

Sbo

Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projecto à obra

#08, fevereiro 2017
**A construção dos túneis
do Metro do Porto,
Faria Guimarães e Túnel J**

Porto

"Túnel S"

António Topa Gomes e Jorge Quelhas

88.25

84.00

76.35

70.00

VALA P/ EMBOCO
(VER PROJECTO)

Editor

Cadernos d'Obra

Diretor

Vitor Abrantes

Coordenação Editorial

Bárbara Rangel

Comissão Editorial

Abel Henriques

Ana Sofia Guimarães

António Silva Cardoso

Joaquim Poças Martins (presidente da OERN)

Paulo Conceição

Rui Faria

Conceção Gráfica

Incomun

Créditos Fotográficos

Metro do Porto

Impressão

Rainho e Neves

1.ª edição, fevereiro 2017

2.ª edição, maio 2017

3.ª edição, setembro 2019

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 500 exemplares

Preço por número

4,50 euros

Publicação periódica

n.º 8. Ano III, fevereiro 2017

Propriedade

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

Iniciativa e produção

Departamento de Engenharia Civil da FEUP

Com o apoio de

Universidade do Porto

Câmara Municipal do Porto

Ordem dos Engenheiros Região Norte

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

A iniciativa “Fora de Portas engenharia civil à mostra”, resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

Editorial. A cidade do Porto, ao longo da sua história foi tendo intervenções urbanas decorrentes das necessidades de cada época que foram deixando marcas no desenho da cidade. Na configuração atual da cidade, ainda se conseguem ler os 5 eixos estruturantes de ligação da cidade, patentes na “Planta Redonda” de 1813, desenhada por George Balck. Ao contrário de Lisboa que sofreu intervenções urbanas de larga escala que foram compondo as cidades de várias épocas, como a cidade pombalina na Baixa, ou a cidade moderna na Avenidas Novas, o Porto foi consolidando a sua forma ao longo destes grandes eixos visíveis no plano regulador da Cidade do Porto de 1954 e agora destacadas com a intervenção decorrente da construção do Metro do Porto.

Passados quase 20 anos da construção dos primeiros troços da rede do Metro do Porto, são já visíveis as transformações urbanas que provocou, tanto na cidade como nas cidades vizinhas. A cidade da Maia, atravessada pelo Metro reabilitou todo o centro cívico. Vila Nova de Gaia conseguiu depois de décadas, estruturar a maior artéria da cidade, a Av. da República. Matosinhos, ao longo da via do Metro criou uma “via verde” que serpenteia pelo interior da cidade. No Porto, onde o espaço para construir linhas exteriores era praticamente impossível, a linha perfurou o subsolo, gerando novas centralidades nos pontos de saída que estavam até então esquecidas. A grande movimentação de pessoas, fez ressurgir o Campo 24 de Agosto como uma praça. A estação do Bolhão permitiu trazer outra vez pessoas para a baixa. A construção da estação da Av. dos Aliados foi uma boa razão para se repensar a Ágora da cidade.

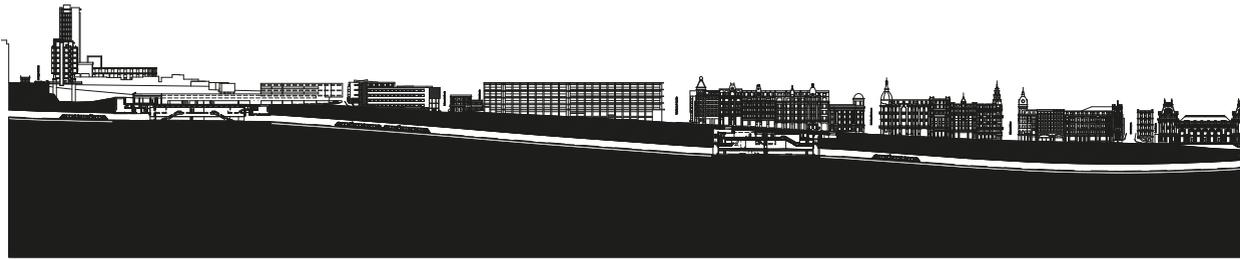
A construção deste grande “polvo subterrâneo” no interior da cidade foi um dos maiores desafios para a engenharia civil portuguesa neste início de século, não só do ponto de vista urbano, mas em particular na sua componente Geotécnica. Numa cidade compacta de elevada densidade, construíram-se túneis num curto intervalo de tempo, em várias frentes e com a cidade a funcionar em pleno. Nos túneis novos adotaram-se as tecnologias mais avançadas e os antigos, antes ocupados pelos comboios, consolidaram-se recorrendo às técnicas tradicionais de construção subterrânea. Nesta SbO, apresentam-se as particularidades desta obra, desde as condições geológicas do Porto, às tecnologias adotadas para construir e consolidar esses túneis. O Eng. António Topa Gomes, docente na FEUP mas responsável da obra do Metro aquando da sua construção e o Eng. Jorge Quelhas atualmente a trabalhar na manutenção desta estrutura, ensinam-nos a entender a complexidade desta construção e relatam-nos as dificuldades da sua execução e manutenção.

Bárbara Rangel

Porto, 22 fevereiro 2017

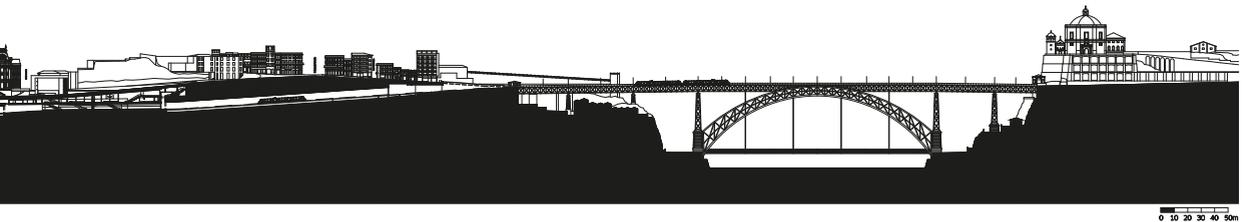


A construção dos túneis do Metro do Porto, Faria Guimarães e Túnel J





Estação Aliados -
Toda a escavação
executada em cut
& cover





Estação Marquês - parte central escavada em poço, foto aérea
> Rede atual do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto

1. Introdução

A criação do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto representou um grande passo para a mobilidade e a modernidade da região, alterando radicalmente a mobilidade e a forma de a viver dos portugueses.

