPa) |
| 2 | 1 | 388 | 1.4-Mac | Maciço 0,63-1,18 | 3,739 | 18,1 | 5,0 |
| 5 | 4 | 368 | 3.5-Mac | Maciço 0,70-0,80 | 3,739 | 97,7 | 26,0 |
| 7 | 5 | 281 | 4.3-Mac | Maciço 0,70-1,14 | 3,739 | 40,6 | 11,0 |
| 9 | 2 | 455 | 6.5-Mac | Maciço 0,68-1,31 | 3,739 | 216,9 | 58,0 |

3.1.3.1.3. Espessura dos revestimentos

A espessura do revestimento, pela amostragem obtida apresenta alguma regularidade longitudinal, variando radialmente em média entre 0,50 m a 0,75 m. A menor espessura obteve-se a meia altura da abóbada, enquanto a maior no provete retirado no fecho da abóbada.

3.1.3.1.4. Dimensões dos vazios entre revestimento e maciço encaixante

A determinação da dimensão dos vazios entre o revestimento e o maciço encaixante, foi efectuada através de meios físicos mensuráveis, procedendo à furação do revestimento existente a níveis e localizações pré-definidas a fim de recolher informação, por meio de inspecção endoscópica.

O levantamento em si encontra-se explícito nos desenhos referidos anteriormente constantes no relatório dos Trabalhos de Campo – Prospecção Geológica - Geotécnica.

Pode-se verificar pelo ensaio realizado que o revestimento na abóbada não está descolado do maciço encaixante, apresentando vazio de 0,00m. Contudo é somente uma amostra pelo que não é representativo do restante túnel.

No caso dos rins, o revestimento apresenta-se descolado, podendo-se identificar vazios entre 0,10m e um máximo de 0,30m.

Finalmente nos hasteais ao nível de 1,50m acima da mesa de rolamento, verificam-se descolamentos mas de menor proporção, cifrando-se em 0,05m.

3.1.3.1.5. Levantamento do estado da alvenaria, blocos, juntas de argamassa, fissuras/rachas, deformações e infiltrações.

Este levantamento foi levado a cabo, com base no levantamento laser efectuado pela Dono de Obra, nomeadamente planta visual e perfis transversais e ainda nas inspecções realizadas pelo LNEC, constante dos relatórios LNEC [21] e LNEC [22], no relatório de inspecção visual do Dono de Obra e naturalmente na inspecção realizada pelo Gabinete de Projecto ao túnel que permitiram identificar com maior pormenor as anomalias e proceder ao seu registo.

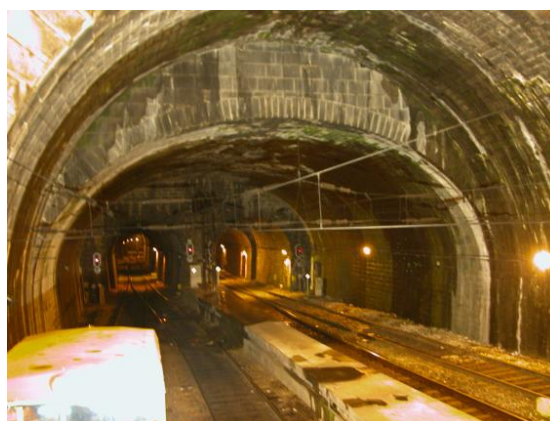
Observou-se, durante a prospecção efectuada, que o revestimento se encontra pouco alterado na sua generalidade, exceptuando-se algumas zonas com o revestimento erodido e alguns blocos partidos.

O revestimento encontra-se também com manchas decorrentes da existência de água/humidade (de cor esbranquiçada), marcas de lamas nos hasteais, infiltrações com profusão de musgos, estalactites e água corrente com crescendo na aproximação da Boca de Saída, e zonas cobertas por camadas de material de cor negra, que dificultam a observação do revestimento no que se refere a fissuras, que ainda assim não foram registadas com frequência, como mostram a seguintes ilustrações, Ilustração 9 e 10.

Ilustração 9 - Manchas decorrentes da existência de água/humidade, marcas de lamas nos hasteais.



Ilustração 10 - Infiltrações com profusão de musgos, estalactites e água perto da Boca de Saída.



Quanto às juntas, de uma forma geral, na abóbada e hasteais encontram-se em estado razoável, sendo verificado, um pouco em geral, juntas erodidas (superficial e profunda), sendo que nas bocas e no final do túnel se encontram zonas com juntas desguarnecidas.

Existem zonas da abóbada que foram revestidas a betuminoso (presumindo-se que para evitar infiltrações), principalmente no apoio dos aparelhos de suporte da catenária, na quase totalidade do fecho das abóbadas dos túneis de saída CA e CD, e pontualmente no troço final do túnel.

Quanto à drenagem original do túnel não se verifica existência de drenos tipo barbacãs, existindo dois colectores longitudinais laterais ao nível da via. Do levantamento topográfico realizado detectou-se que o perfil longitudinal do túnel é convergente para o seu interior entre os 600m e os 750m, verificando-se no local que neste intervalo as águas não são escoadas para o exterior.

Principalmente no intervalo entre os 460m e os 520m foram criados canaletes externos radiais e em “árvore” de drenagem das águas emergentes no revestimento, como mostra a ilustração, Ilustração 11.

Ilustração 11 - Canaletes externos radiais e em “árvore” de drenagem das águas entre os 460m e os 520m.



Quanto às eventuais deformações e fissuração no arco central na Boca de Saída admite-se que sejam originadas pelo processo construtivo utilizado e ao seu considerável vão, aproximadamente 17m.

3.1.3.2. Exterior do Túnel

A zona das bocas dos túneis foi caracterizada através dos seguintes parâmetros:

- Topografia
- Condicionantes locais

Topografia.

Nesta situação a topografia, constitui um dado importante, destacando-se o levantamento da zona exterior às duas bocas do túnel.

Na Boca de Entrada, dado ser necessário dotar o Túnel de saída de emergência para o exterior, em túnel, que será adaptada à morfologia do terreno existente, e na Boca de Saída pela requalificação necessária na área superior à Boca.

Condicionantes Locais

O estado dos muros de testa e muros adjacentes, paralelo à linha, junto das bocas na sua proximidade, é bom. Será necessário efectuar limpeza e substituição/reparação de alguns blocos fissurados/partidos.

4. Técnicas de Reabilitação Utilizadas

4.1. Reabilitação não Estrutural

A reabilitação não estrutural inclui trabalhos de reparação de anomalias associadas à humidade ou a outros agentes agressivos aos elementos que constituem o revestimento em alvenaria do túnel. Há muito se utilizam técnicas e métodos de recuperação que, no entanto, não saem dos métodos tradicionais.

Basicamente estes métodos tradicionais dividem-se em técnicas de limpeza e protecção, sendo:

- Limpeza de alvenaria;
- Técnicas de protecção e reparação.

Quanto aos métodos de limpeza de alvenaria temos (adaptado de Appleton [8]):

4.1.1. Limpeza mecânica

Esta técnica é indicada para zonas pontuais e de pequenas dimensões, devido ao facto de este processo ser moroso e de uma grande minuciosidade. Consiste na remoção de detritos (poeiras, tintas, lamas...) e na limpeza manual da alvenaria. Para este método recorre-se a utensílios, como fresas, escovas mecânicas e equipamentos eléctricos de pequena potência.

4.1.2. Limpeza com água à pressão

Este método baseia-se em utilizar projecção de água à pressão para remover as sujidades existentes. Existem três tipos de pressão:

1. Pressão baixa: 800 a 2100 kPa;
2. Pressão média: 2100 a 4800 kPa;
3. Pressão alta: mais que 4800 kPa.

A pressão que se utiliza depende de obra para obra e necessita de um estudo criterioso/exaustivo para se determinar qual a pressão a utilizar.

4.1.3.Jacto de areia por via húmida

Este método de limpeza é particularmente eficiente em superfícies com ondulações e irregularidades, e consiste na projecção de partículas abrasivas muito finas por via húmida.

É um método que é vantajoso em relação á limpeza com água à pressão, pois evita a reacção química com alguns sais quando as alvenarias são de tijolo.

Quantos aos métodos de protecção de alvenaria temos:

4.1.4.Hidrofugação

Esta técnica consiste na aplicação de uma camada superficial de produtos acrílicos, silicones ou produtos de protecção aos agentes biológicos, na alvenaria;

4.1.5.Manutenção:

A manutenção periódica é uma técnica de protecção muito eficaz ao nível da identificação de patologias e anomalias, que possam agravar a vida útil do suporte. Para o desenrolar destas tarefas, além das inspecções visuais, também a realização de ensaios e de pequenas tarefas (tais como: tratamento de juntas, tratamentos de protecção, etc.), contribuem significativamente para a conservação do suporte;

4.1.6.Tratamento de juntas:

Esta solução divide-se fundamentalmente em 3 fases:

- 1) remoção de materiais não funcionais com ferramentas manuais, escopros ou martelos pneumáticos de baixa potência;
- 2) limpeza da juntas com ar comprimido ou escovas, e enchimento parcial dos vazios existentes com argamassa adequada (idêntica à de assentamento) ao suporte;
- 3) refechamento superficial, e limpeza do paramento.

4.2. Reabilitação Estrutural

Após a análise das diversas anomalias e das suas causas é necessário proceder à intervenção mais adequada recorrendo a técnicas de consolidação com o objectivo de

repor a capacidade resistente inicial, ou proceder a técnicas de reforço cuja função é a de aumentar a capacidade de carga ou a limitação de deformações da estrutura. Para tal referencia-se as seguintes técnicas:

4.2.1.Refechamento das Juntas

O refechamento das juntas é uma técnica vocacionada para o restabelecimento da integridade das paredes e/ou melhoria da sua protecção. Os seus efeitos reflectem-se ainda em incrementos da resistência mecânica. Esta solução preconiza a substituição da argamassa das juntas, degradadas. Consiste na remoção parcial da argamassa (extracção e limpeza da argamassa das juntas, numa profundidade de 5 a 7 cm); lavagem das juntas abertas, com água a baixa pressão e, finalmente, na reposição das juntas.

4.2.2.Drenagem – rebaixamento do nível freático

Quando o nível freático sobe, originando um aumento das pressões hidrostáticas não previstas, a drenagem por gravidade é o método mais expedito para a resolução. Esta técnica consiste em realizar furos no maciço, colocando geodrenos sub-horizontais, diminuindo as pressões hidráulicas actuantes. Estes drenos devem ser executados de forma radial, e em quicôncio.

4.2.3.Injecções de consolidação da alvenaria com o maciço

A técnica de consiste na introdução de caldas, através de furos previamente realizados nos paramentos das alvenaria, para preenchimento de vazios interiores e/ou selagem de fissuras, melhorando as características físicas e mecânicas do material da alvenaria.

Os tipos de caldas utilizadas são: caldas de cimento estabilizadas por bentonite ou cal, caldas de cimento especiais, caldas de silicato de potássio ou de sódio e resinas epoxídicas.

A injeção pode ser efectuada por gravidade ou a baixa pressão de modo a não provocar efeitos negativos no revestimento existente.

4.3. Escavação de Túneis

Quando se realiza uma escavação de um túnel, todo o maciço tende a deslocar para a escavação que foi realizada. Neste projecto irá ser realizado, como já foi referido, um túnel de acesso lateral, em que o sustimento primário e o sustimento secundário será constituído pela combinação dos seguintes elementos:

4.3.1.Pregagens

São elementos estruturais em forma de barras ou tubos, geralmente constituídos de fibras de vidro, tubos de PVC ou aço. São instalados na face lateral de escavação do túnel por meio de cravação ou perfuração e preenchimento com cimento ou resina. Sua função é fornecer tensão de confinamento horizontal, aumentando a resistência ao corte do solo.

4.3.2.Betão Projectado

Esta técnica é aplicada em reparação de estruturas de betão armado, ou a consolidação e reforço de alvenaria. A aplicação de betão projectado dispensa o uso de cofragens e permite a sua aplicação nas situações de difícil acesso, garantindo uma excelente aderência e durabilidade. De salientar ainda, que projecção confere ao betão a capacidade de se auto-compactar em sucessivas camadas.

Para conferir uma melhor resistência à tracção ao betão, destacam-se duas soluções:

- Adição de fibras metálicas ao betão;
- Fixação ao suporte de rede electrossoldada ou rede de fibra de vidro.

Esta técnica combina-se frequentemente com a de pregagens.

A técnica de betão projectado pode ser executada por um sistema pneumático, por via seca ou húmida. Na via seca a água é adicionada apenas na extremidade da mangueira de projecção, permitindo a grande velocidade de projecção uma excelente compactação.

As técnicas descritas neste capítulo são as que foram propostas para a reabilitação e beneficiação deste túnel, é contudo importante dizer que existem muitas técnicas que não foram aqui referenciadas, que também contribuem para a reabilitação estrutural e não estrutural.

5. Processos Construtivos

Este capítulo pretende, tal como o nome indica, descrever os processos construtivos da intervenção a que o túnel está sujeito. A definição dos processos construtivos e da ordem em que são realizados surgem após uma análise cuidada das características da obra e do maciço.

Assim sendo os processos construtivos decorreram da seguinte forma:

- Trabalhos no Interior do Túnel:
 - Limpeza das superfícies;
 - Alegramento e refechamento das juntas de alvenarias;
 - Injecção de colagem do revestimento;
 - Substituição de blocos;
 - Rede de drenagem do maciço encaixante;
 - Rede de drenagem da Plataforma / Passadiços;
 - Nichos de resguardo de pessoal;
 - Trabalhos Finais no interior do túnel.

- Trabalhos no Exterior do Túnel:
 - Túnel de Acesso Lateral e Passadiço.

De seguida, transcreve-se do Caderno de Encargos do projecto de execução, a descrição dos processos construtivos.

5.1. Limpeza das superfícies

A limpeza das superfícies do revestimento será executada por meios abrasivos mecânicos e/ou por jacto de água sobre pressão da ordem dos 4800 kPa.

Se os níveis de penetração das sujidades forem bastante profundos, se providenciará a meios mecânicos, abrasivos mais poderosos, potenciando as anteriores.

5.2. Alegramento e refechamento das juntas de alvenarias;

As juntas da alvenaria serão alegradas em 0,15 m de profundidade, sendo obrigatória a aplicação de cunhas entre blocos da alvenaria à medida que se vai procedendo ao desguarnecimento da argamassa das juntas.

O desguarnecimento das juntas da alvenaria será executado por meios mecânicos, por martelo, munido de guilhos apropriados à espessura da junta e à profundidade a atingir.

Eventualmente poderá ser encarada a hipótese de proceder ao desguarnecimento das juntas por jacto de água sobre pressão que neste caso será superior aos 4800 kPa, para os casos onde o material da junta se apresente pulverulento ou pastoso. No entanto este método deixa pouca margem para o controlo da profundidade de desguarnecimento.

Uma obrigatoriedade é que as áreas desguarnecidas não poderão ultrapassar as correspondentes às possíveis de serem refechadas num mesmo período de trabalho, evitando assim qualquer destabilização estrutural do túnel.

5.3. Injecção de colagem do revestimento;

As injecções têm início com a furação do revestimento em acordo com o equipamento de injecção. As injecções terão início na base dos hasteais até ao fecho da abóbada

Este furos serão executados por caroteamento, rotação ou roto-percussão, segundo os estados das alvenarias e os diâmetros utilizados serão de sensivelmente de 50 mm.

A composição da calda de cimento utilizada no processo de injecção será a seguinte:

- 575 Kg de cimento
- 575 Kg de areia siliciosa 0 – 1 mm
- 575 l de água
- 30 Kg de bentonite.

Com uma resistência mecânica expectável de:

- Resistência aos 7 dias: 8 MPa;
- Resistência aos 28 dias: 20 MPa.

É de referir que será elaborado um mapeamento dos furos e se realizarão inspecções endoscópicas em pelo menos 50 % dos furos registando-se vários elementos, como por exemplo, localização e datas da sua execução e observação, espessura do revestimento, espessura de vazios, etc.

5.4. Substituição de blocos

As operações correspondentes a esta actividade pressupõem uma avaliação prévia dos blocos do revestimento, a fim de determinar o número de unidades a substituir e se estão isolados ou se formam pequenas áreas.

Nos casos de blocos isolados, haverá que remover a totalidade da argamassa das juntas, e após retirar o bloco, calçar essa descontinuidade entre blocos vizinhos.

No caso de se optar por preencher esse espaço livre por novo bloco, depois de aplicado com cunhas entre os blocos fronteira, será aplicada argamassa nas juntas. Após esta operação serão aplicadas injeções de calda de cimento para preenchimento do restante das juntas e colagem do bloco pelo extradorso ao maciço.

Em qualquer dos casos a resistência à compressão dos blocos de alvenaria de granito, travada nas duas direcções, nunca deverá ser inferior a 33,6 MPa.

As características mecânicas destes serão sempre comprovadas através de ensaios de compressão simples.

5.5. Rede de drenagem do maciço encaixante;

A actividade iniciar-se-á pela abertura de caixas na alvenaria, com as dimensões previstas nas peças desenhadas 0,15 m de largura e 0,10 m de profundidade, medidas no limpo. Estas caixas tem por objectivo, acomodar a caleira radial de condução das águas à rede geral.

As faces laterais das caixas serão abertas a disco diamantado, na profundidade requerida. O material entre rasgos consecutivos de uma mesma caixa, será demolido a martelo, na profundidade estabelecida nas peças desenhadas. A regularização das superfícies do fundo da caixa será executada por reboco com argamassa hidrófuga.

Segue a operação de furacão a \varnothing 50 mm com as orientações e comprimentos definidos nas peças desenhadas e por fim a aplicação de tubagem em P.V.C. \varnothing 40 mm, com rasgos, encamisados a geotêxtil, pelo interior dos furos já executados e com o comprimento dos mesmos.

Após estas operações serão aplicadas, mangas flexíveis no interior das caixas, ou ao longo do perímetro do intradorso do revestimento, fixas por sistema homologado pelo fabricante e nos casos em que existe caixa aberta na alvenaria.

Sempre que haja ligação entre tubos de captação (\varnothing 40 mm) e tubos radiais colectores serão montadas caixas de visita com as dimensões mínimas de 0,15 m em profundidade, 0,50 m de comprimento e 0,20 m de largura.

5.6. Rede de drenagem da Plataforma / Passadiços;

A rede de drenagem da plataforma da via foi concebida de molde a não requerer trabalhos na totalidade da mesma, levando a posicionar o colector em perfil longitudinal a meia secção abaixo do fundo da plataforma.

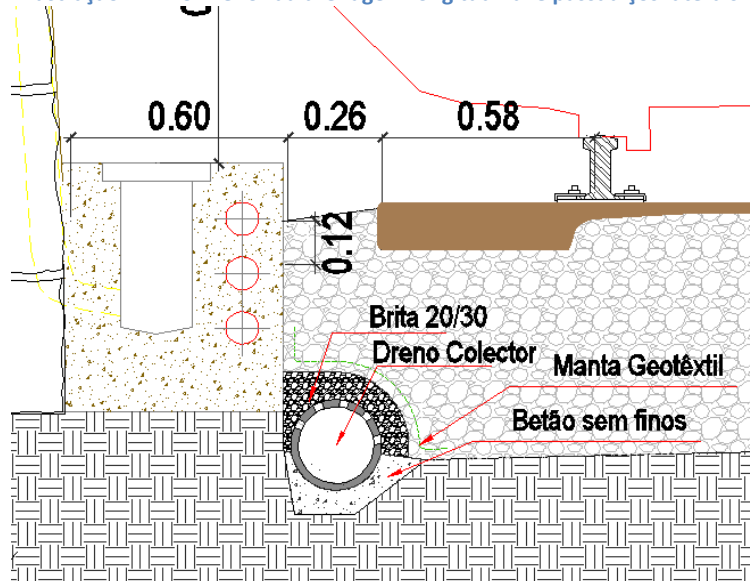
Esta actividade envolve de início trabalhos de escavação em rocha junto à fundação do hasteal direito e escoramentos. Estas operações realizar-se-ão por trechos sequenciais, no máximo de 3,00 m cada e espaçados entre si de um mínimo de 6,00 m.

Será depois montada a rede de drenagem propriamente dita, o dreno colector, que envolve operações de aplicação de betão no seu assentamento, betão sem finos, com 300 kg de cimento por m³ de brita 20/30, aplicação de brita 20/30 no seu envolvimento, mantas de geotêxtil e reposição do balastro e desmontagem do escoramento.

Serão ainda realizadas caixas de visita, de forma a garantir o funcionamento do sistema, em condições de vir a proceder às normais limpezas do colector de águas da plataforma. Os afastamentos entre caixas consecutivas são aprox. de 40 m.

Apesar de não fazer parte deste sistema de drenagem, devido a uma natural semelhança entre a caixa para visita de cabos e a precedente, é aqui referida, a caixa de visita de cabos, porém só estão projectadas três caixas destas, como mostra a ilustração, Ilustração 12.

Ilustração 12 - Pormenor da drenagem longitudinal e passadiços laterais.



Terminadas as operações anteriores serão executados os passadiços laterais juntos ao pé de hasteais, que por sua vez contêm as caleiras de condução das águas do maciço encaixante e do lado esquerdo serão também embebedos três tubos de P.V.C. para passagem de futuros cabos.

Estes trabalhos envolvem actividades de remoção e reposição de balastro, eventual escavação em rocha.

5.7. Nichos de resguardo de pessoal

5.7.1. Nichos existentes

O túnel actualmente possui nove nichos de resguardo. As dimensões desses nichos ficam aquém das actuais adoptadas pelo Dono de Obra.

Os existentes sofrerão obras de beneficiação com o propósito de os integrar no sistema de segurança do próprio túnel.

Irá se realizar a limpeza das superfícies interiores e eventual regularização das mesmas.

Execução de uma moldura em argamassa, criando uma faixa com 0,30m de largura, à semelhança das que se executarão nos novos.

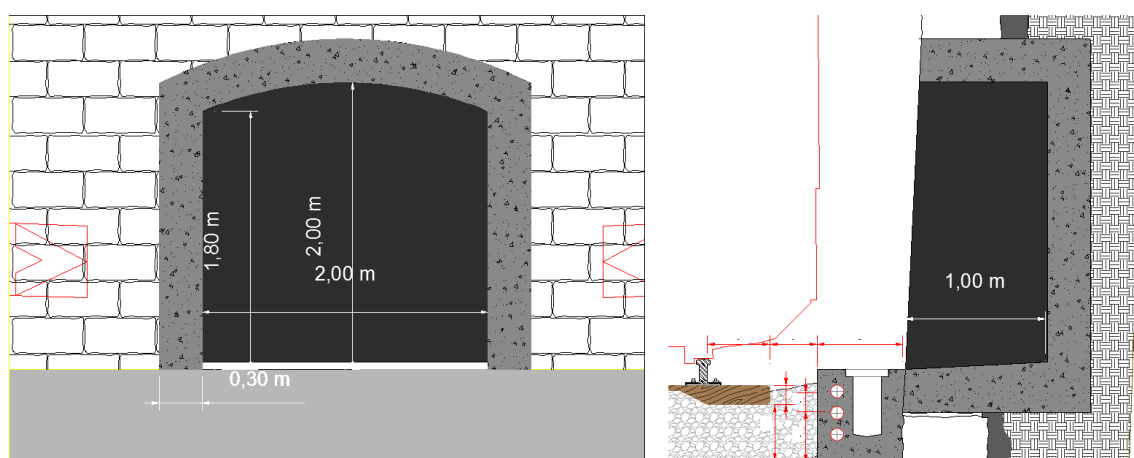
Durante a execução dos passadiços, refaz-se a soleira dos nichos com argamassa de alta resistência, na área existente, com pendente para a plataforma do túnel de 2% e

espessura mínima de argamassa de 5cm. Esta “capa” deverá ser dotada de armadura de pele e será encastrada no contorno do interior do nicho.

5.7.2. Nichos novos a executar

Os nichos de resguardo de pessoal previstos executar, Ilustração 13, inserem-se nas medidas de segurança praticadas por Dono de Obra, em que o afastamento entre órgãos de segurança deste tipo é de ~ 50 m. No comprimento do túnel de cerca de 753 m, pelo que se previu a execução de vinte cinco novos nichos localizados ao longo do túnel, mantendo assim a modulação requerida de afastamentos de 25 m entre nichos.

Ilustração 13 - Geometria dos novos nichos a executar.



A execução dos nichos envolve as seguintes operações:

- Corte da alvenaria a disco diamantado;
- Desmonte do revestimento numa área que circunscreve a do nicho em alçado;
- Montagem de escoramento do revestimento, no decurso da operação anterior;
- Demolição do maciço encaixante no volume correspondente à implantação do nicho incluindo o eventual escoramento dessa zona;
- Caso se demonstre necessário, se o maciço se apresentar muito fracturado será feito um revestimento de betão projectado nessas superfícies no imediato à sua demolição;
- Fornecimento e montagem de armaduras;
- Fornecimento e montagem de cofragem;
- Betonagem do nicho;

A classe de betão a utilizar é o C30/37 e o aço A500NR.

5.8. Trabalhos Finais no interior do túnel.

Os trabalhos finais envolvem actividades de pintura da totalidade das superfícies, sinalização dos nichos, montagem das redes de incêndio, montagem de redes eléctricas e da rede de monitorização.

5.8.1.. Pintura dos da totalidade das superfícies e dos nichos

- A protecção será feita por pintura com produto impregnante, transparente do tipo “SIKAGARD 680 BETONCOLOR” aplicado por pistola em duas de mãos. De igual forma se protegerão as superfícies de betão projectado actualmente existentes.
- A aplicação da pintura terá no mínimo duas demãos, será aplicada à pistola e obrigatoriamente seguirá o prescrito nas condições técnicas do fabricante do produto.
- A escolha dos produtos protectores a aplicar, serão sempre suportadas pelo fornecimento das especificações do fabricante e a execução de amostras “in situ” de acordo com as instruções do fabricante.

5.8.2. Sinalização dos nichos de resguardo de Pessoal e de emergência ao longo do túnel.

A sinalização de indicação dos nichos de resguardo de pessoal ou de outros sentidos de resguardo, ou fuga, foi concebida de forma a facilitar a sua identificação e localização por quem necessite de se resguardar, ou fugir infira no imediato e sem dúvidas em que sentido se deve deslocar.

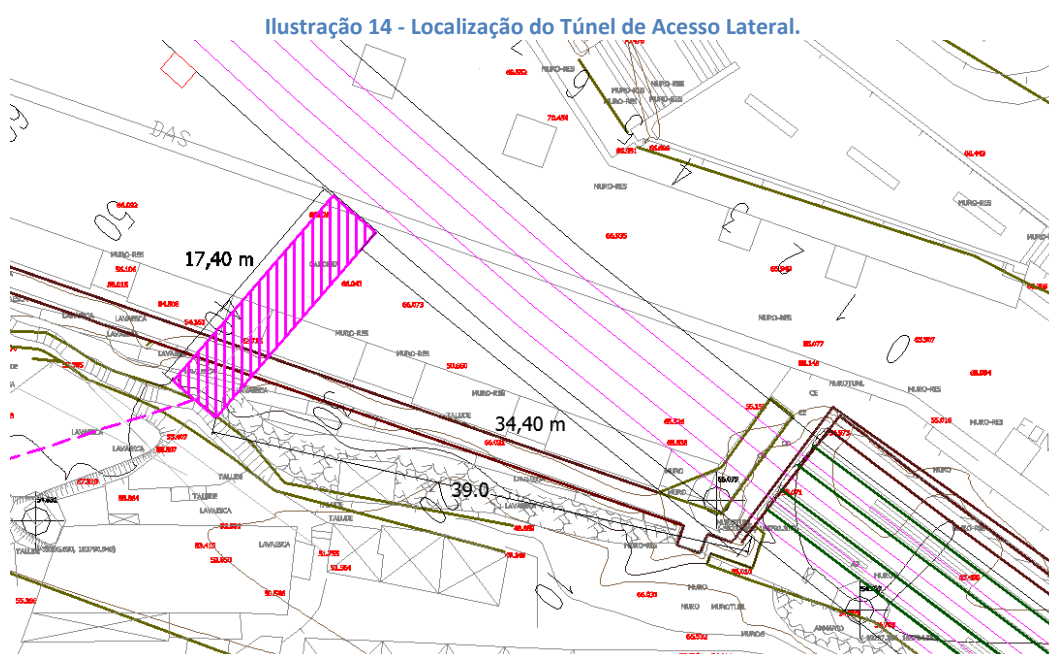
A referida sinalização foi materializada por faixas com 0,50m de espessura, possuindo setas desenhadas, faixas estas que têm pendente para os nichos, ou para as saídas do túnel. As dimensões destes elementos encontram-se devidamente explícitas nas peças desenhadas correspondentes.

As faixas já referidas serão pintadas na cor branca, sobre superfície previamente regularizada a argamassa, de forma a criar um plano único ao longo da faixa. É importante esta regularização da superfície das paredes do túnel ao longo da faixa garantindo uma adequada leitura da sinalização.

A sinalização baseou-se em grafismo de todo conhecido, em forma de “setas” sequenciais direccionadas para o nicho de ambos os lados ou para a saída do túnel. Para além destas indicações, a “moldura” do nicho será também pintada na cor branca. Quanto às setas terão cor laranja.

5.9. Túnel de Acesso Lateral e Passadiço.

Como já foi referido, sensivelmente aos 34m do túnel (a partir da boca de entrada) será criada uma saída pedonal de emergência em túnel, com 4m de largura e 3 de altura escavado no maciço rochoso, com cerca de 18m de extensão, Ilustração 16.



Este túnel iniciar-se-á com a marcação topográfica da frente de escavação (Ilustração 15) que será executada com avanço secção parcial (frente e rebaixo) com 1,5m 3m de comprimento, como mostra a Ilustração 16.

Ilustração 15 - Marcação topográfica do Túnel de Acesso Lateral.
Fase 1

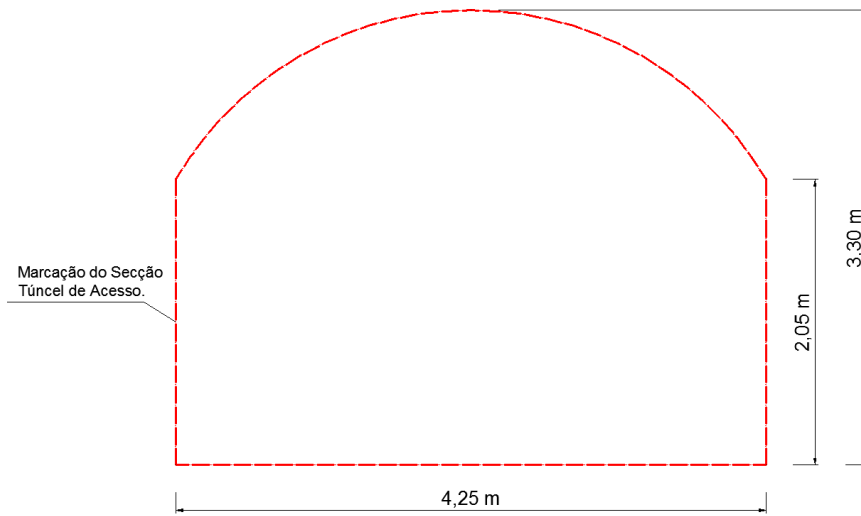


Ilustração 16 - Sequência de Execução do Túnel de Acesso.

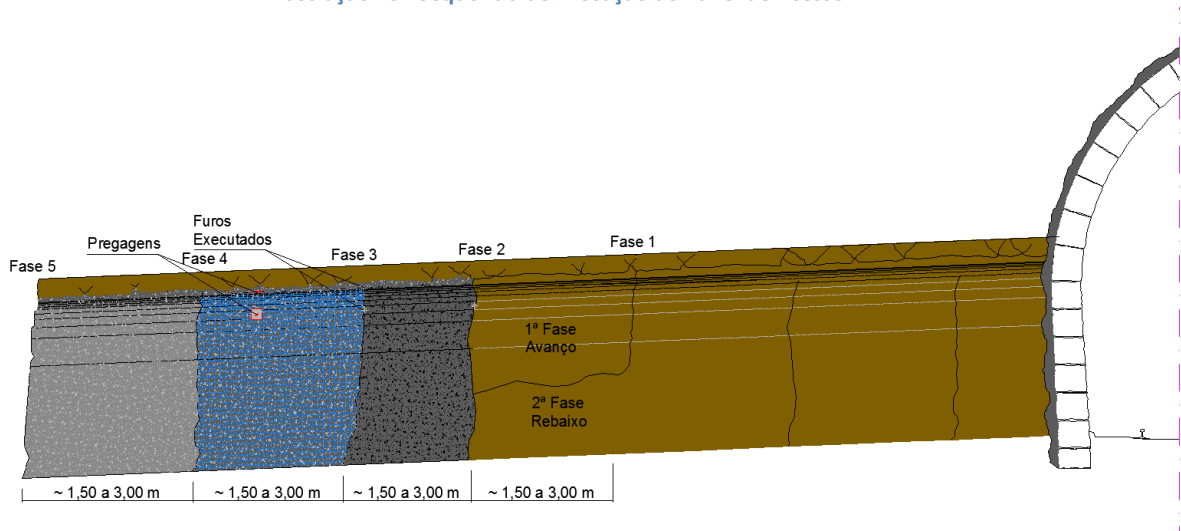
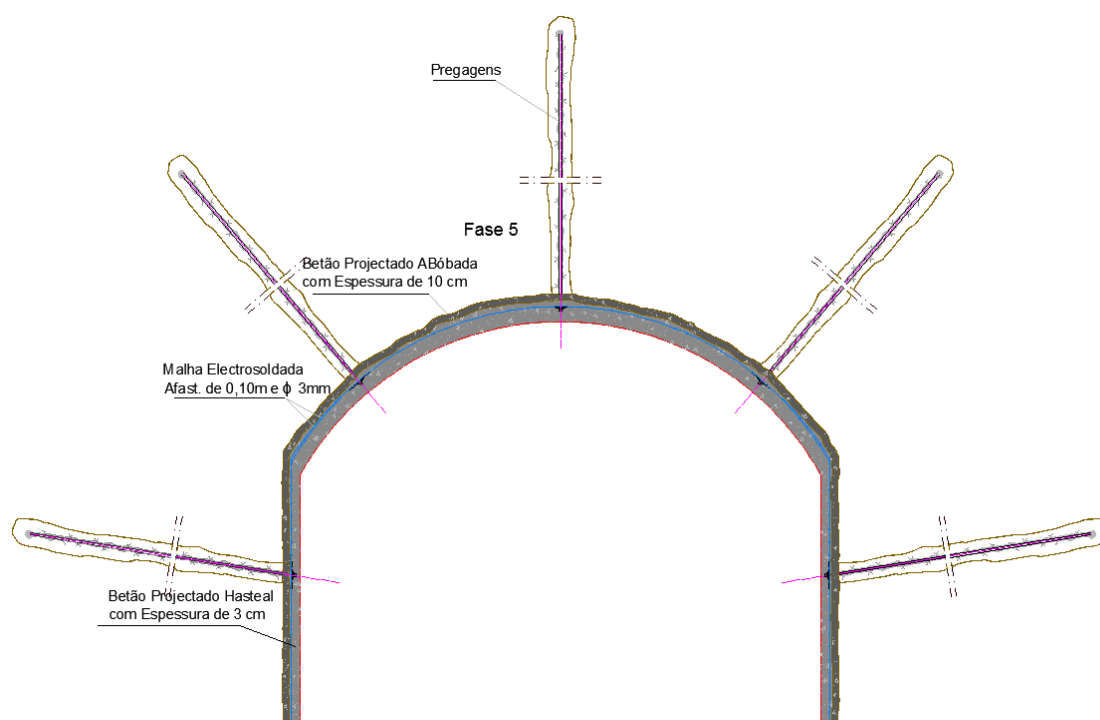


Ilustração 17 - Geometria da Secção do Túnel de Acesso.