A característica diferenciadora deste sistema de Metro do Porto é a coexistência de três diferentes filosofias de transporte: urbano de superfície ("elétrico"), metro tradicional e comboio suburbano. O mesmo veículo opera nos três modos, consoante a zona da rede. Para permitir capacidade e regularidade adequadas, utiliza canal próprio e, onde há atravessamentos nivelados, tem prioridade.

Pode-se dizer que a história do Metro do Porto começou com a criação da empresa com esse nome, em 1994, que desde essa data trabalhou para o desenho da rede,

seu financiamento e contratação da sua materialização. A construção veio a começar em 1999, seguindo-se um crescendo de abertura de frentes de trabalho.

Em 2002 iniciaram-se viagens regulares num primeiro troço, e em 2004 é inaugurado o primeiro trecho em túnel. A rede esteve em crescimento até 2011, atingindo a configuração atual. Estão agora a ser projetadas novas expansões.

O sistema foi pensado para a maior eficiência e acessibilidade. Atualmente transporta 58 milhões de passageiros/ano, evita 55 mil toneladas/ano de emissões de CO₂, e reduz a circulação de automóveis em 12 mil carros/dia.



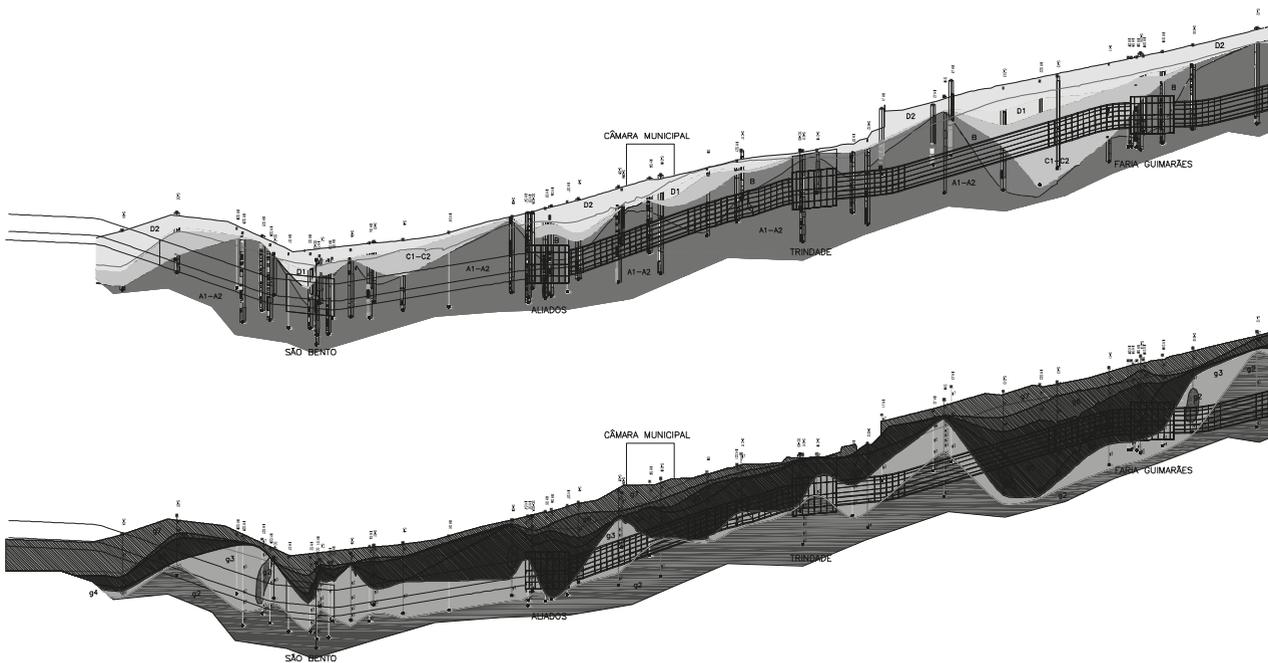
2. A geologia do Porto

As condições geológicas evidenciadas durante a construção dos antigos túneis ferroviários da cidade do Porto, do final do séc. XIX, e do túnel rodoviário da Ribeira, já do séc. XX, que exigiram o recuso à utilização de explosivos, levaram a comunidade a considerar que a construção subterrânea na cidade para um Projeto de Metro não seria viável. Durante muitos anos, a ideia de que o “Granito do Porto” era impenetrável foi justificação para, apesar de considerado necessário para o desenvolvimento da cidade, protelar a iniciativa de investimento num projeto de metro para o Porto. Efetivamente, a Geologia foi, como em qualquer obra subterrânea, um fator decisivo para o dimensionamento e construção dos troços enterrados do Metro do Porto, mas não foi impeditivo da sua realização.

Os granitos predominam no subsolo do Porto. Quando muitas vezes retratamos o Porto como a cidade do granito - ver por exemplo extrato do poema *Ah! Ver o Porto* de Helder Pacheco - transcrito a seguir - esquecemo-nos que esta característica da cidade resulta dos seus terrenos, de onde foi possível extrair a matéria-prima para as suas construções.