Após cada desmonte efectuado, serão executadas pregagens espaçadas transversalmente entre si cerca de 2m e longitudinalmente cerca de 3m, como mostra a ilustração, Ilustração 17.

Serão instaladas em furos previamente executados e nas profundidades especificadas nos desenhos, com o diâmetro que melhor garanta o manuseamento para enchimento por injeção. O diâmetro mínimo dos furos será maior que o diâmetro da pregagem (mínimo de 20 mm) a instalar.

Os furos deverão ser limpos de todas as aparas de perfuração, lamas ou fragmentos de rocha solta. A instalação da pregagem será feita imediatamente a seguir à perfuração e preparação do furo, no espaço máximo de 3 horas.

Antes da instalação da pregagem (varão), o furo será injectado com argamassa de cimento através da introdução do tubo de injeção até ao fundo, sendo progressivamente retirado à medida que o furo fique preenchido. A agulheta será mantida no seio da argamassa enquanto o tubo é retirado, para que o ar escape enquanto o furo é injectado. A pregagem só depois deste preenchimento, é colocada no interior do furo.

No caso de furos com dificuldade em manter a estabilidade da superfície interior, ou parcialmente desmoronado ou na presença de elevada quantidade de água, deverá usar-se o sistema de injeção com tubos de plástico.

Nestes casos, após a abertura do furo procede-se à instalação da pregagem, sendo a boca do furo selada com argamassa de cimento de presa rápida. Em seguida, a calda é injectada através de um dos tubos de plástico, enquanto o outro serve de purga. Em furos ascendentes, o tubo comprido é usado como purga e o curto para injeção; em furos descendentes, a calda é injectado pelo tubo comprido, servindo o curto para purga. O furo considera-se cheio quando a calda começar a sair pelo tubo de purga.

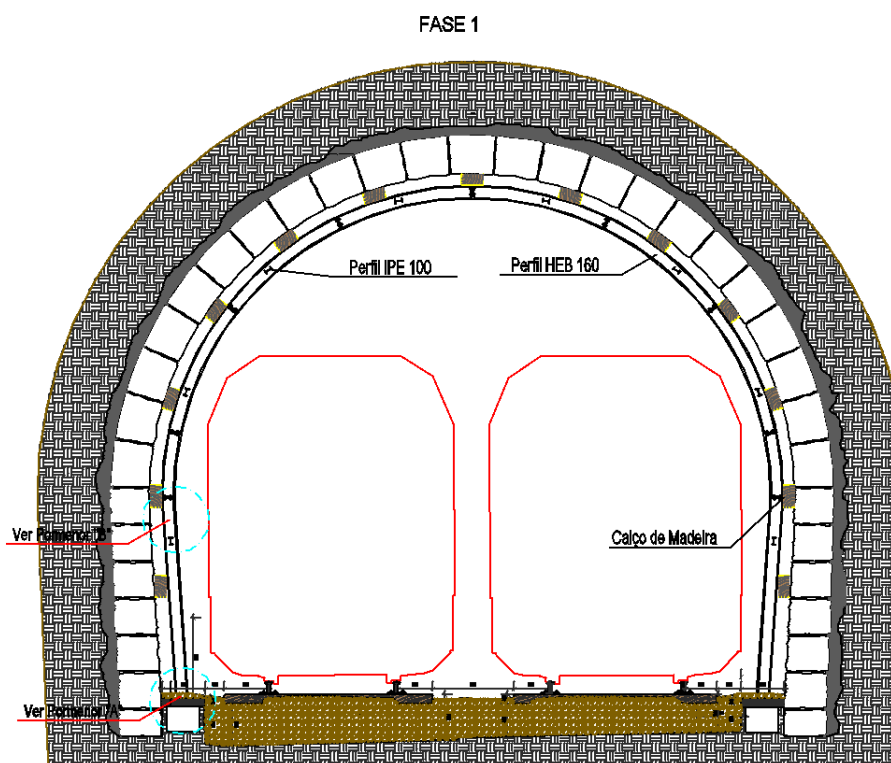
A porca das pregagens injectadas tem de ser apertada depois da instalação, para que a placa fique solidarizada contra o terreno. Esta operação tem de ser executada o mais rápido possível, depois da argamassa de injeção ter ganho suficiente resistência.

No caso de haver pouco espaço de trabalho e/ou de pregagens compridas, será permitida a sua ligação, aceitando-se que sejam divididas em duas partes. Contudo, a capacidade de carga destas pregagens não poderá ser inferior ao valor da capacidade de carga da pregagem integral tipo, devendo prestar-se cuidados especiais ao processo de injeção de forma a obter-se o envolvimento completo da pregagem pela calda.

Para o revestimento definitivo, colocou-se malhasol e betão projectado, em que nos hasteais utilizou-se um recobrimento de 3 cm e nas abóbadas 10 cm de espessura.

Atingindo o extradorso processa-se ao desmonte do revestimento do túnel, que se encontra escorado por cambotas leves, espaçadas de 0,5 a 1m. Estas cambotas são constituídas por perfis HEB 160 e IPE 100 e têm como principal função a estabilização do túnel, (Ilustração 18).

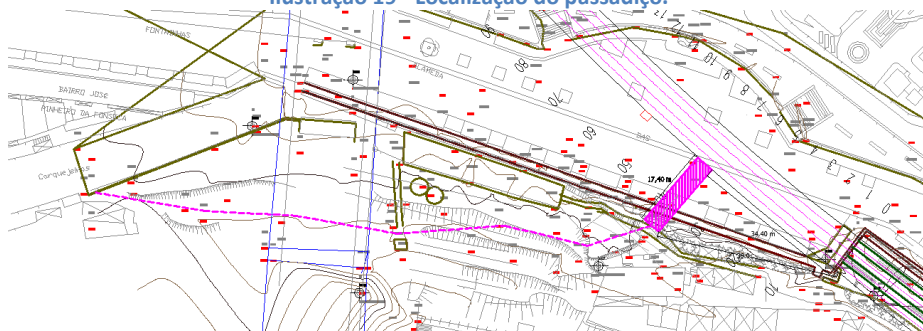
Ilustração 18 - Escoramento constituído por perfis HEB 160 e 100.



Estas permanecerão até os trabalhos do túnel de acesso ficarem concluídos.

Seguidamente será criado um acesso à estrada do lado Oeste da Ponte de Infante, com largura não inferior a 2,5 m e inclinação a 6%.

Ilustração 19 - Localização do passadiço.



O passadiço será constituído por uma camada de 15 cm de espessura e com uma largura não inferior a 2,50 metros e o material utilizado será gravilha, como mostra a ilustração, Ilustração 19, a linha a tracejado.

6. Cálculos

6.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os vários cálculos efectuados para a verificação de segurança do túnel e os vários elementos que fazem parte do projecto de reabilitação do túnel.

O túnel em questão necessita efectivamente de beneficiação, porém com maior expressão na vertente estrutural.

Portanto este capítulo será dividido em seis subcapítulos, em que o primeiro é referente às características dos materiais utilizados, um segundo mais extenso que refere-se ao modelo de cálculo para a verificação da capacidade resistente do túnel, um terceiro e quarto subcapítulos referentes ao dimensionamento dos nichos e câmaras de serviço, respectivamente, em que se calculará a quantidade de armaduras para ambos os órgãos. A drenagem longitudinal encontra-se no quinto subcapítulo e dimensiona-se a secção transversal de escoamento das águas recebidas pelos sistemas de drenagem transversal.

Por fim, um subcapítulo em que se encontra o dimensionamento do túnel de acesso lateral de segurança e a constituição deste.

6.2. Características dos materiais

As características atribuídas ao revestimento e ao maciço foram baseadas nos resultados dos relatórios do LNEC [21] e dos Trabalhos de Campo.

Dentro do relatório do LNEC destaca-se um quadro (Quadro 5), referente às características geomecânicas do maciço do túnel.

Quadro 5 - Características geomecânicas do maciço envolvente do túnel.

| Zona | W | F | RQD (%) | σ_c (MPa) | E (GPa) | I_r (MPa) | V_l (m/s) | RMR | Q | γ (kN/m ³) |
|------|------------------|------------------|---------|------------------|---------|-------------|-------------|-----|------|-------------------------------|
| ZG1 | W ₂₋₃ | F ₃ | >75 | 75 | 19,5 | 5 | 5000 | 58 | 13,2 | 27 |
| ZG2 | W ₃ | F ₃₋₄ | 50-75 | 17 | 1,7 | 0,3 | 2900 | 33 | 3,6 | 25 |
| ZG3 | W ₄₋₅ | F ₄₋₅ | <50 | 9 | 0,65 | 0,2 | 2700 | 20 | 0,08 | 23 |

Como já foi referido, foram também recolhidas amostras do revestimento, que posteriormente sofreram ensaios de compressão simples em laboratório. Estes resultados estão incluídos no Relatório de Trabalhos de Campo.

No entanto, devido ao reduzido número de amostras recolhidas do revestimento, não podemos considerar estes valores como um todo absoluto.

6.3. Modelo de Cálculo para as Secções do túnel.

No estudo foram modeladas sete secções transversais do túnel. A escolha para estas secções baseia-se na situação mais desfavorável, o que quer dizer que estão sujeitas a maiores esforços e deformações.

As secções situam-se nos seguintes pontos quilométricos:

- Secção P.k. 0+615m;
- Secção P.k. 0+627m;
- Secção P.k. 0+668m;
- Secção P.k. 0+678m;
- Secção P.k. 0+699m;
- Secção P.k. 0+720m;
- Secção P.k. 0+750m.

É de referir que nas secções 0+678m, 0+699m e 0+720m está localizado um hotel, Hotel Batalha, em que se fez uma análise de esforços devido à influência deste.

O modelo de cálculo adoptado para as várias secções considera o revestimento (abóbada e hasteais) em blocos de alvenaria de granito e o terreno do maciço encaixante granítico.

Elaboraram-se dois modelos de cálculo em cada uma das secções, um modelo para as acções estáticas (Ilustração 20) e outro para as dinâmicas (Ilustração 21).

Estes modelos distinguem-se pela área de terreno do maciço encaixante. Para o modelo utilizado no cálculo das acções estáticas considerou-se encastramentos na base dos hasteais e nas acções dinâmicas considera-se molas simulando a continuidade do terreno envolvente do túnel.

Ilustração 20 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Estáticas.

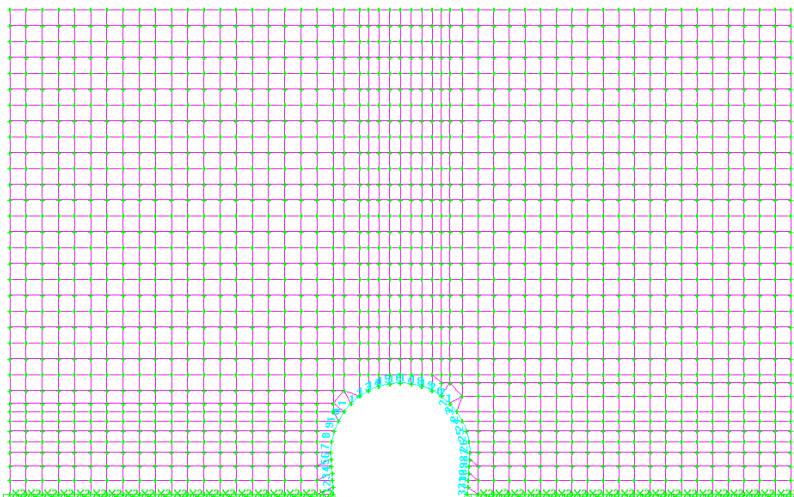
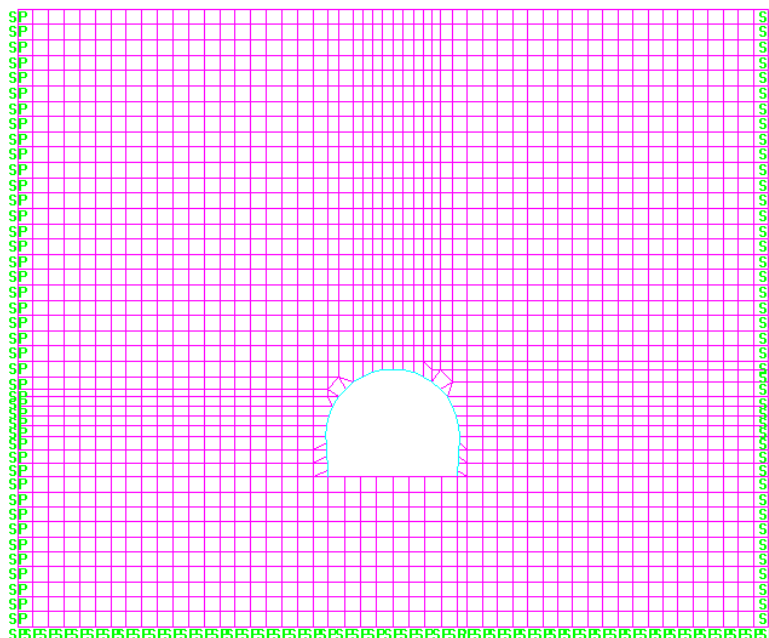


Ilustração 21 - Exemplo de modelo utilizado para as Acções Dinâmicas.



Os modelos referidos foram elaborados no programa de cálculo automático STRAP v 12.5, onde o revestimento do túnel foi modelado através de elementos lineares, barras, e o maciço encaixante (terreno envolvente) através de elementos finitos.

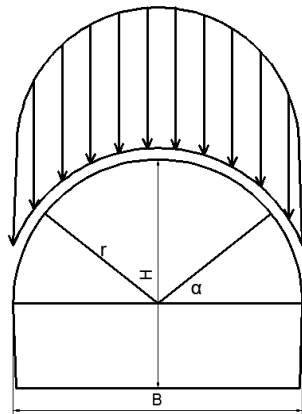
Determinação das acções actuantes

Acção Vertical

Para determinar a carga vertical, recorreu-se à classificação de Terzaghi, que considera uma altura máxima de terreno a actuar sobre a abóbada, relacionada com a largura (B) e a altura (H) da secção do túnel, como mostra a ilustração, Ilustração 22.

Ilustração 22 - Esquema da determinação da acção vertical.

$$P = 1,1 \times \gamma \times (B + H)$$



Esta classificação divide as condições do maciço rochoso em 9 classes, considerando as condições de fracturação, à coesão ou expansibilidade dos maciços, como mostra o Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação de Terzaghi para os maciços rochosos (Adaptado de Miranda [25], 2003).

| Condições da rocha | H_p carga (pés) | Observações |
|--|---|--|
| 1. Dura e intacta | Zero | Requer suporte leve somente em condições de queda de blocos |
| 2. Dura estratificada ou xistosa | 0 a 0,5B | Suporte leve |
| 3. Maciça, moderadamente fracturada | 0 a 0,25B | Carga pode variar erraticamente de ponto para ponto |
| 4. Moderadamente compartimentada | 0,258 a 0,35 (B+H _t) | Não há pressões laterais |
| 5. Muito compartimentada | (0,35 a 1,10)(B+H _t) | Pequenas pressões laterais ou mesmo sem pressões |
| 6. Completamente esmagada mas quimicamente intacta | 1,10(B+H _t) | Pressão lateral considerável. Requer suporte contínuo de cambotas |
| 7. Pouco expansiva, profundidade média | 1,10 a 2,10 (B+H _t) | Pressão lateral elevada, requer arco invertido |
| 8. Pouco expansiva, profundidade elevada | 2,10 a 4,50 (B+H _t) | Cambotas circulares são recomendadas |
| 9. Rocha expansiva | Acima de 250 pés, independente do valor de B+H _t | Cambotas circulares são requeridas. Em casos extremos devem usar-se suportes flexíveis |

Acção Horizontal

Para determinar a carga horizontal, considerou-se o seu valor máximo na zona de maior largura da secção do perfil, valor este que é proporcional ao deslocamento horizontal sofrido e à correspondente reacção do maciço rochoso.