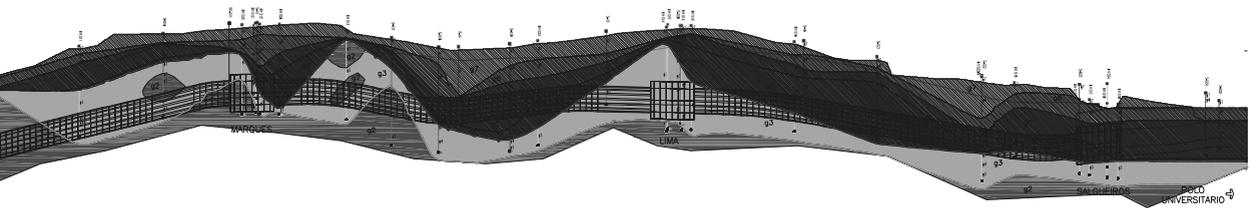
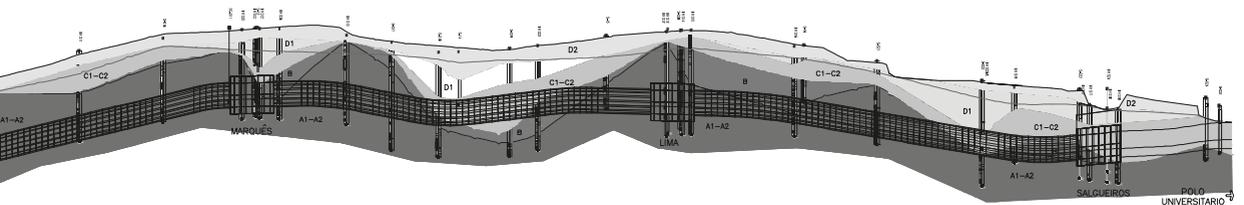
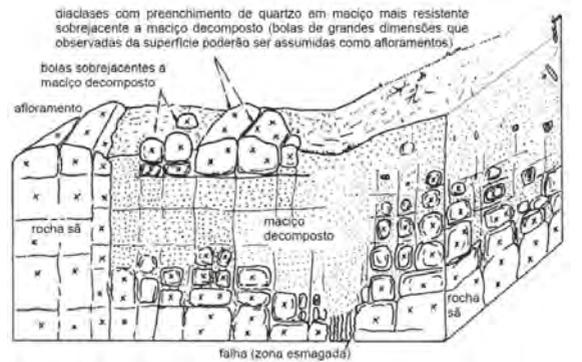
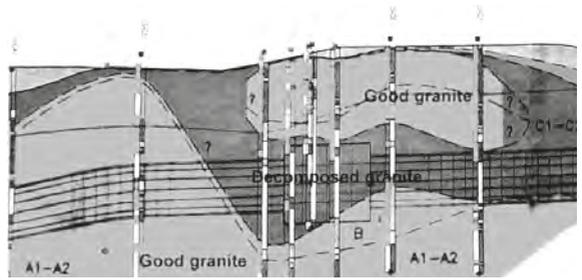
Ah! Ver o Porto... Ver o Porto é - sempre ou quase - um ajuste de contas. É um acertar das nossas percepções com as imagens de certa forma de perenidade que guardamos num recanto da memória (ou talvez da fantasia), dentro de nós. Imagens das escuridões eivadas de sobressaltos e inquietudes (ou solidões) quando anoitece. Quando anoitece e aumenta aquela impressão subjectiva - será do granito e das morrinhas ou é apenas sentimento? - da cidade sombria e húmida, da cidade agreste e desabrida. Imagens de tonalidades frias dos invernos do noroeste, mesclados de azul esbranquiçado e verde, em transparências, em velaturas de suaves e quase imperceptíveis gradações.

A região do Porto caracteriza-se pela abundância de rochas graníticas, predominando um granito de duas micas, de grão grosseiro a médio, de cor clara, acinzentado ou amarelado, sendo esta variação da coloração o resultado da evolução do grau de alteração. Alteração e a fracturação do granito condicionam a circulação de água, dando origem a uma estrutura hidrogeológica muito complexa, com diferenças relevantes de



permeabilidade. Acresce que a circulação de água é influenciada pela abundante rede de poços, galerias e minas subterrâneas. Além dos fenómenos de meteorização clássicos das rochas, a intensa circulação de água subterrânea criou condições favoráveis à ocorrência de processos de alteração da rocha, atravessando as obras subterrâneas maciços graníticos com praticamente todos os graus de alteração, desde o granito praticamente são até solos residuais graníticos, alguns deles já sem a presença da estrutura inicial da rocha mãe.

Mais do que a dureza do granito, preocupação popular numa fase inicial, o que mais dificuldades criou à realização da obra subterrânea no Metro do Porto foi a rápida, intensa e quase errática variação do seu subsolo, levando a que, em curtas distâncias, se passasse da escavação em granito muito competente para solos residuais, pouco resistentes e muito deformáveis. A meteorização intensa e errática até profundidades da ordem das duas dezenas de metros, caracterizada pela presença de bolas de granito mais resistente envolvidas por uma matriz por vezes saprolítica, originou muitas dificuldades no desenho de modelos geológico-geotécnicos robustos. Este ambiente geológico obriga a uma abordagem aberta e abrangente das várias condições passíveis de se encontrarem. Esse terá sido o maior desafio na realização das escavações enterradas do Metro do Porto.



Extrato do modelo geotécnico simplificado na zona da estação Heroísmo
Esquema típico de meteorização em formações graníticas (traduzido de R. Fell et al.)

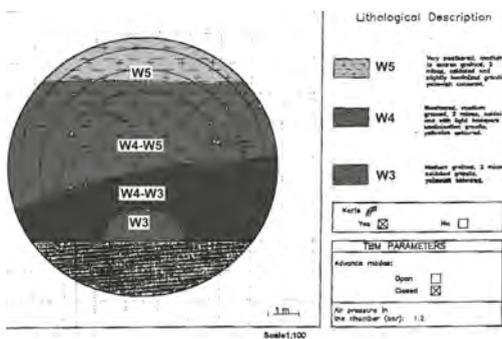
Perfis geológico-geotécnicos do túnel escavado com TBM entre S. Bento e Pólo Universitário

3. Construção subterrânea

A construção subterrânea pode dividir-se em dois grandes grupos: *cut & cover*, em que a escavação é feita a céu aberto e, posteriormente, aterrada; construção mineira, em que a escavação subterrânea é feita sem interferir com a superfície. No Metro do Porto as duas técnicas foram adotadas. A primeira, em estações como Aliados, Campo 24 de Agosto, Casa da Música, Pólo Universitário, S. Bento, Salgueiros e Trindade e em alguns trajetos enterrados. A segunda, na generalidade dos túneis e nas restantes estações enterradas, Bolhão, Combatentes, Faria Guimarães, Heroísmo e Marquês.

No caso da escavação mineira, ou em túnel, são dois os grandes processos possíveis para a construção de túneis: Escavação convencional, usando o Método de Escavação Sequencial; Escavação mecanizada, usando as chamadas Tuneladoras.