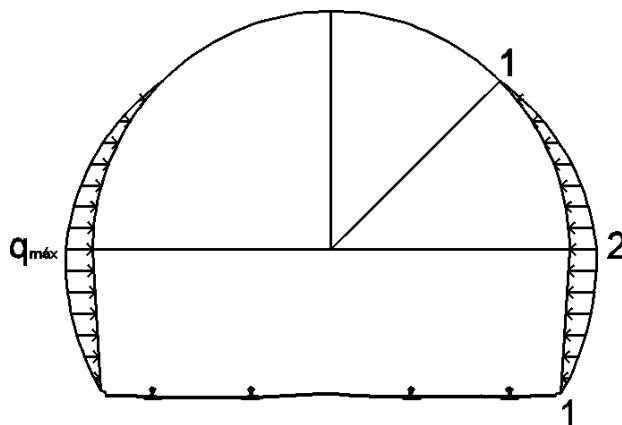
A reacção do terreno, sobre os hasteais do revestimento do túnel, foi determinada considerando o seu valor máximo na zona de maior largura da secção do perfil, valor este, que é proporcional ao deslocamento sofrido, segundo a horizontal, e à correspondente reacção do maciço rochoso.

A distribuição das reacções do terreno sobre o revestimento, com a direcção perpendicular ao eixo da sua secção média, foi considerada com os seguintes parâmetros:

- Existem dois pontos em que o valor da reacção é nulo, e que se situam respectivamente na secção de arranque do revestimento e a quartos da abóbada superior;

- O valor máximo da reacção lateral q , que como se disse localiza-se na zona de maior largura, será proporcional ao respectivo deslocamento na horizontal, sofrido sob a acção das cargas.

Ilustração 23 - A distribuição das reacções do terreno sobre o revestimento.



Para efeitos de distribuição das cargas radiais em cada nó, consideram-se as seguintes leis de variação contínua que, para uma reacção máxima igual à unidade, têm a seguinte expressão:

Arco Superior

$$q_n = 1 - \frac{\cos^2 \alpha_n}{\cos^2 \alpha_0}$$

Arco Inferior

$$q_n = 1 - \frac{\sin^2 \beta_n}{\sin^2 \beta_0}$$

Tendo α_n , α_0 , β_n e β_0 o seguinte significado:

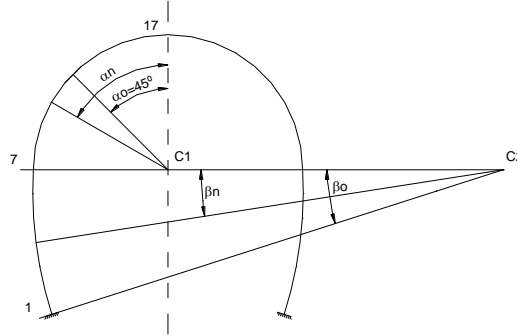
α_n - Ângulo formado pela radial do nó, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

α_0 - Ângulo formado pela radial do ponto de acção nula, com a vertical passando pelo centro do círculo médio do revestimento superior.

β_n - Ângulo formado pela radial do nó, com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

β_0 – Ângulo formado pela radial do nó de encastramento com a horizontal que contém o centro do círculo inferior.

Neste caso tem-se:



Conhecidos os deslocamentos horizontais, nó que corresponde à largura máxima da secção para ambas as acções, verticais e horizontais, pode-se estabelecer as equações de compatibilidade de deslocamento lateral do arco e de compressão sofrida pelo terreno, determinando-se o valor máximo da carga lateral.

Assim ter-se-á:

- $\delta_{h_{p=1}}$ (m) – Deslocamento horizontal para a carga vertical actuando isoladamente:
- δ_{h_p} (m) - Deslocamento horizontal para a carga radial ($q = 1,0 \text{ kN/m}$):

E por fim, admitindo um coeficiente de reacção de C (GPa), através da seguinte relação indica qual a carga máxima horizontal existente e então tem-se:

$$q_{máx} = \frac{\delta_{h_p}}{\frac{1}{C} + \delta_{h_{p=1}}} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Acção Sobrecarga

As sobrecargas correspondem às acções exercidas pelos edifícios e hotel existentes à superfície. Estas cargas são consideradas para avaliar a sua influência no comportamento global do maciço e do túnel. Segundo o RSAEP define para a zona de implantação dos edifícios, uma carga permanente característica por piso (G_k) de 8 kN/m^2 e uma sobrecarga de utilização por piso no valor de $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Combinações de Acções

Os valores de cálculo dos esforços actuantes para a verificação da segurança, devem ser obtidos considerando as regras de combinação. Portanto as combinações utilizadas para esta verificação foram:

- Combinação Estado Limite Último:

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} S_{Gik} + \gamma_q \left[S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} S_{Qjk} \right]$$

- Combinação Frequente

$$S_d = \sum_{i=1}^m S_{Gik} + \left[\psi_1 S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} S_{Qjk} \right]$$

Os valores dos Ψ a considerar para as combinações frequentes são, conforme o quadro:

Quadro 7 - Coeficientes correspondente às acções varáveis.

| Ψ_0 | Ψ_1 | Ψ_2 |
|----------|----------|----------|
| 0,4 | 0,3 | 0,2 |

Agora mostra-se o Quadro 8 (Anexo A, Quadro 3, do Eurocódigo 7), que indica quais os valores dos coeficientes parciais de segurança das acções, para cada combinação:

Quadro 8 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para as acções.

| Acção | | Símbolo | Conjunto | |
|------------|--------------|------------|----------|-----|
| | | | A1 | A2 |
| Permanente | Desfavorável | γ_G | 1,35 | 1,0 |
| | Favorável | | 1,0 | 1,0 |
| Variável | Desfavorável | γ_Q | 1,5 | 1,3 |
| | Favorável | | 0 | 0 |

De seguida mostra-se outro quadro, Quadro 9, que para a verificação dos estados limites em causa, os coeficientes parciais para os parâmetros do terreno abrangem os seguintes valores:

Quadro 9 - Valores dos coeficientes parciais de segurança para os parâmetros do terreno.

| Parâmetro do terreno | Símbolo | Conjunto | |
|---|-------------------|----------|------|
| | | M1 | M2 |
| Ângulo de atrito interno em tensões efectivas ^{a)} | γ_{ϕ} | 1,0 | 1,25 |
| Coesão em tensões efectivas | $\gamma_{c'}$ | 1,0 | 1,25 |
| Resistência ao corte não drenada | γ_{cu} | 1,0 | 1,4 |
| Resistência à compressão uniaxial | γ_{qu} | 1,0 | 1,4 |
| Peso Volúmico | γ_{γ} | 1,0 | 1,0 |
| Este coeficiente é aplicado a $\tan \phi$ | | | |

Com o modelo de cálculo construído no programa de cálculo STRAP v.12.5 obteve-se os valores de esforços actuantes na secção do túnel.

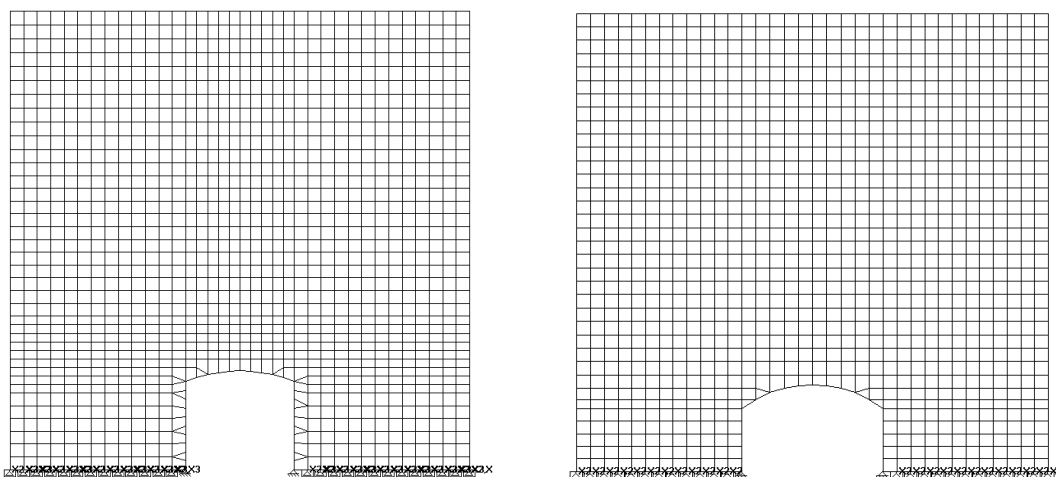
Com os esforços obtidos do modelo procede-se à comparação com os valores obtidos dos ensaios de compressão simples obtidos em laboratório e comparar, a nível de tensões, se estes encontram-se abaixo dos ensaios realizados. E assim garante-se a capacidade resistente da secção do túnel.

6.4. Modelo de Cálculo para os Nichos e Câmaras de Serviço

Para a modelação dos nichos e câmaras de serviço o princípio é idêntico ao que foi referido no subcapítulo anterior.

Os modelos referidos foram elaborados considerando o revestimento do nicho e da câmara de serviço por elementos lineares, barras, e o maciço encaixante (terreno envolvente) através de elementos finitos, como mostra a ilustração, Ilustração 24.

Ilustração 24 - Esquema de cálculo dos nichos e câmaras de serviço.



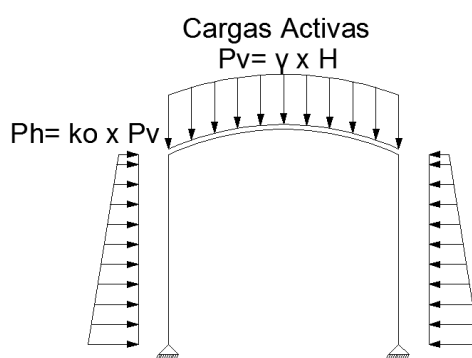
O modelo de cálculo adoptado considera o nicho e a câmara de serviço (abóbada e paredes) em betão armado e o terreno do maciço encaixante granítico.

Os materiais considerados para a constituição dos nichos e câmaras de serviço foram betão de classe C30/37 e aço A500NR.

Para o dimensionamento dos nichos considerou-se uma carga vertical activa que é igual às forças que correspondem ao valor do recobrimento de terreno sobre a abóbada do nicho e câmara de serviço.

Para a carga horizontal é considerado o produto da carga vertical activa (p_h) por um coeficiente de impulso em repouso do terreno (k_o). Este valor para rochas pode variar de 0,5 a 3, dependendo da profundidade a que se encontra o nicho e da tectónica do maciço. Para melhor esclarecimento apresenta-se a seguinte ilustração (Ilustração 25).

Ilustração 25 - Esquema da consideração de acções nos nichos e câmaras de serviço.



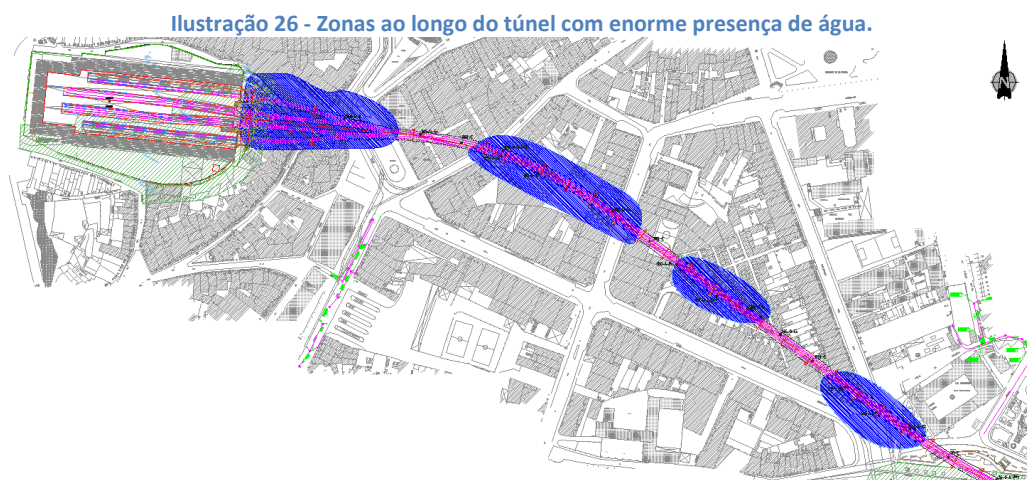
Este método para grandes profundidades conduz a valores excessivos o que não correspondem à realidade.

Com a secção totalmente modelada observou-se os valores dos momentos e esforços axiais actuantes e dimensionou-se as áreas de armaduras necessárias para garantir a segurança destes órgãos.

6.5. Cálculos da Rede de Drenagem

Como já foi referido anteriormente, o revestimento encontra-se com manchas decorrentes da existência de água/humidade (de cor esbranquiçada), marcas de lamas nos hasteais, infiltrações com profusão de musgos, estalactites e água corrente com

crescendo na aproximação da Boca de Saída, e zonas cobertas por camadas de material de cor negra.



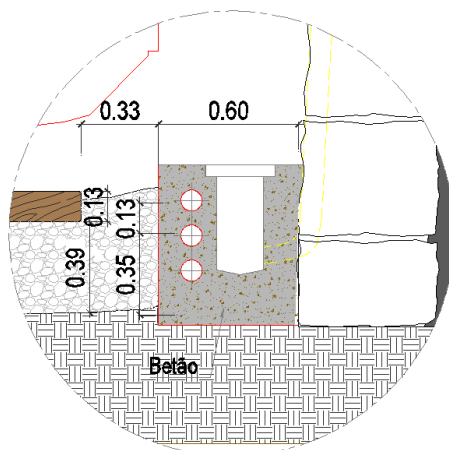
Concluí-se que a existência de água num maciço rochoso é um factor nefasto, a sua percolação, ou em repouso, pode levantar problemas de instabilidade e o comportamento a longo prazo da obra. Esta origina pressões e ocorrência de fenómenos de erosão que alteram o comportamento hidráulico e mecânico do maciço rochoso.

Para o dimensionamento do colector da drenagem longitudinal considerou-se a zona com o maior caudal identificado, que se situa perto da Boca de Saída.

Com o maior caudal identificado, calculou-se a secção do colector e utilizou-se para a zona do túnel com maior comprimento que se situa desde da Boca de Entrada (P.k. 1+760,857) até ao P.k. 2+264,107.

Portanto, considerou-se um comprimento de 503,25 m com uma pendente de cerca 0,5%.

Ilustração 27 - Secção transversal em estudo.



Para os cálculos utilizou-se as Fórmulas empíricas de Manning Strickler, em que a expressão é a seguinte:

$$Q = A.K.R^{2/3}.J^{1/2}$$

Em que:

- Q – Caudal escoado (m^3/s);
- A – Área da secção molhada (m^2);
- K – Coeficiente de rugosidade de Strickler ($m^{1/3}/s$);
- R – Raio hidráulico (m);
- J – Declive do fundo (m/m).

Considerou-se uma secção rectangular para simplificação nos cálculos e que as fórmulas da área molhada (A), perímetro hidráulico (P) e raio hidráulico (R) são:

- $A = b.h$;
- $P = b + 2.h$;
- $R = \frac{A}{P} = \frac{b.h}{b+2.h}$

O valor do coeficiente de rugosidade do betão é de $60 m^{1/3}/s$ e estudou-se para várias larguras de secções, qual a melhor se enquadrava nas limitações de espaço que se encontra entre o balastro e passadiço existentes.

6.6. Cálculos do Túnel de Acesso Lateral

Para a construção do Túnel de Acesso Lateral necessita-se determinar em que classe se encontra o maciço na secção a ser escavada.

O método que se utilizou foi o Método de Classificação de Bieniawski. Este método baseia-se nos seguintes parâmetros:

- Resistência à compressão uniaxial (em laboratório);
- RQD (Rock Quality Designation);
- Grau de Facturação do maciço;
- Estados das descontinuidades;
- Condições hidrogeológicas.

Utiliza ainda outro parâmetro que tem em consideração a influência da orientação e inclinação das descontinuidades relativamente ao eixo da escavação.