O primeiro processo, o Método de Escavação Sequencial, consiste numa sequência de operações em que se escava e se coloca o suporte, o mais rapidamente possível. Para a escavação são adotados, dependendo das características do maciço, explosivos, cabeças roçadoras, retroescavadoras, ou outro tipo de equipamentos. Para o suporte, elementos como o betão projetado, as pregagens, o reforço da frente de escavação são soluções usualmente adotadas. É ainda frequente a adoção de “guarda-chuvas”, que consistem na antecipação da concretização do suporte, ainda antes da escavação efetuada, com a realização de elementos resistentes horizontais, adiante da frente de escavação. Estes elementos podem ser microestacas (tubos metálicos de pequeno diâmetro com calda de cimento exterior) ou *jet-grouting* (calda de cimento misturada com o terreno a altas pressões).



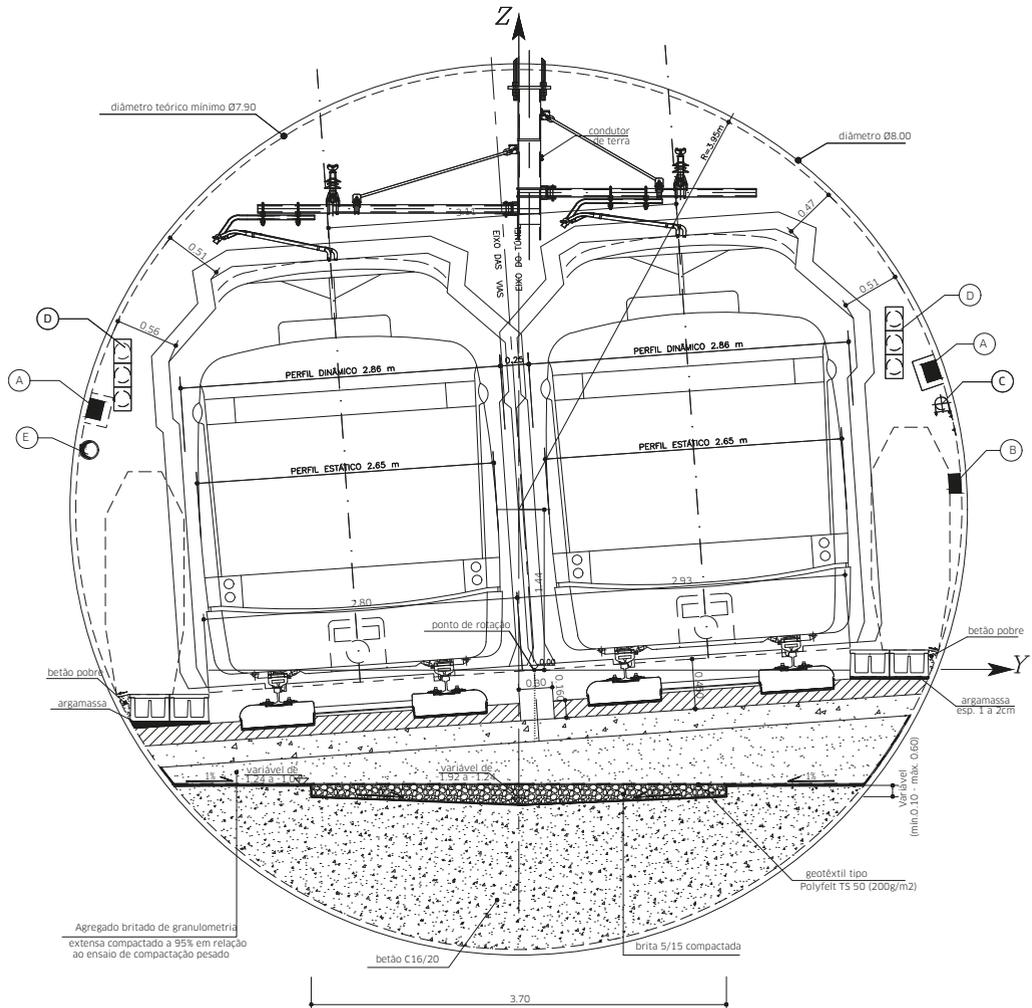
Registro de uma cartografia geológica expedida na frente da tuneladora Tuneladora após chegada à estação Aliados

> Corte tipo do túnel construído com tuneladora em curva

No caso do Metro do Porto, o Método de Escavação Sequencial foi adotado nas estações “mineiras”, no túnel de ligação entre as duas linhas que se cruzam na Estação da Trindade - Túnel J, e no túnel entre Nau Vitória e Levada na linha de Gondomar. Nos anos 30, no túnel da Lapa, foi adotado o mesmo sistema, mas com os meios da época.

Na escavação mecânica, toda a construção é realizada recorrendo-se a uma máquina - Tuneladora - capaz

de escavar, garantir a estabilidade da frente e colocar o revestimento, podendo ser o definitivo. No caso do Metro do Porto os túneis entre Campanhã e a Trindade, e entre o Pólo Universitário e S. Bento foram construídos usando duas tuneladoras semelhantes. A primeira foi carinhosamente batizada de *Micas* e perceberemos mais adiante como construiu dois dos túneis do Metro do Porto.



4. A tuneladora

Quando começou a construção dos primeiros metros de túnel do Metro do Porto, foi a principal atração: uma máquina capaz de escavar, suportar o terreno, e fazer o revestimento final do túnel. Esta tuneladora deveria construir os túneis desde Campanhã à Trindade, e desde a Trincheira de Salgueiros (entre as estações Salgueiros e Pólo Universitário) até S. Bento. Posteriormente, essencialmente por questões de prazo, utilizou-se uma

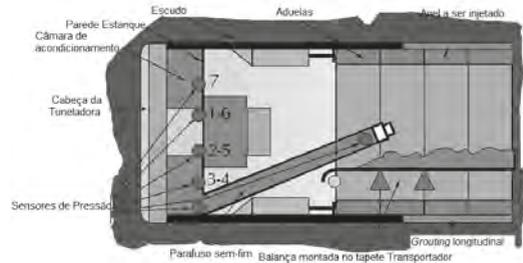


segunda tuneladora, muito semelhante à primeira, mas já sem direito a nome próprio.