Com estes parâmetros determinados pode-se aplicar o sistema RMR que é o seguinte, Quadro 10:

Quadro 10 - Aplicação do sistema RMR.

| A - Parâmetros de classificação e seus pesos | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|---|---|---------|--------|
| Parâmetro | | Intervalo de variação dos valores | | | | | | | |
| P1 | Resistência do material rochoso intacto | Point-load | >10 MPa | 4-10 MPa | 2-4 MPa | 1-2 MPa | Para este intervalo é aconselhável utilizar o ensaio de resistência à compressão uniaxial | | |
| | | Res. Comp. uniaxial | >250 MPa | 100-250 MPa | 50-100 MPa | 25-50 MPa | 5-25 MPa | 1-5 MPa | <1 MPa |
| | Peso | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 | |
| P2 | RQD | 90%-100% | 75%-90% | 50%-75% | 25%-50% | <25% | | | |
| | Peso | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | | |
| P3 | Espaçamento das descontinuidades | >2 m | 0.6-2.0m | 200-600mm | 60-200mm | <60mm | | | |
| | Peso | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | | |
| P4 | Condições das descontinuidades (ver E) | Superfícies muito rugosas Não contínuas Nenhuma separação Superfície de rocha inalterada | Superfícies ligeira/ rugosas Separação <1mm Superfície de rocha ligeira/ alterada | Superfícies ligeira/ rugosas Separação <1mm Superfície de rocha muito alterada | Superfícies lisas ou enchimento c/ espessura < 5mm ou Separação 1-5mm contínua | enchimento mole com espessura >5mm ou separação >5mm contínua | | | |
| | Peso | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | | |
| P5 | Águas subterrâneas | Caudal por 10m de túnel (l/m) | Nenhum | <10 | 10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | (Pressão água nas diaclases/ tensão principal máxima) | 0 | <0,1 | 0,1-0,2 | 0,2-0,5 | >0,5 | | |
| | | Condições gerais | Completa/ seco | Ligeira/ Húmido | Húmido | Gotejando | Fluindo | | |
| | Peso | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | | |
| B. Ajuste dos pesos devido à orientação das descontinuidades (ver F) | | | | | | | | | |
| | | Muito favorável | Favorável | Razoável | Desfavorável | Muito Desfavorável | | | |
| P6 | Túneis e minas | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 | | | |
| | Fundações | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 | | | |
| | Taludes | 0 | -5 | -25 | -50 | | | | |
| C. Classe do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais | | | | | | | | | |
| Peso | | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | <21 | | | |
| Número da classe | | I | II | III | IV | V | | | |
| Descrição | | Rocha muito boa | Rocha boa | Rocha razoável | Rocha má | Rocha muito má | | | |
| D. Significado das classes das rochas | | | | | | | | | |
| Número da classe | | I | II | III | IV | V | | | |
| Tempo médio de auto-sustentação | | 20 anos para um vão de 15m | 1 ano para um vão de 10m | 1 semana para um vão de 5m | 10 horas para um vão 2.5m | 30 minutos para um vão de 1m | | | |
| Coesão do maciço rochoso (kPa) | | >400 | 300-400 | 200-300 | 100-200 | <100 | | | |
| Ângulo de atrito do maciço rochoso (°) | | >45 | 35-45 | 25-35 | 15-25 | <15 | | | |
| E. Orientações para a classificação das condições das descontinuidades | | | | | | | | | |
| Comprimento da descontinuidade (persistência) | | <1m | 1-3m | 3-10m | 10-20m | >20m | | | |
| Separação (abertura) | Peso | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | | |
| | | Nenhuma | <0.1mm | 0.1-1.0mm | 1-5mm | >5mm | | | |
| Rugosidade | Peso | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | |
| | | Muito rugoso | Rugoso | Ligeira/ rugoso | Macio | Liso | | | |
| Enchimento | Peso | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | |
| | | Nenhum | Enchimento duro <5mm | Enchimento duro >5mm | Enchimento mole <5mm | Enchimento mole >5mm | | | |
| Alteração | Peso | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | | |
| | | Inalterado | Ligeira/ alterado | Moderada/ alterado | Muito alterado | Decomposto | | | |
| Alteração | Peso | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | |
| | | Inalterado | Ligeira/ alterado | Moderada/ alterado | Muito alterado | Decomposto | | | |
| F. Efeito da orientação da direcção e da inclinação das descontinuidades em túneis | | | | | | | | | |
| Direcção perpendicular ao eixo do túnel | | | | | Direcção paralela ao eixo do túnel | | | | |
| Escavar c/ o mergulho - Inclinação 45-90° | | Escavar c/ o mergulho - Inclinação 20-45° | | | Mergulho 45-90° | | Mergulho 20-45° | | |
| Muito favorável | | Favorável | | | Muito favorável | | Razoável | | |
| Escavar contra o mergulho - Inclinação 45-90° | | Escavar contra o mergulho - Inclinação 20-45° | | | Mergulho 0-20 Independente da direcção | | | | |
| Razoável | | Desfavorável | | | Razoável | | | | |

Este sistema é utilizado para determinar o valor de RMR (Rock Mass Rating), que é definido através dos pesos de cada parâmetro, e estabelecer a classe do maciço.

A classe do maciço estabelece parâmetros médios de resistência (coesão e ângulo de atrito), módulos de deformabilidade do maciço rochoso e também a sequência de

escavação, o tipo de suporte a utilizar e a espessuras dos revestimentos a aplicar nos hasteais e abóbada do túnel a ser construído (Quadro 11).

Quadro 11 - Recomendações de escavação e suporte com base nas classes do sistema RMR.

| Classe do maciço | Escavação | Suporte | | |
|------------------|---|---|---|--|
| | | Pregagens (20mm diâmetro envolvidas em Grout) | Betão projectado | Cimbres |
| I | Secção total 3m de avanço | Geralmente não requer suporte, com excepção de pregagens ocasionais | | |
| II | Secção total, 1,0 a 1,5m de avanço. Suporte completo a 20m da frente. | Pregagens de 3m de comp., espaçadas de 2,5m, ocasionalmente com malha em certas zonas do tecto | 50mm no tecto quando necessário | Nenhum |
| III | Secção parcial (frente e rebaixo), avanço 1,5-3m. Início do suporte após cada fogo. Suporte completo a 10m | Pregagens sistemáticas com 4m de comp., espaçadas de 2m nas paredes e tectos, com malha no tecto | 50-100mm no tecto 30 mm nas paredes | Nenhum |
| IV | Secção parcial (frente e rebaixo), avanço 1,0-1,5m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação | Pregagens sistemáticas com 4-5m de comp., espaçadas de 1-1,5m com malha no tecto e paredes | 100-150mm no tecto 100mm nas paredes | Cimbres leves a médios espaçados de 1,5m |
| V | Secções múltiplas, avanço de 0,5-1,5m. Instalação do suporte com a escavação. Betão projectado logo após fogo | Pregagens sistemáticas com 5-6m de comp., espaçadas de 1-1,5m com malha no tecto e paredes. Pregagem na soleira | 150-200mm no tecto 150mm nas paredes e 50mm na face | Cimbres médios a pesados espaçados de 0,75m. Fechamento da soleira |

7. Resultados

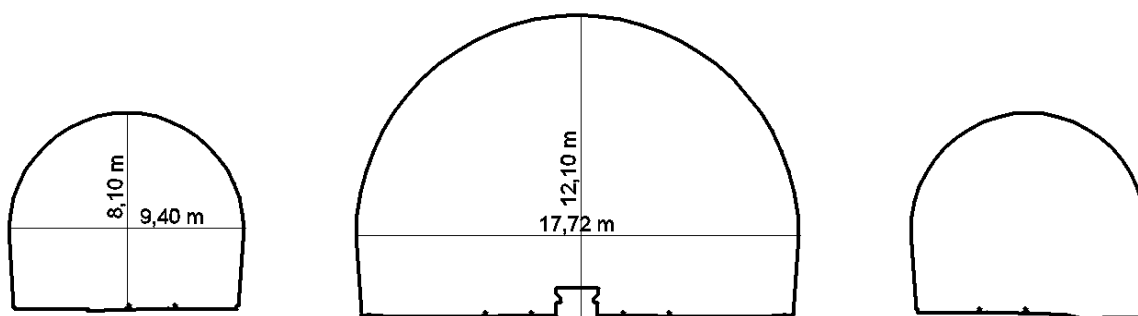
7.1. Modelo das Secções do Túnel

Os resultados que de seguida irão ser apresentados foram realizados com a ferramenta de cálculo automático, o programa de cálculo STRAP v.12.5, para a representação dos modelos das secções em estudo, e com o auxílio do programa Microsoft Excel para a verificação das tensões, dimensionamento de armaduras dos órgãos de segurança e da solução para a secção transversal do colector da drenagem longitudinal.

Os resultados obtidos demonstram que o túnel depois das obras de beneficiação estrutural, as tensões de compressão ficam salvaguardadas, não ultrapassando o valor de cálculo da tensão de rotura à compressão estimado em 22,4 MPa. Relatando de novo que este valor sendo razoável não é contudo representativo.

Como se esperava a zona da Boca de Saída, Ilustração 28, é que tem esforços e por sua vez tensões actuantes, de maior expressão, pois o arco em alvenaria vence um enorme vão, cerca de 17m e assim sendo suporta um maior volume de terras. O maciço nesta zona foi considerada ZG3, em que o maciço é friável e se comporta como solo. (Quadro 12 e 13).

Ilustração 28 - Composição da Secção 0+750m.



Quadro 12 - Valores de esforços e tensões na secção 0+720m, para Combinação ELU.

| | | COMBINAÇÃO ELU | | Galeria Ascendente | | |
|----------|---|----------------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Esforços | | Tensão Actuante (MPa) | | |
| | | Nós | N (kN) | M (kN.m) | Extradorso ($\times 10^{-3}$) | Intradorso ($\times 10^{-3}$) |
| Barra 1 | 1 | | -2310 | -122 | -1816,67 | -5883,33 |
| | 2 | | -2299 | -22,3 | -3460,00 | -4203,33 |
| Barra 7 | 1 | | -2447 | 84,1 | -5480,00 | -2676,67 |
| | 2 | | -2442,5 | 0,1 | -4072,50 | -4069,17 |
| | 3 | | -2438 | -12 | -3863,33 | -4263,33 |
| Barra 14 | 1 | | -2118 | -66,2 | -2426,67 | -4633,33 |
| | 2 | | -2014,5 | -0,4 | -3350,83 | -3364,17 |
| | 3 | | -1911 | -10 | -3018,33 | -3351,67 |
| Barra 17 | 1 | | -1718 | 60,5 | -3871,67 | -1855,00 |
| | 2 | | -1700 | 106 | -4600,00 | -1066,67 |
| | 3 | | -1682 | 66,8 | -3916,67 | -1690,00 |
| Barra 18 | 1 | | -1733 | 66,8 | -4001,67 | -1775,00 |
| | 2 | | -1751,5 | 103 | -4635,83 | -1202,50 |
| | 3 | | -1770 | 54,2 | -3853,33 | -2046,67 |
| Barra 21 | 1 | | -2248 | -22 | -3380,00 | -4113,33 |
| | 2 | | -2352 | -13 | -3703,33 | -4136,67 |
| | 3 | | -2456 | -74,4 | -2853,33 | -5333,33 |
| Barra 28 | 1 | | -3930 | 80,2 | -7886,67 | -5213,33 |
| | 2 | | -3938 | 204 | -9963,33 | -3163,33 |
| Barra 34 | 1 | | -4642 | -413 | -853,33 | -14620,00 |
| | 2 | | -4658 | -804 | 5636,67 | -21163,33 |

Quadro 13 - Valores de esforços e tensões na secção 0+720m, para a Combinação Freqüente.

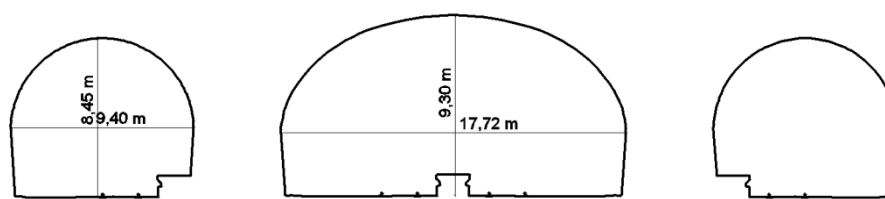
| | | COMBINAÇÃO FREQ | | Galeria Ascendente | | |
|----------|---|-----------------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Esforços | | Tensão Actuante (MPa) | | |
| | | Nós | N (kN) | M (kN.m) | Extradorso ($\times 10^{-3}$) | Intradorso ($\times 10^{-3}$) |
| Barra 1 | 1 | | -1702 | -90,9 | -1321,67 | -4351,67 |
| | 2 | | -1694 | -20 | -2490,00 | -3156,67 |
| Barra 7 | 1 | | -1802 | 84,1 | -4405,00 | -1601,67 |
| | 2 | | -1795 | 8,4 | -3131,67 | -2851,67 |
| Barra 14 | 1 | | -1562 | -49,1 | -1785,00 | -3421,67 |
| | 2 | | -1485 | -0,4 | -2468,33 | -2481,67 |
| | 3 | | -1408 | -8 | -2213,33 | -2480,00 |
| Barra 17 | 1 | | -1268 | 44,4 | -2853,33 | -1373,33 |
| | 2 | | -1254,5 | 78,1 | -3392,50 | -789,17 |
| | 3 | | -1241 | 49 | -2885,00 | -1251,67 |
| Barra 18 | 1 | | -1279 | 49 | -2948,33 | -1315,00 |
| | 2 | | -1292,5 | 75,9 | -3419,17 | -889,17 |
| | 3 | | -1306 | 39,6 | -2836,67 | -1516,67 |
| Barra 21 | 1 | | -1659 | -18 | -2465,00 | -3065,00 |
| | 2 | | -1736 | -12 | -2693,33 | -3093,33 |
| | 3 | | -1813 | -55,2 | -2101,67 | -3941,67 |
| Barra 28 | 1 | | -2900 | 59,7 | -5828,33 | -3838,33 |
| | 2 | | -2506 | 151 | -6693,33 | -1660,00 |
| Barra 34 | 1 | | -3426 | -305 | -626,67 | -10793,33 |
| | 2 | | -3434 | -595 | 4193,33 | -15640,00 |

Ressalva-se que no Quadro 12, no elemento barra 34 da Galeria Central, depara-se um valor, 21,2 MPa, perto do valor cálculo de tensão de compressão simples, 22,4 MPa, mas mesmo assim ainda é garantida a capacidade resistente do túnel.

As restantes zonas estão com valores bastante abaixo do valor de tensão de rotura à compressão, isto devido a se encontrarem numa zona em que o maciço se encontra com melhores características geotécnicas, ZG1 e ZG2 e os arcos serem de menores dimensões..

De seguida analisa-se a influência das instalações do Hotel Batalha sobre o túnel. Esta análise irá debruçar-se sobre a secção 0+720m em que o túnel é composto por três galerias, em que a Galeria Central tem uma forma elíptica e com 17m de vão. (Ilustração 29).

Ilustração 29 - Composição da Secção 0+720m.



Verifica-se que a variação de tensões devido às instalações do hotel nos hasteais não é significativa, estão entre um intervalo de 0% a 2,2 %, isto pelo facto de grande parte dos esforços serem absorvidos pela abóbada.

Analisando a abóbada, reparamos que nos elementos de barra 16 e 17, Quadro 14 e 15, que se localizam no topo, as tensões de compressão no extradorso variam cerca de 1%, no intradorso têm-se tensões de tracção (descolamento) com um intervalo entre 10 % a 53 %, estes modelos demonstram que o túnel tenderá a sofrer deformações verticais muito pequenas, uma variação de cerca 2×10^{-5} mm.

Quadro 14 - Esforços e tensões sem influência do Hotel.

| COMBINAÇÃO FREQUENTE | | | | | |
|---------------------------------------|-----|----------|----------|-----------------------|------------|
| Sem Influência da Sobrecarga do Hotel | | | | | |
| Galeria Ascendente | | | | | |
| | Nós | Esforços | | Tensão Actuante (kPa) | |
| | | N (kN) | M (kN.M) | Extradorso | Intradorso |
| Barra 1 | 1 | -3187 | -308 | -178,33 | -10445,00 |
| | 2 | -3177 | -80,7 | -3950,00 | -6640,00 |
| Barra 6 | 1 | -3199 | 93,4 | -6888,33 | 6888,33 |
| | 2 | -3189 | -69,4 | -4158,33 | -6471,67 |
| Barra 12 | 1 | -2487 | -125 | 6228,33 | -6228,33 |
| | 2 | -2317 | -55,1 | -2943,33 | -4780,00 |
| | 3 | -2147 | -79,6 | -2251,67 | -4905,00 |
| Barra 16 | 1 | -1053 | 91,4 | -3278,33 | -231,67 |
| | 2 | -1041 | 127 | -3851,67 | 381,67 |
| | 3 | -1029 | 106 | -3481,67 | 51,67 |
| Barra 17 | 1 | -1005 | 106 | -3441,67 | 91,67 |
| | 2 | -1016,5 | 133 | -3910,83 | 522,50 |
| | 3 | -1028 | 105 | -3463,33 | 36,67 |
| Barra 21 | 1 | -2032 | -18 | -3086,67 | -3686,67 |
| | 2 | -2202 | 1,2 | -3690,00 | -3650,00 |
| | 3 | -2372 | -76,7 | -2675,00 | -5231,67 |
| Barra 27 | 1 | -3470 | -158 | -3150,00 | -8416,67 |
| | 2 | -3480 | 6 | -5900,00 | -5700,00 |
| Barra 32 | 1 | -3193 | 82 | -6688,33 | -3955,00 |
| | 2 | -3203 | 131 | -7521,67 | -3155,00 |

Quadro 15 - Esforços e Tensões com influência do Hotel.

| COMBINAÇÃO FREQUENTE | | | | | |
|---------------------------------------|-----|----------|----------|-----------------------|------------|
| Com Influência da Sobrecarga do Hotel | | | | | |
| Galeria Ascendente | | | | | |
| | Nós | Esforços | | Tensão Actuante (kPa) | |
| | | N (kN) | M (kN.M) | Extradorso | Intradorso |
| Barra 1 | 1 | -3211 | -302 | -318,33 | -10385,00 |
| | 2 | -3202 | -78,7 | -4025,00 | -6648,33 |
| Barra 6 | 1 | -3228 | 92,1 | -6915,00 | 6915,00 |
| | 2 | -3218 | -71,9 | -4165,00 | -6561,67 |
| Barra 12 | 1 | -2494 | -125 | 6240,00 | -6240,00 |
| | 2 | -2324 | -54,5 | -2965,00 | -4781,67 |
| | 3 | -2154 | -78,6 | -2280,00 | -4900,00 |
| Barra 16 | 1 | -1047 | 93,6 | -3305,00 | -185,00 |
| | 2 | -1035 | 129 | -3875,00 | 425,00 |
| | 3 | -1023 | 108 | -3505,00 | 95,00 |
| Barra 17 | 1 | -1000 | 108 | -3466,67 | 133,33 |
| | 2 | -1011,5 | 135 | -3935,83 | 564,17 |
| | 3 | -1023 | 107 | -3488,33 | 78,33 |
| Barra 21 | 1 | -2043 | -18 | -3105,00 | -3705,00 |
| | 2 | -2213 | 0,5 | -3696,67 | -3680,00 |
| | 3 | -2383 | -77,9 | -2673,33 | -5270,00 |
| Barra 27 | 1 | -3485 | -160 | -3141,67 | -8475,00 |
| | 2 | -3495 | 5 | -5908,33 | -5741,67 |
| Barra 32 | 1 | -3201 | 83,8 | -6731,67 | -3938,33 |
| | 2 | -3211 | 136 | -7618,33 | -3085,00 |

Este aumento de tensões pode ocorrer devido ao maciço se encontrar na classe ZG2, em que o módulo de elasticidade é de 1,7 GPa, o que significa que como o grau de alteração e de fissuração é maior, o maciço tem maior capacidade de se deformar, do que se fosse um maciço classificado em ZG1.