No total estas duas tuneladoras construíram cerca de 6 km de túnel, com um diâmetro de escavação de 8,75 m ou 8,90 m, uma vez que as duas máquinas tinham diâmetros distintos. Pela natureza do próprio equipamento, a escavação faz-se em secção plena, mostrando-se na figura abaixo os principais constituintes de uma tuneladora semelhante à “Micas”.

O desmonte do terreno, seja ele solo ou rocha, é realizado pela cabeça da tuneladora, que deve ser projetada tendo em conta as suas características. No Porto, as tuneladoras foram dotadas de discos para corte de rocha e lâminas para remoção de solo. As tuneladoras usadas no Metro do Porto eram do tipo EPB - *Earth Pressure Balance* - ou seja, tuneladoras que garantiam o equilíbrio da frente de escavação pela manutenção da pressão das terras na câmara de acondicionamento.

O material escavado passa para a câmara de acondicionamento, sendo misturado com espumas, polímeros ou bentonite (um tipo de argila) para formar uma massa facilmente trabalhável. A câmara é mantida cheia à pressão necessária para sustentar a frente de escavação. Para o efeito, controla-se o ritmo de saída do material escavado pela



Tuneladora à chegada a S. Bento

Tuneladora à chegada a uma estação

Tuneladora Micas - esquema ilustrando os componentes mais importantes



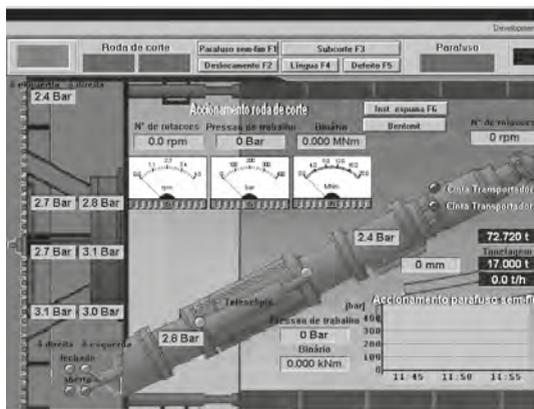
Tuneladora em montagem - visível a cabeça, os 19 conjuntos de macacos e, em primeiro plano, o parafuso sem-fim

Cabeça rotativa da tuneladora aquando da montagem - visíveis os discos de corte, as lâminas para solo e as aberturas para passagem do terreno escavado

Tuneladora à passagem pela estação Aliados - para além da cabeça e do escudo, visível todo o equipamento de *back-up*

velocidade de rotação do parafuso sem-fim, a pressão por recurso aos vários sensores existentes das características do maciço, devendo ser mais elevada em terrenos débeis, e podendo ser nula em maciços rochosos, muito competentes. A forte heterogeneidade do maciço do Porto, já descrita anteriormente, constituiu um enorme desafio à definição antecipada da pressão adequada para a frente.

Por fim, o material escavado é transportado pelo tapete transportador e, no caso do Metro do Porto, ao longo de todo o túnel para os estaleiros à entrada do mesmo. Após cada ciclo de escavação, ao abrigo do escudo metálico, são montados os anéis formados por aduelas pré-fabricadas e injetado o espaço anelar entre o extradorso das aduelas e o limite do terreno escavado. Esta operação é essencial para reduzir a convergência do terreno ao redor do túnel, minimizando-se assim as deformações que se podem propagar até à superfície do terreno. Além da tuneladora propriamente dita, o equipamento possuía um conjunto de instalações de apoio atreladas, designado por *back-up*, totalizando no total cerca de 70 m. Esta dimensão, idêntica ao cais das estações enterradas, fazia com que, à passagem pelas estações, o equipamento as ocupasse completamente.



Painel principal de controlo da tuneladora - afixadas as pressões nos sensores ao longo do percurso do material escavado e a quantidade já escavada no ciclo. Pode ver-se que se encontrava parada

5. As aduelas



Túnel construído por tuneladora já com enchimento para construção da via

Túnel construído por tuneladora com uma via em montagem

Ao mesmo tempo que escava o túnel a tuneladora monta o revestimento definitivo em aduelas pré-fabricadas, universais. Cada anel tem um comprimento médio de 1,40 m, sendo formado por 6 aduelas mais uma aduela de fecho.

As aduelas serem do tipo universal significa que, planificadas, têm uma forma trapezoidal, o que permite fazer curvas, em planta ou verticais, localizando adequadamente a aduela chave. Cada anel forma um cilindro, com as bases ligeiramente enviesadas. Pela rotação entre anéis consecutivos é possível configurar o túnel em reta ou em curva, quer na vertical quer em planta.

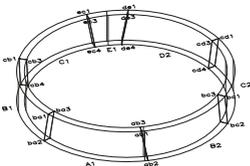
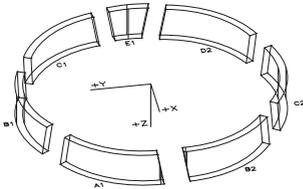
Longitudinalmente os anéis são ligados por conetores, até 3 por aduela, havendo também guias entre aduelas. A impermeabilização deste revestimento definitivo, com

30 cm de espessura, é conseguida através da qualidade do betão e de borrachas de selagem, à volta de cada aduela.

Todo o anel era montado automaticamente pela tuneladora, através de um braço montador, que rodando 360° colocava a aduela na posição pré-definida.

Quadro - principais características de cada anel

N.º de aduelas	6+1
Comprimento médio das aduelas	1,40 m
Comprimento máximo das aduelas	1,44 m
Comprimento mínimo das aduelas	1,36 m
Espessura do suporte	0,30 m
N.º conetores longitudinais	19



Aduelas de um anel
Imagem gerada pelo software de escolha de posição dos anéis para o traçado pretendido - ordem de montagem



Uma aduela - visível a borracha perimetral de impermeabilização, os conetores laterais e um negativo para um coletor longitudinal
Aduela em processo de montagem mecanizada

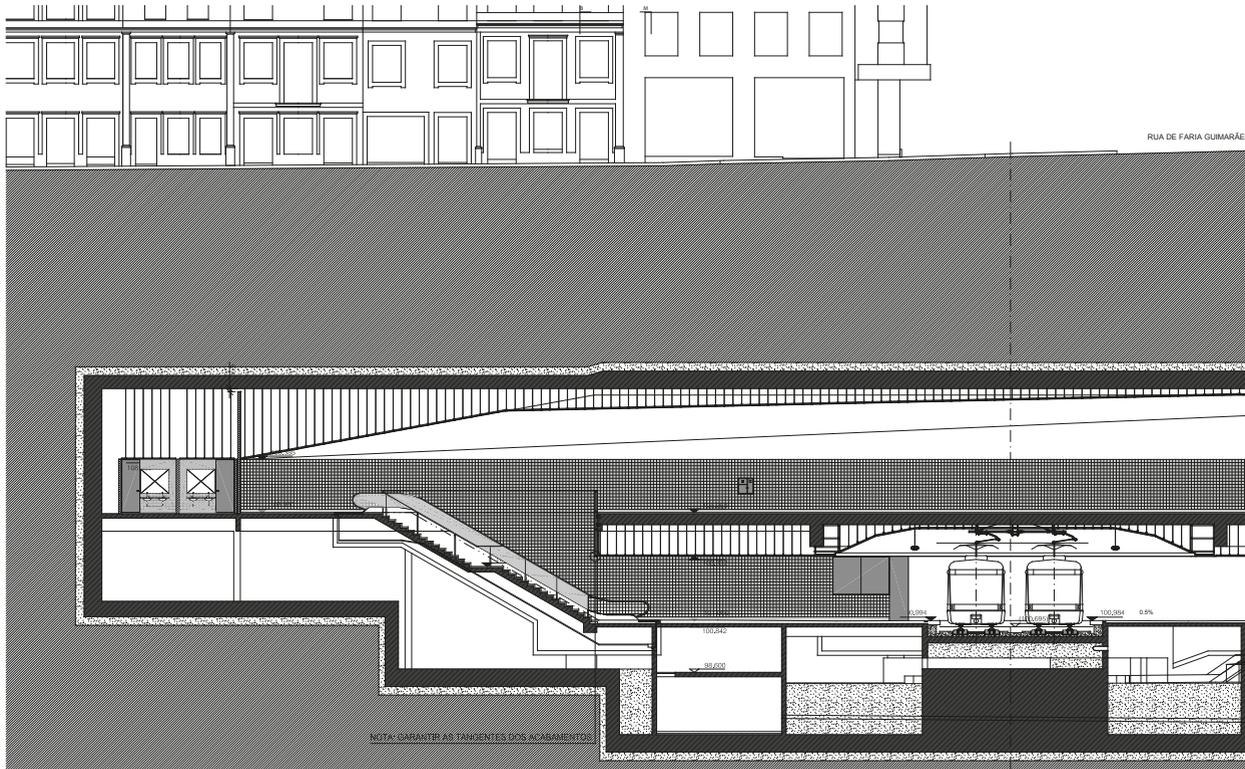
6. Estação Faria Guimarães

A estação de Faria de Guimarães situa-se sob um cruzamento com trânsito intenso no interior da cidade do Porto. Função desse elevado constrangimento, a opção recaiu sobre uma estação em que a generalidade da construção é mineira e profunda, havendo apenas 3 poços elípticos à superfície, de diâmetro médio a rondar os 10 m, que permitiram o acesso a todo o espaço subterrâneo.

Foi das estações enterradas mais complexas do Metro do Porto por juntar a escassez de espaço superficial, um ambiente geológico/geotécnico muito desfavorável e um conjunto de edificações sobre a escavação genericamente em mau estado. A visão esquemática, tridimensional, da estação ilustra mais do que qualquer palavra a complexidade da construção!

Três poços construídos pelo Método de Escavação Sequencial, na vertical, localizados na Rua Faria de Guimarães, Rua Fonseca Cardoso e Rua do Paraíso

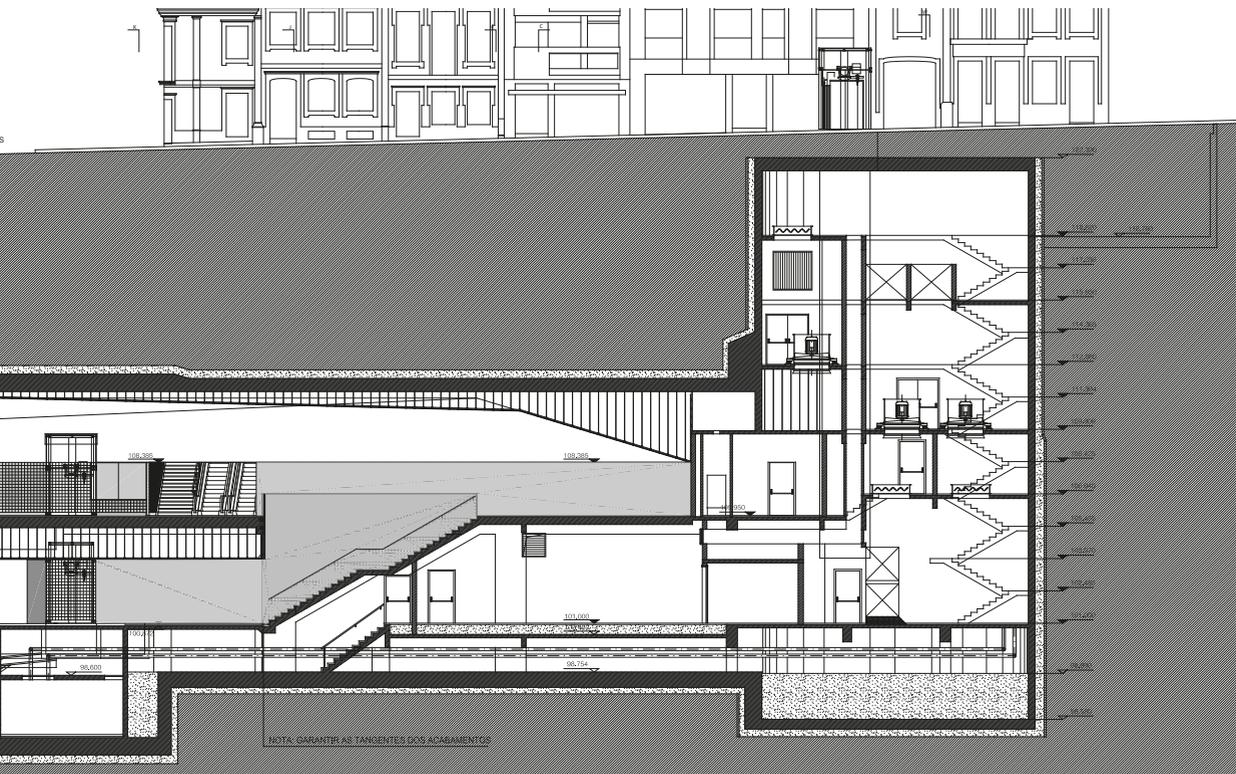
permitiram o acesso ao espaço subterrâneo. Estes poços, de forma elíptica permitiram uma ocupação mínima da superfície. Tal possibilitou até manter durante a construção 2 faixas de circulação ao longo da Rua Faria de Guimarães, uma das principais artérias de saída da cidade do Porto. A profundidade destes poços é da ordem dos 25 m, e foram escavados em avanços verticais de cerca de 1 m, materializando-se imediatamente o suporte através de uma camada de 30 cm de betão projetado, nos primeiros 8 m de escavação, aumentando para 40 cm no seu troço final. Esta maior espessura resulta não apenas do aumento dos impulsos do terreno, mas também da necessidade de se rasgar o revestimento destes poços para se atacarem as cavernas principais. Nos primeiros metros dos poços, o avanço foi ainda protegido por colunas de *jet-grouting*, exteriores ao perímetro de escavação e executadas a partir da superfície.