7.2. Nichos e Câmaras de Serviço

Com os Nichos e Câmaras de Serviço modelados e os esforços obtidos efectuou-se o dimensionamento das áreas de armadura necessárias para a verificação a segurança.

Os cálculos efectuados para a determinar as áreas de armaduras foram os seguintes:

- Calcula-se os valores reduzidos de cálculo do momento flector (1) e esforço normal (2) resistente:

$$(1) \quad \mu = \frac{M_{Rd}}{bh^2 f_{cd}}$$

$$(2) \quad \nu = \frac{N_{Rd}}{bh f_{cd}}$$

Com os valores (1) e (2) determinou-se a percentagem mecânica da armadura (ω).

Com estes passos efectuados calculou-se a percentagem de armadura através da seguinte fórmula:

$$(3) \quad A_s = \omega b h \frac{f_{cd}}{f_{syd}}$$

Determinou-se também a área mínima de armadura, para saber qual o valor mínimo de armadura introduzir.

$$(4) \quad A_{min} = 0,26 b d \frac{f_{cd}}{f_{syd}}$$

E portanto as áreas de armadura que se obteve para os nichos e Câmaras de Serviço foram as seguintes:

- Parede do Nicho
 - Momentos máximos negativo: 3,65 cm²/m (Armadura Mínima);
 - Momento máximo positivo: 3,94 cm²/m;

- Abóbada do Nicho
 - Momentos máximos negativo: $3,94 \text{ cm}^2/\text{m}$;
 - Momento máximo positivo: $3,65 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Armadura Mínima).
- Parede do Câmaras de Serviço
 - Momentos máximos negativo: $3,77 \text{ cm}^2/\text{m}$;
 - Momento máximo positivo: $3,65 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Armadura Mínima);
- Abóbada do Câmaras de Serviço
 - Momentos máximos negativo: $3,65 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Armadura Mínima);
 - Momento máximo positivo: $3,65 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Armadura Mínima).

Segundo o Eurocódigo, a deformação tem que ser verificada para a Combinação Frequente e há que garantir que esta não ultrapasse $\sigma/250$ e como se pode verificar nos quadros seguintes, Quadro 16 e 17:

Quadro 16 - Verificação das deformações nos Nichos.

| Deformações | Combinação Quase Permanente | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------|---|---|----------|----------------------|---|----------|
| | Eurocódigo | | | | Programa | | | |
| Paredes | d= | 0,00768 | m | > | d= | 162×10^{-9} | m | Verifica |
| Abóbada | d= | 0,0096 | m | > | d= | 487×10^{-9} | m | Verifica |

Quadro 17 - Verificação das deformações nas Câmaras de Serviço.

| Deformações | Combinação Quase Permanente | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------|---|---|----------|----------------------|---|----------|
| | Eurocódigo | | | | Programa | | | |
| Paredes | d= | 0,00772 | m | > | d= | 530×10^{-7} | m | Verifica |
| Abóbada | d= | 0,0172 | m | > | d= | 466×10^{-7} | m | Verifica |

Garantimos assim a segurança na utilização dos Nichos e Câmaras de Serviço.

Estes órgãos são umas peças robustas que se encontram num túnel. Neste caso, Nichos e Câmaras de Serviço, o facto de requererem armaduras com áreas mínima ou pouco acima, deve-se ao facto de estas peças trabalharem só á compressão e estão confinadas pelo maciço. Portanto é seguro dizer que grande parte dos esforços é absorvida pelo betão que os constituí.

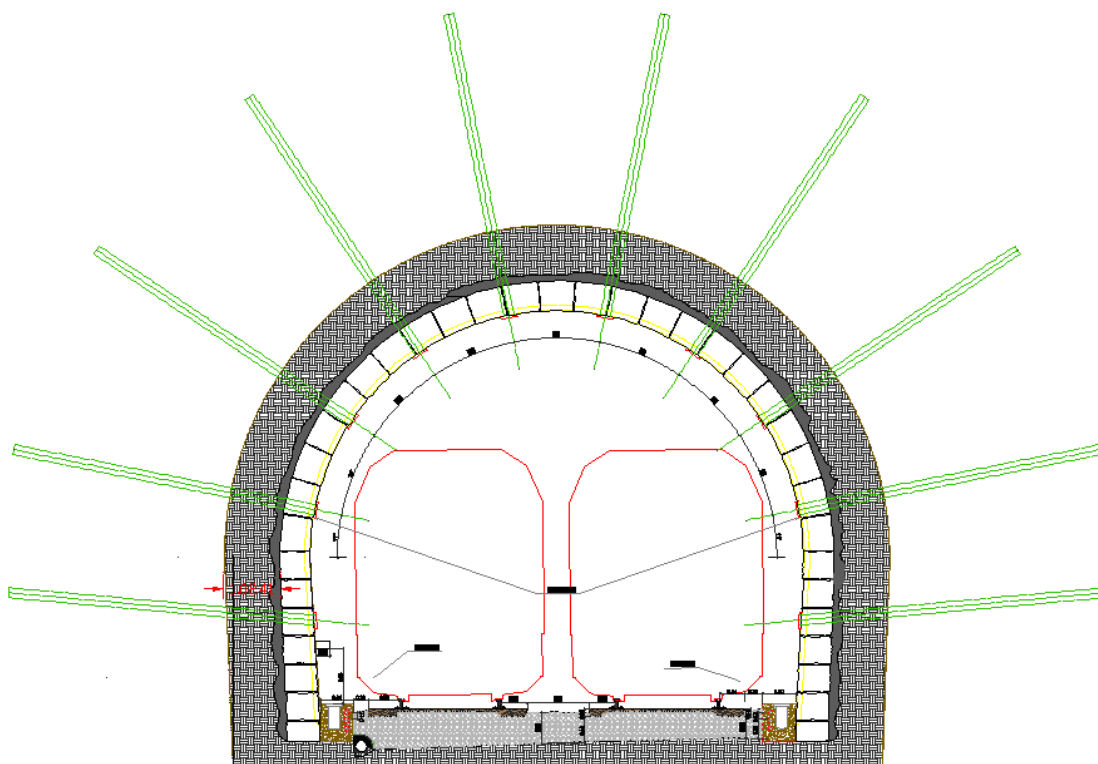
7.3. Rede de Drenagem Longitudinal

A rede de drenagem longitudinal num túnel é sempre uma tarefa difícil de dimensionar, devido às possíveis causas do surgimento das infiltrações e portanto há que tomar medidas bastantes conservativas.

Nas inspecções realizadas, não se conseguiu determinar a origem das infiltrações no túnel. Portanto para contornar o problema e salvaguardar o bom comportamento e segurança do túnel mediu-se o caudal de várias infiltrações existentes e dimensionou-se o sistema de drenagem longitudinal para o maior valor obtido, sendo bastante conservativo.

Logo, o maior caudal medido foi de 0,18 l/s e considerando que cada dreno instalado irá captar este caudal, obtemos 1,8 l/s por secção transversal de drenagem. Cada secção transversal é composta por 10 drenos, como mostra a Ilustração 30, representados a verde.

Ilustração 30 - Composição da Secção Transversal de Drenagem.



Para o comprimento considerado, cerca de 503 m, irão ser construídas 59 secções transversais de drenagem do maciço. Considerando que cada secção transversal irá drenar cerca de 1,8 l/s, isto dá um caudal total de 106,2 l/s.

Utilizando as fórmulas empíricas de Manning-Strickler, obteve-se uma altura para a caleira de drenagem de 0,35 m.

Como a zona do passadiço existente, tem 0,60 m de largura, idealizou-se uma secção que pudesse ser construída e que ainda houvesse espaço para a instalação de 3 tugalbens

Ilustração 32 - Classe e características do maciço.

| C. Classe do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais | | | | | |
|--|----------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Peso | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | <21 |
| Número da classe | I | II | III | IV | V |
| Descrição | Rocha muito boa | Rocha boa | Rocha razoável | Rocha má | Rocha muito má |
| D. Significado das classes das rochas | | | | | |
| Número da classe | I | II | III | IV | V |
| Tempo médio de auto-sustentação | 20 anos para um vão de 15m | 1 ano para um vão de 10m | 1 semana para um vão de 5m | 10 horas para um vão de 2.5m | 30 minutos para um vão de 1m |
| Coesão do maciço rochoso (kPa) | >400 | 300-400 | 200-300 | 100-200 | <100 |
| Ângulo de atrito do maciço rochoso (°) | >45 | 35-45 | 25-35 | 15-25 | <15 |

Com a classe do maciço determinada, está-se em condições de estabelecer a sequência do processo construtivo do túnel.

A classificação de Bieniawski sugere para uma classe de maciço 3 as seguintes indicações como mostra a ilustração, Ilustração 33:

Ilustração 33 - Indicações de escavação e suporte a aplicar na execução do túnel de Acesso.

| Classe do maciço | Escavação | Suporte | | |
|------------------|--|--|-------------------------------------|---------|
| | | Pregagens (20mm diâmetro envolvidas em Grout) | Betão projectado | Cimbres |
| III | Secção parcial (frente e rebaixo), avanço 1,5-3m. Início do suporte após cada fogo. Suporte completo a 10m | Pregagens sistemáticas com 4m de comp., espaçadas de 2m nas paredes e tectos, com malha no tecto | 50-100mm no tecto 30 mm nas paredes | Nenhum |

Com esta avaliação, onde se estabeleceram classes geomecânicas e se estimaram tempos de auto-sustentação, consegue-se, também, obter uma primeira abordagem em relação ao tipo e conjugação de suportes a instalar, seguindo as recomendações do sistema RMR.

Portanto o método de escavação e tipos de suportes adoptados serão os seguintes:

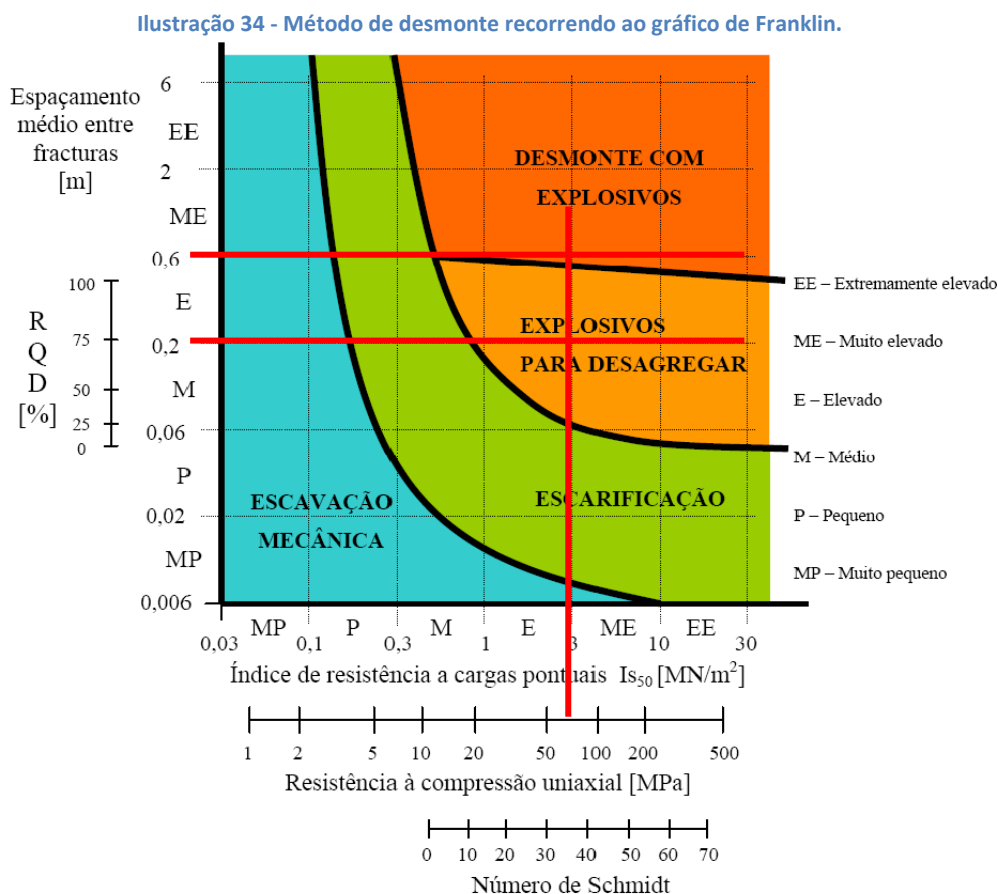
- Secção parcial (frente e rebaixo) com avanço de 1,5 a 3 metros;
- Pregagens sistemáticas com 4 metros de comprimento, espaçadas de 2 metros nas paredes e tectos;
- Malha electrosoldada do tecto;
- Betão projectado com espessura entre os 50 e 100mm no tecto e 30 mm nas paredes;

O suporte deverá ter início logo após cada desmonte e estar completo a 10 metros da frente.

É de salientar que a classificação de Bieniawski não contabiliza a profundidade a que se irá realizar a escavação, porque a partir de certas profundidades esta tem uma influência significativa no comportamento do maciço aquando do seu desmonte sendo a escolha do suporte muito sucinta.

Para o método de desmonte utilizado será o de Franklin, por ser aquele que relaciona a informação disponível neste projecto, nomeadamente o espaçamento médio entre fracturas e a resistência à compressão simples.

Segundo o Quadro 5, observa-se que para a zona do maciço ZG1, tem-se um grau de facturação F3, ou seja, medianamente afastadas, espaçamento entre os intervalos de 20 a 60 cm e uma resistência à compressão uniaxial de 75 MPa. Aplicando o gráfico de Franklin. Verifica-se que se necessita de explosivos para desagregar o maciço para de seguida se proceder ao seu desmonte, (Ilustração 34).



Como o túnel se encontra num meio urbano, em que se situam edifícios e uma ponte nas proximidades da localização do túnel de Acesso, o uso de explosivos iria criar vibrações

elevadas que se transmitiriam a todas estas estruturas situadas ao redor deste, podendo fazer com que surgissem patologias nas estruturas.

Por este motivo, o uso de explosivos para desagregar não serão utilizados e em substituição, utilizar-se-á uma máquina de ataque pontual para proceder ao desmonte do túnel.

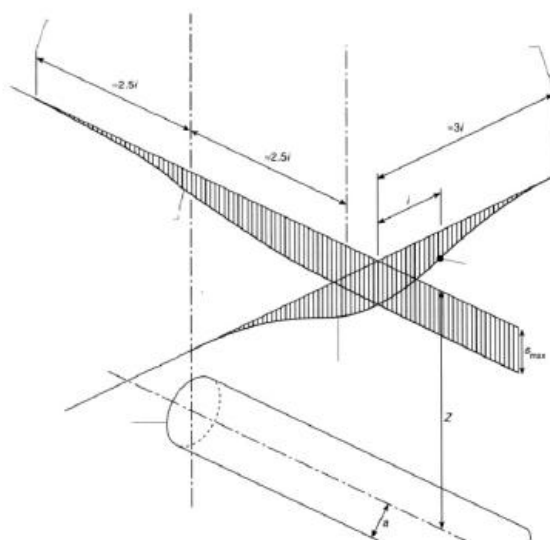
8. Plano de Monitorização

8.1. Acompanhamento e Observação na construção de Túneis

De entre as obras de Engenharia Civil, as que mais necessitam de uma observação cuidadosa são as estruturas subterrâneas, em especial os túneis. Tal deve-se a variadíssimas incertezas associadas a estas obras, entre as quais é possível destacar a incompleta caracterização geológica e geotécnica do maciço e o complexo comportamento estrutural do próprio túnel.

A observação das obras geotécnicas tem um largo historial, tendo os seus fundamentos sido propostos por Terzaghi nos anos trinta, pela necessidade de quantificar, medindo, o comportamento real das estruturas, como forma de assegurar os requisitos essenciais de segurança, durabilidade e funcionalidade, a minimização de anomalias de comportamento e dos eventuais riscos daí decorrentes (Adaptado de Loureiro, 2008).

Ilustração 35 - Ilustração dos possíveis anomalias durante uma escavação.



O controlo realizado pela Instrumentação efectua-se durante e depois da construção de qualquer obra subterrânea. Esse controlo justifica-se pelos seguintes motivos:

- Antes da Construção: com o objectivo de obter informação necessária para o projecto da escavação, por exemplo a recolha de dados sobre o módulo de deformação, resistência da rocha e estado de tensões *in situ*.

- Durante a Construção: para auscultação de cargas, tensões e deformações que confirmem todas as hipóteses admitidas em fase de projecto e, ao mesmo tempo, que proporcionem bases necessárias para a sua alteração em tempo útil se necessário.
- Depois da Construção: para controlo da evolução de tensões e deformações, como prevenção de possíveis problemas (roturas e deformações excessivas). [Adaptado de Cornejo *et tal.*, 1996].

A observação das obras deve efectuar-se de uma forma sistemática e planeada de modo a assegurar a obtenção de informação suficiente que permita (Amaral [15],2006)

- avaliar de forma adequada as condições de segurança, quer da estabilidade da frente, quer das edificações e instalações existentes na vizinhança (zona de influência do local instrumentado e observado), durante as diferentes etapas da vida das obras e intervir com medidas apropriadas, tão logo sejam detectadas condições anómalas ou perigosas (Pelizza [19], 1996);
- comparar as hipóteses de projecto (modelos de cálculo e parâmetros geotécnicos utilizados) com o comportamento observado;
- determinar as causas dos movimentos do solo, a sua magnitude e distribuição e o seu efeito nas estruturas mais próximas, garantindo que os assentamentos e distorções introduzidos pela escavação se situam dentro dos limites aceitáveis (em zonas urbanas, esta limitação de assentamentos é essencial para evitar danos em edificações e infraestruturas nas imediações do túnel) e definir o modelo de deformação do maciço permitindo a extrapolação do comportamento observado em secções já escavadas para secções não escavadas, de modo a possibilitar, quando necessário, a alteração dos métodos construtivos e das soluções estruturais adoptadas em função do comportamento real do maciço, num processo interactivo de optimização da concepção da obra, de forma a minimizar os deslocamentos e a necessidade do uso de técnicas de reforço para diminuir os distúrbios nas estruturas adjacentes;
- controlar a progressão das frentes de trabalho e o avanço de equipamentos;
- complementar o acompanhamento da escavação, o mapeamento geológico, a verificação de conformidades e as demais informações de campo;

- efectuar um controlo da qualidade da construção e a protecção dos intervenientes na obra quanto a questões legais;
- contribuir para o avanço dos conhecimentos, através de uma melhor compreensão dos fenómenos envolvidos, e da avaliação da eficácia de novas tecnologias e técnicas de construção eventualmente empregues.

A instrumentação instalada com mais frequência em obras subterrâneas é aquela que tem como objectivo medir movimentos relativos do terreno, desde o:

- interior da escavação: proporcionando uma informação directa e com menor possibilidade de erro;
- à superfície: no alinhamento do túnel a escavar, também é bastante importante para a análise, por exemplo, dos assentamentos derivados da sua escavação.

As medições e os equipamentos de instrumentação de uma obra subterrânea envolvem:

- **Movimentos verticais**: à superfície e em estruturas existentes (edifícios, estradas, etc.) através da utilização de nivelamento topográfico e em profundidade mediante a instalação de extensómetros (de barras) em secções de controlo.
- **Movimentos horizontais**: em profundidade através da instalação de inclinómetros em secções de controlo; medição de convergências no túnel com equipamentos de precisão.
- **Pressões**: através de células instaladas no interior do sustimento provisório.
- **Níveis piezométricos**: nas camadas permeáveis ao longo do traçado do túnel, através de tubos piezométricos instalados em furos verticais desde a superfície. (Trabada Guijarro [13], 1997).

Os principais equipamentos usualmente utilizados na observação e monitorização de túneis incluem extensómetros, inclinómetros, marcas topográficas de precisão, células de pressão, medidas de convergência e cartografia das frentes. Estes métodos são, geralmente, suficientes para estabelecer o ajustamento do modelo geomecânico a utilizar no dimensionamento dos suportes, bem como detectar as alterações induzidas pelo túnel às estruturas circundantes (Oliveira *et al* [14], 1994).

A estes métodos devem acrescentar-se as técnicas de reconhecimento da frente de escavação, uma vez que constituem eficientes processos de reconhecimento da rocha a escavar e de detecção antecipada de anomalias, bem como as técnicas específicas de monitorização ambiental, com destaque para a medição de vibrações e ruídos.

8.2. Principais actividades de observação geotécnica

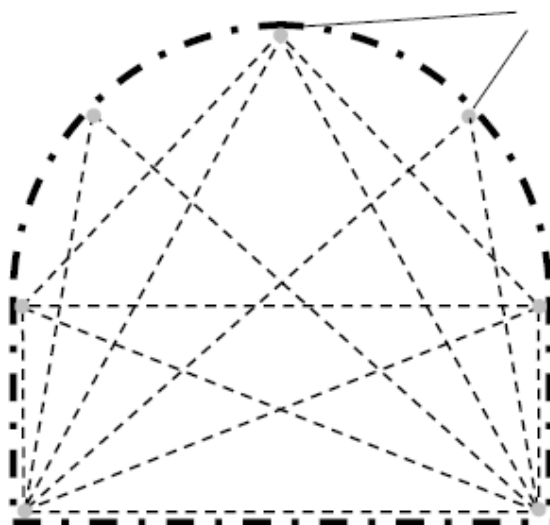
8.2.1. Medição de Convergências

A medição de convergências é possivelmente o método de instrumentação com a maior relação benefício/custo, tratando-se de um processo simples, económico e rápido.

Esta técnica tem lugar em secções preparadas para o efeito, como mostra a Ilustração 36, permitindo a obtenção dos deslocamentos relativos de contracção ou expansão do perímetro do túnel, possibilitando assim a aferição do comportamento dos sistemas de suporte.

As modernas tecnologias permitem ainda, além da avaliação dos deslocamentos relativos, a medição dos deslocamentos absolutos, através de métodos topográficos, fundamentalmente electromagnéticos. Esta técnica é especialmente apropriada para a detecção dos movimentos de soleira e de assentamento global do túnel, aplicando-se preferencialmente nas zonas de emboquilhamento ou em túneis pouco profundos em meios urbanos. (Bastos [17], 1998).

Ilustração 36- Secções possíveis de medição de convergências (adaptado de Cunha [16]).



8.2.2. Inclinómetros

Os movimentos transversais ao eixo e os deslocamentos em avanço sobre a escavação, podem ser detectados com a utilização de inclinómetros instalados geralmente a partir da superfície, com o objectivo de medir e localizar zonas de deformação do maciço e avaliar o seu desenvolvimento no tempo. O sistema é constituído por uma calha inclinométrica, um torpedo com um sensor constituído por um servo – acelerómetro (dois no caso dos biaxiais), um cabo de controlo, um cabo de reboque e uma unidade de leitura, como mostram as Ilustrações 37 e 38. A calha é instalada num furo tipo sondagem e serve posteriormente para guiar o torpedo, permitindo a leitura da inclinação.

Ilustração 37 - Sonda inclinométrica - inclinómetro (adaptado de Melâneo [10]).





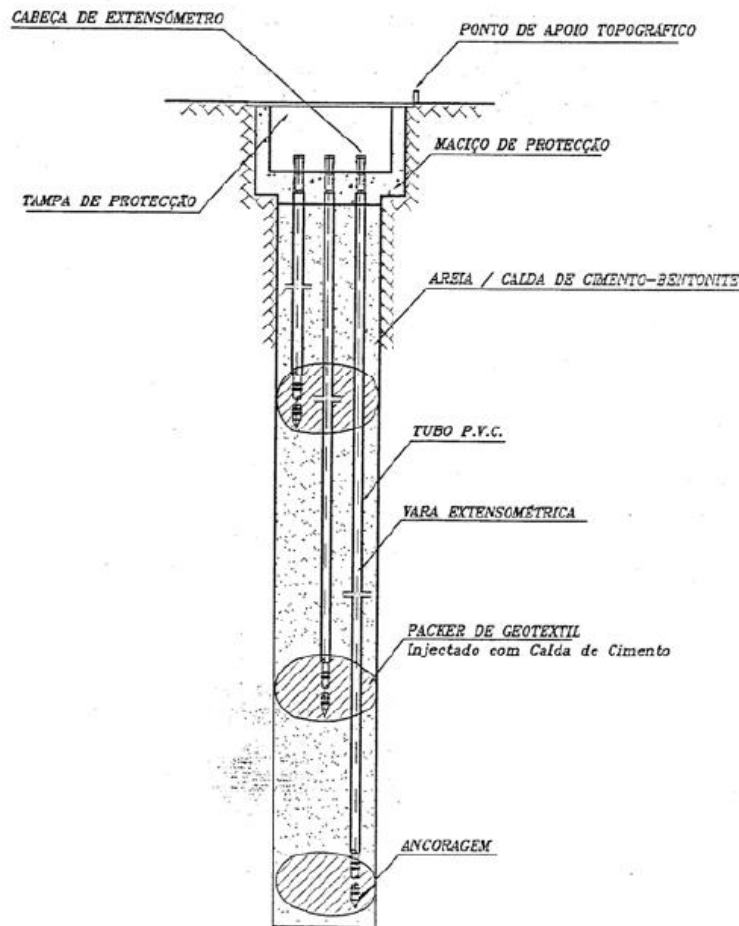
8.2.3. Extensómetros

Para determinação do valor dos deslocamentos no interior do maciço são usados extensómetros simples ou múltiplos.

Os extensómetros, como o representado na ilustração, Ilustração 39, permitem efectuar medições de deslocamentos ao longo de uma direcção linear. Estes são sistemas com componentes fixos, sendo os mais comuns os extensómetros de barras e de fios, e podem ser instalados em furos de sondagem ou a partir do interior da cavidade. O extensómetro é constituído por ancoragens fixadas a diferentes profundidades, ligadas a um conjunto de barras ou fios tensionados, que permitem a medição das distâncias axiais das ancoragens a uma cabeça de referência fixada à boca do furo. O deslocamento medido pode ser um deslocamento longitudinal relativo de pontos ao

longo do furo, ou um deslocamento absoluto se a cabeça do furo ou uma das ancoragens puder ser considerada fixa (adaptado de Amaral [15], 2006).

Ilustração 39 - Extensómetro de superfície de cabeça tripla embutida (Amaral [15],2006).



Os extensómetros, quando colocados a partir da superfície ou desde cavidades vizinhas, podem ser instalados antes de se iniciar a escavação, o que possibilita a quantificação da deformação antes da passagem da frente. Se o extensómetro for colocado a partir do interior da cavidade, a sua interpretação será semelhante a uma medida de convergência.

8.2.4. Medição de assentamentos à superfície

No caso de túneis urbanos é frequente instalarem-se à superfície e em antecipação à escavação do túnel na vizinhança envolvente, *marcas topográficas de nivelamento* de forma a acompanhar a evolução dos assentamentos à superfície, Ilustrações 40 e 41.

Ilustração 40 - Esquema da instalação de uma marca topográfica de nivelamento (adaptado Loureiro [12]).

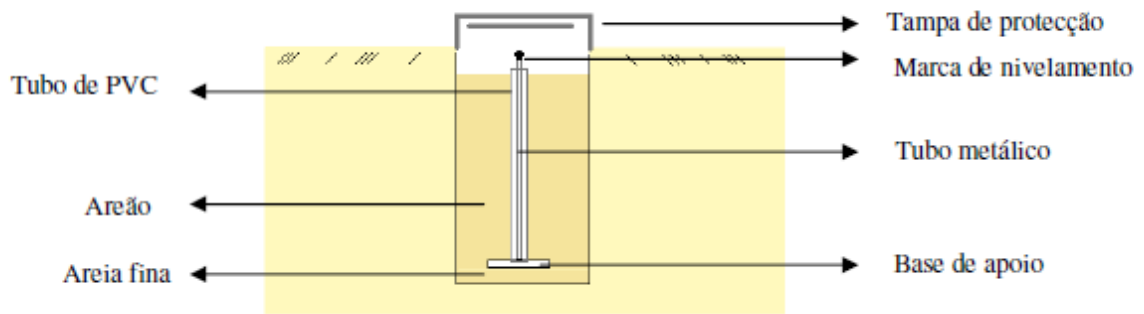
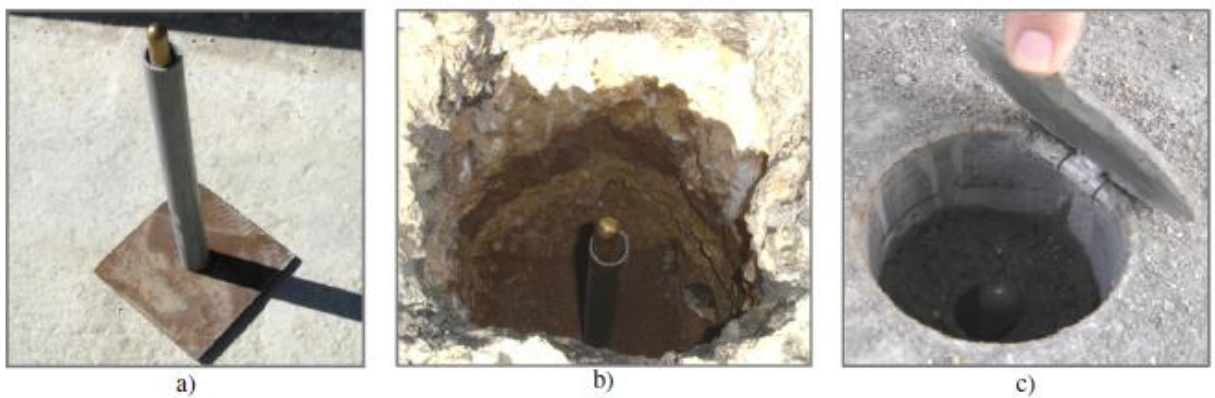


Ilustração 41 - a) Marca de nivelamento com tubo de PVC, b) Colocação no furo, c) Tampa de protecção (adaptado Loureiro [12]).



8.2.5. Medição da pressão/níveis de água

Através de um sistema de medição com *piezómetros* instalados de acordo com o nível freático detectado, mede-se a variação do nível piezométrico e consegue-se inferir sobre a sua pressão ao longo do maciço e como pode afluír para a escavação. Deste modo torna-se possível monitorizar o posicionamento do nível da água face à superfície e controlar as tensões existentes num determinado ponto do maciço, avaliando-se a segurança do maciço monitorizado. Os mais aplicados nas acções de monitorização e controlo de maciços são os piezómetros de tubo aberto ou de Casagrande, os hidráulicos e os de diafragma (pneumáticos, eléctricos ou de corda vibrante).

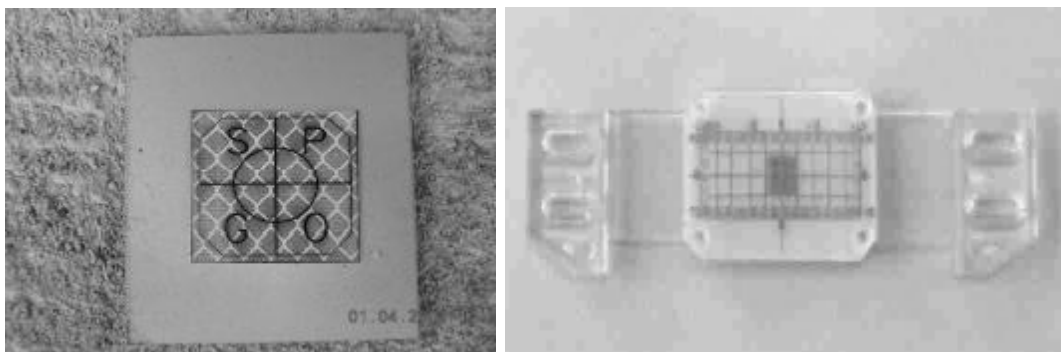
8.2.6. Medição de assentamentos

Para observar e controlar os edifícios da vizinhança do túnel são utilizados para maior controlo dos assentamentos da estrutura *alvos topográficos* e *réguas*, como mostra a Ilustração 42.

Também os *clinómetros* podem ser utilizados para o efeito, apesar de não medirem directamente os assentamentos de uma estrutura. Estes dispõem de um dispositivo de nivelção horizontal (nível de bolha) que para além de assegurar o nivelamento inicial do dispositivo durante a sua colocação, permite monitorizar e controlar qualquer alteração que ocorra no seu estado inicial (Marques, [18]).