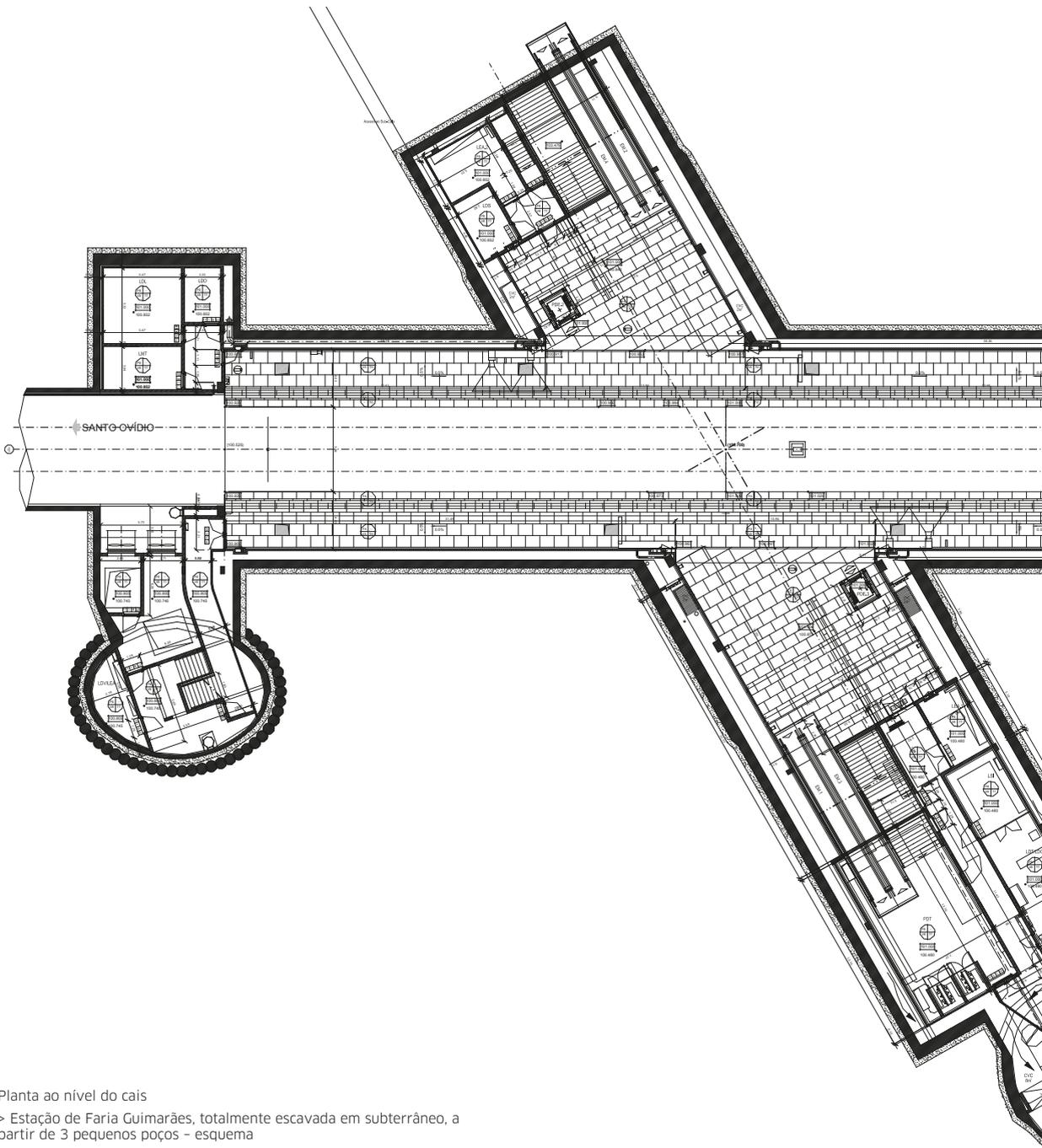
A partir do poço na Rua do Paraíso foi escavada a caverna transversal, com 17 m de largura e 17 m de altura. Esta caverna cruza-se com a caverna de via ou principal, com aproximadamente 70 m de comprimento, 18 m de largura e 13 m de altura. Dado o grande volume de escavação associado à intersecção destas duas cavernas, e para limitar assentamentos à superfície, houve necessidade de completar o revestimento definitivo da caverna transversal e, só depois, proceder à realização da intersecção. Note-se ainda que, devido à grande secção destas cavernas, a escavação foi parcializada em secções de menores dimensões. Foi realizada em 3 níveis, sendo a escavação da abóbada da galeria transversal dividida em escavação do lado esquerdo e lado direito. Além da concretização tão cedo quanto possível do suporte em betão projetado, os vários níveis de escavação tiveram soleiras provisórias e houve reforço do maciço adiante da frente de escavação, recorrendo-se a pregagens em fibra de vidro. De modo a antecipar a colocação do suporte foram realizadas colunas horizontais de *jet-grouting*, vulgarmente designadas por "guarda-chuva", o que permitia a execução da escavação já com este suporte colocado.