Também os *fissurómetros* são muito utilizados na observação de edifícios, uma vez que permitem medir a abertura de fendas, (podem também ser utilizados na zona da abóbada do túnel).

Ilustração 42 - Exemplos de um fissurómetro e de um alvo topográfico (adaptado de Melâneo [10]).



8.3. Frequência de Leituras

Apesar de se definir uma frequência de leituras para as grandezas a medir, no início dos trabalhos em obra é importante ter em conta que a frequência de leitura da instrumentação associada a cada grandeza é função de certas e determinadas condicionantes (fases e metodologias construtivas, ritmos de execução, evolução posterior das grandezas a controlar, etc.).

Leituras demasiado frequentes, podem sobrecarregar a capacidade do processo de edição de dados e de interpretação, o que impede a análise sistemática e aumenta o custo de instrumentação. Contudo, se as leituras se distanciam demasiado, a percepção de variações significativas das magnitudes a controlar podem passar despercebidas, tendo como consequência a diminuição da segurança da obra. Assim, aliada à frequência de leituras, está a necessidade de se obter um equilíbrio entre a abundância de dados e a capacidade da sua análise imediata, optimizado pelos recursos humanos e de equipamentos disponíveis.

Portanto, é aconselhável realizar medições frequentes no início dos trabalhos (medições diárias), e ir modificando a sua frequência em função dos resultados obtidos (1 ou 2 vezes por semana). (Adaptado de Daniel [20], 2011).

8.4. Instrumentação

O plano de observação implementado no túnel de acesso lateral, ferramenta fundamental na prevenção e gestão de riscos, tem como objectivo garantir a realização, em condições de segurança e economia, dos trabalhos relativos à escavação e à aplicação do revestimento primário e secundário, assim como a análise do comportamento das estruturas e infra-estruturas vizinhas, durante a execução da obra.

É de salientar que todos os aparelhos de monitorização serão colocados logo após a escavação da secção do túnel porque é nesta fase que os valores de deformações serão mais elevados e de elevada importância para a segurança durante a escavação do túnel.

Este plano permite a medição, durante e após os trabalhos relativos à escavação e construção das estruturas de contenção, das seguintes grandezas:

1. Deslocamentos horizontais e verticais no interior do maciço;
2. Deslocamentos verticais no terreno;
3. Deslocamentos horizontais e verticais nos edifícios vizinhos.

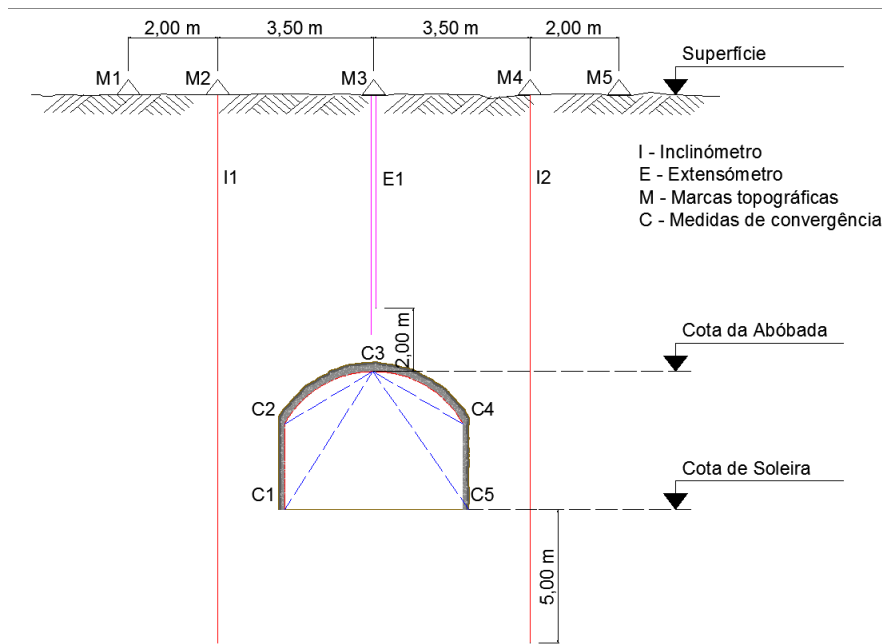
Para a medição destas grandezas utilizaram-se os seguintes equipamentos instalados nas diversas secções de escavação do túnel, como mostra a ilustração, Ilustração 43:

- 2 Inclinómetros por secção;
- 5 Medidores de convergência por secção;
- 1 Extensómetro por secção;

e á superfície;

- 4 Marcas de nivelamento.

Ilustração 43 - Pormenor da instrumentação instalada em cada secção.



8.5. Limites de Alerta e Alarme

Tendo por base o tipo de contenção, assim como a geologia do local da intervenção e os resultados dos modelos de cálculo desenvolvidos, estimaram-se os seguintes valores máximos para os níveis de alerta e alarme, que uma vez ultrapassados, implicaria recorrer às medidas de reforço determinadas no projecto.

Na prática corrente, os limiares de notificação, pré-aviso, e de atenção, são definidos com percentagem de 30%, 60% e 90%, (Diogo [20], 2011), do máximo deslocamento que o modelo de cálculo representa.

Estas percentagens foram consideradas para duas fases de execução do túnel, como mostra a seguinte tabela, Quadro 18:

Quadro 18 - Tabela com a identificação dos limiares de segurança durante a execução do túnel.

| Sem revestimento aplicado: | | | | |
|----------------------------|-------------|-----|--------------------------|------------------------------|
| | Limiares | (%) | Deslocamento Máximo (mm) | Deslocamento Admissível (mm) |
| Abóbada | Notificação | 30 | 16,02 | 4,8 |
| | Pré-Aviso | 60 | 16,02 | 9,6 |
| | Alerta | 90 | 16,02 | 14,4 |
| Hasteias | Notificação | 30 | 3,19 | 1 |
| | Pré-Aviso | 60 | 3,19 | 1,9 |
| | Alerta | 90 | 3,19 | 2,9 |
| Com revestimento aplicado: | | | | |
| | Limiares | (%) | Deslocamento Máximo (mm) | Deslocamento Admissível (mm) |
| Abóbada | Notificação | 30 | 10,40 | 3,12 |
| | Pré-Aviso | 60 | 10,40 | 6,24 |
| | Alerta | 90 | 10,40 | 9,36 |
| Hasteias | Notificação | 30 | 2,94 | ,88 |
| | Pré-Aviso | 60 | 2,94 | 1,7 |
| | Alerta | 90 | 2,94 | 2,6 |

As medições de convergência serão realizadas logo após a escavação do túnel e continuarão a ser registadas até que se verifique que os valores das medidas apresentarem tendência para a estabilização.

9. Conclusões

Este trabalho teve o intuito de transmitir que com o passar do tempo, qualquer obra de arte, neste caso de túneis, começa a padecer de patologias típicas, como infiltrações de água, erosão das alvenarias do revestimento e outras aqui referidas, que com uma manutenção e monitorização constantes poderiam ser evitadas ou detectadas num menor espaço de tempo, fazendo com que a sua reparação fosse uma actividade menos demorada e causa-se menos transtornos aos utentes que usufruem todos os dias das linhas ferroviárias.

Constata-se que apesar de o estado do revestimento no global ser razoável, as soluções aplicadas para a beneficiação do túnel são actividades bastante morosas, dado que o túnel tem uma extensão total cerca de 950m.

As soluções aqui referidas são as soluções possíveis às exigências do Dono de Obra, em que exige impreterivelmente que a traça original do túnel seja mantida, assim sendo todas as soluções, foram estudadas face a esta exigência.

Como foi dito a existência de infiltrações de água num túnel é um factor bastante nefasto e ao tomar medidas bastante conservativas, para que qualquer aumento de caudal percolado no maciço, garante-se o bom desempenho do sistema de drenagem idealizado.

Os acidentes num túnel ferroviário, têm uma probabilidade bastante baixa, no entanto as consequências destes incidentes são severos em termos de vítimas.

Com as catástrofes ocorridas no passado em túneis, levou a uma consciencialização do impacto destas, portanto houve a necessidade de túneis mais seguros. Assim sendo hoje me dia um túnel tem que cumprir exigências de segurança, sendo equipado com mais órgãos de segurança, instalação de redes de incêndio no interior do túnel, acessos para a evacuação das pessoas em caso de emergência, passadiços longitudinais por onde possam evacuar facilmente, iluminação constante ao longo do túnel e sinalização de emergência de forma a orientar as pessoas para o exterior, de forma a aumentar os níveis de segurança.

O estágio realizado na empresa Edgar Cardoso, Laboratório de Estruturas permitiu estabelecer contacto com a realidade de trabalho associada ao Projecto de Obras de Arte e à Engenharia Civil.

O início de actividade neste ramo tem por base os conhecimentos e capacidades de trabalho adquiridos durante a Licenciatura e Mestrado, os quais se mostraram essenciais para a integração na profissão.

Revelou-se fundamental o contacto sistemático com colegas de trabalho com maior experiência, permitindo assim a discussão de problemáticas, no sentido de apurar melhores soluções de projecto. Simultaneamente verificou-se que a pesquisa de soluções adoptadas em projectos anteriormente realizados pela empresa Edgar Cardoso, Laboratório de Estruturas, a par de eventuais esclarecimentos por parte do engenheiro responsável pela sua elaboração, constituía uma forma expedita e segura de abordar soluções desconhecidas do estagiário.

Esta forma de trabalho no seu conjunto permitiu um ganho de conhecimentos bastante significativo num intervalo de tempo relativamente curto, levando assim a uma rápida evolução durante o período inicial do estágio.

Dado que a actividade do engenheiro projectista se desenvolve sobretudo em gabinete, o contacto com a realidade da obra é por vezes escasso, conduzindo tal facto a uma falta de percepção das reais dificuldades da execução.

Através da realização de projecto, foi constatado que a produção do projecto de estruturas envolve a nível interno, o contacto com equipas de desenho, que contribuem para um produto final a apresentar ao cliente.

Este contacto surge como uma novidade face à experiência adquirida na Licenciatura e Mestrado, sendo necessária uma aprendizagem das funções, ferramentas utilizadas, ritmos de produção e competências dos desenhadors.

Como tal, foi possível aprender como se deve desenvolver o trabalho em equipa entre engenheiros e desenhadors, e como um desenhador experiente e competente constitui um recurso fundamental para o sucesso de um projecto, quer em termos de tempo de execução, quer em termos da qualidade e apresentação final do projecto.

A aprendizagem durante o estágio levou também à necessidade de aperfeiçoamento da manipulação de ferramentas de cálculo. Dadas as suas potencialidades, os programas de cálculo automático de estruturas são utilizados recorrentemente, sendo contudo imprescindível perceber as suas limitações.

Desta forma, toma-se como uma conclusão importante a reter, a necessidade de aprender a obter formas simples de validação dos resultados obtidos através de programas de cálculo. A confiança nos modelos de cálculo deve apenas surgir após correcta validação dos resultados apresentados, sendo da maior importância manter sempre uma postura crítica face aos resultados obtidos.

Finalmente e em nota de conclusão importa referir que o processo de transição entre o meio académico e o meio profissional é complexo e exige que o estudante mantenha uma postura aberta à aprendizagem de novas formas, ritmos e ambientes de trabalho.

Desta forma foi possível ao longo deste período evoluir em termos de competências técnicas, adquirindo importantes conhecimentos e preparando assim o estudante para o exercício da Engenharia Civil no âmbito do projecto de estruturas.

Bibliografia

1. Título: Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes,
Organizador: Daniel Coelho Maria
Editor: Publisher Team
2. Eurocódigo
3. Eurocódigo 7
4. Título: Betão Armado - Esforços Normais e de Flexão (REBAP-83)
Autores: Autores: J. D'Arga e Lima, Vitor Monteiro
Editor: LNEC
5. Título: Foundation Analysis and Design,
Autores: Joseph E. Bowles, 4th Edition,
Editor: Mc Graw-Hill
6. Título: Mecânica dos Solos e suas aplicações, Mecânica das Rochas - Fundações – Obras de Terra,
Autores: Homero Pinto Caputo, 6^a Edição,
Editor: Livros Técnicos e Científicos Editora
7. Título: Tecnologia de Fundações,
Autores: Silvério Coelho, Edições
Editor: E.P.G.E.
8. Título: Reabilitação de Edifícios Antigos, Patologias e tecnologias de intervenção,
Autores: João Appleton,
Editor: Edições Orion.
9. Título: Túneles y Obras Subterráneas
Editor: Editores Técnicos asociados, S.A., Barcelona

10. Sebenta da Unidade Curricular de Obras Subterrâneas, 2009/2010, Produzida pelo Docente do ISEL: Eng.º Frederico Melâneo.
11. Dissertação “Controlo da Segurança de Túneis Ferroviários” – Desenvolvimento de Metodologias de Apoio e de Sistemas Baseados em Conhecimento
Realizado por Cristina Maria de Oliveira da Silva, sob orientação do Professor Luís Ribeiro e Sousa
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001
12. Dissertação “Aspectos geotécnicos na construção de túneis em áreas urbanas” – Aplicação a terrenos de baixa resistência do Miocénico de Lisboa
Realizado por Telma Helena Ataíde Loureiro, sob orientação do Prof. Doutor José Alcino Rodrigues Carvalho
Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008
13. TRABADA GUIJARRO, J. (1997). “*Excavación en terrenos blandos*”. Manual de túneles y obras subterráneas. Ed. C. López Jimeno. Entorno Grafico, S. L. Madrid.
14. OLIVEIRA, R.; ROXO, J. C.; MELÂNEO, F. (1994). “*Engineering geology and urban tunnels in hard soils/soft roks: The CRIL tunnel in Lisbon*”. 7th International Congress, International Association of Engineering Geology. 5-9 September 1994. pp. 4355-4361. Ed. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
15. Dissertação “Análise dos resultados de observação dos túneis do Metropolitano de Lisboa”
Realizado por Maria João Salgueiro Amaral, sob orientação do Prof. *Doutor Jorge Almeida e Sousa*
Dissertação apresentada na *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2006.
16. CUNHA, A. P. (1994). “*Controlo, observação e segurança de túneis rodoviários*”. Seminário de Túneis Rodoviários. IST, Lisboa, 31 de Janeiro a 3 de Fevereiro de 1994. pp. 173-182.

17. Dissertação “A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos”
Realizado por Mário José Nascimento Bastos, sob orientação do Prof. Catedrático Carlos A. J. V. Dinis da Gama
Dissertação apresentada no *Instituto Superior de Lisboa*, 1998
18. MARQUES, L. (2007). “Monitorização estática e dinâmica: aplicações”.
Dissertação para obtenção do grau de mestre. Universidade do Minho, Escola de engenharia.
19. PELIZZA, S. (1996). Trends and development in tunnelling. Int. Seminar on Urban Problems and Underground Solutions, São Paulo, Brasil.
20. Dissertação “Análise do Comportamento da Galeria de Conexão da Estação de Guinardó do Metro de Barcelona durante a sua Construção e com chegada da Tuneladora.
Realizado por Diogo Martins Faria Daniel, sob orientação da Prof.^a M^{aria} Rafaela Pinheiro Cardoso
Dissertação apresentada no *Instituto Superior Técnico*, 2011.
21. Inspeção e Controlo da Segurança de Túneis dos Caminhos de Ferro Portugueses - Túneis da Trindade, São Bento, Seminário II, Tamel e Caminha
Relatório Oficial do LNEC realizado em 11 de Novembro de 1996.
22. Estudos Relativos aos Túneis da Rede Geral da CP - Linha do Minho, Linha do Douro, Linha do Norte e Linha da Beira Baixa
Relatório Oficial do LNEC realizado entre Janeiro de 1991 e Janeiro de 1992.
23. Dissertação “Manutenção e Reabilitação de Túneis”
Realizado por Karoline Brasileiro Quirino Lemos, sob orientação do Professor André Pacheco de Assis
Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, 2005

24. Dissertação "Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos"

Realizado por Tiago Filipe da Silva Miranda, sob orientação do Professor

Francisco Ferreira Martins

Universidade do Minho, 2005

Consulta Web:

http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Nat_Journ/2003_Roque_Lourenco.pdf, Agosto 2011;

<http://skynet.eng.br/projetos/geopav/SISTEMA/ARQUIVOS2/13026654173415.pdf>, Agosto de 2011;

http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1162__T%C3%A9cnicasreabilitacao_alvenarias.pdf, Agosto de 2011;

www.estradasdeportugal.pt/index.php/.../14-empreendimentos Julho de 2011;

<http://www.engenhariacivil.com/dimensionamento-pregagens-solos>; Julho de 2011

<http://pcc2506.pcc.usp.br/Aulas/M%C3%B3dulo%2009%20-%20Tuneis.pdf>, Setembro de 2011;

http://www.solotrat.com.br/ws/manual/pt_ManTunelNATM.pdf; Junho de 2011;

<http://www.geocompany.com.br/ftp/tuneis.pdf>, Setembro de 2011;

<http://www.tecnogeo.com.br/servicos>; Setembro de 2011;

<http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Reabilitacao/Materiais%20e%20Tecnicas%20Tradicionais%20de%20Construcao.pdf>; Junho de 2011;

http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1162__T%C3%A9cnicasreabilitacao_alvenarias.pdf; Junho de 2011.