De referir ainda a existência de três túneis mais pequenos: um deles fazia a ligação entre o poço Fonseca Cardoso e a caverna principal; os outros dois faziam a ligação entre os Poços de Fonseca Cardoso e Faria Guimarães e a Caverna Transversal. O primeiro destes túneis, com cerca de 25 m de comprimento, 17 m de altura e 8 m de largura, constitui um dos acessos atuais da estação, albergando ainda uma saída de emergência. Os outros dois constituem acessos da estação e têm dimensões mais pequenas, com cerca de 8 m de diâmetro. Estes acessos, genericamente, foram de elevada complexidade devido à reduzida cobertura, obrigando a uma significativa proteção da envolvente de escavação, através de dois níveis de colunas de *jet-grouting*.

De realçar que toda esta obra foi realizada num ambiente urbano densamente edificado, com alguns dos prédios em muito má condição estrutural. Tal obrigou a um contínuo acompanhamento das estruturas através de um completo programa de monitorização automática. Foram ainda detetados alguns edifícios cuja condição estrutural, antes do início das obras, era já bastante precária, pelo que houve necessidade de proceder previamente a reforços estruturais.

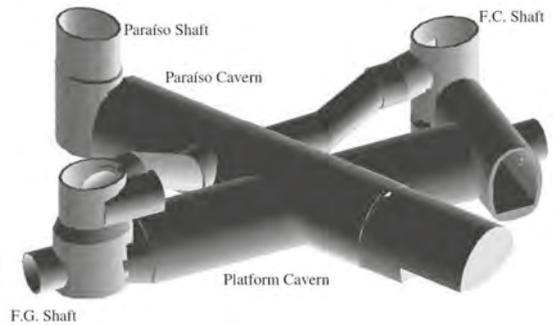
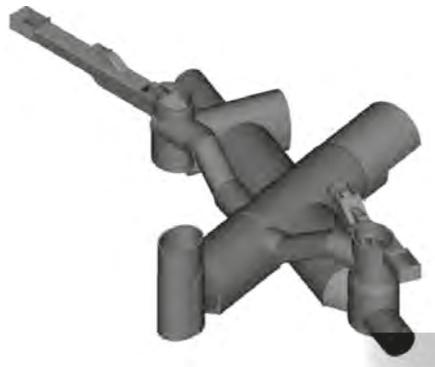
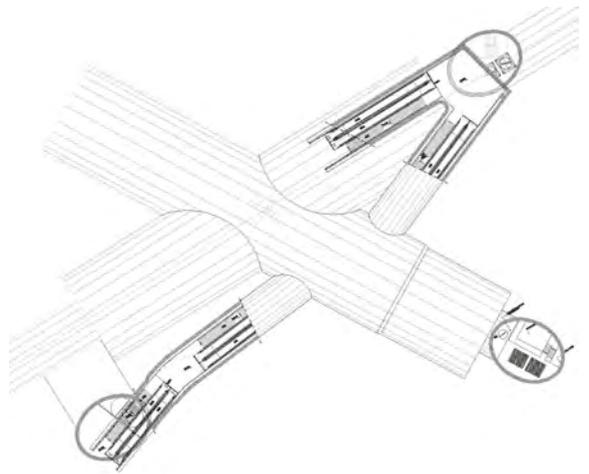
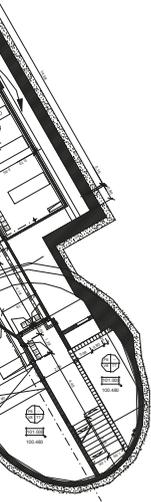
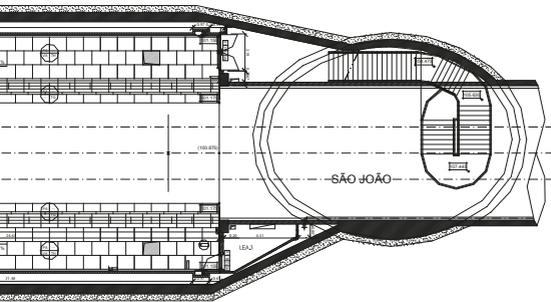


Corte transversal da estação Faria Guimarães

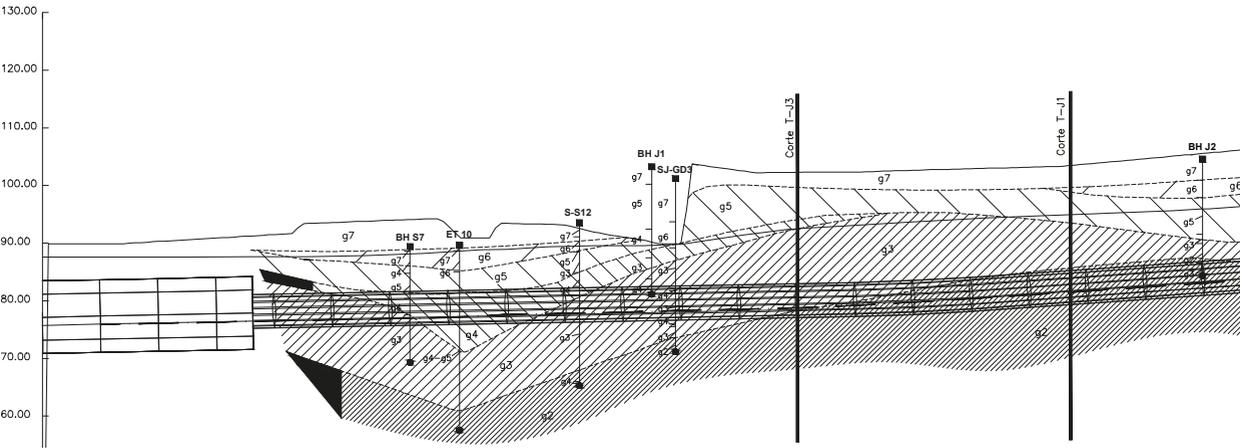
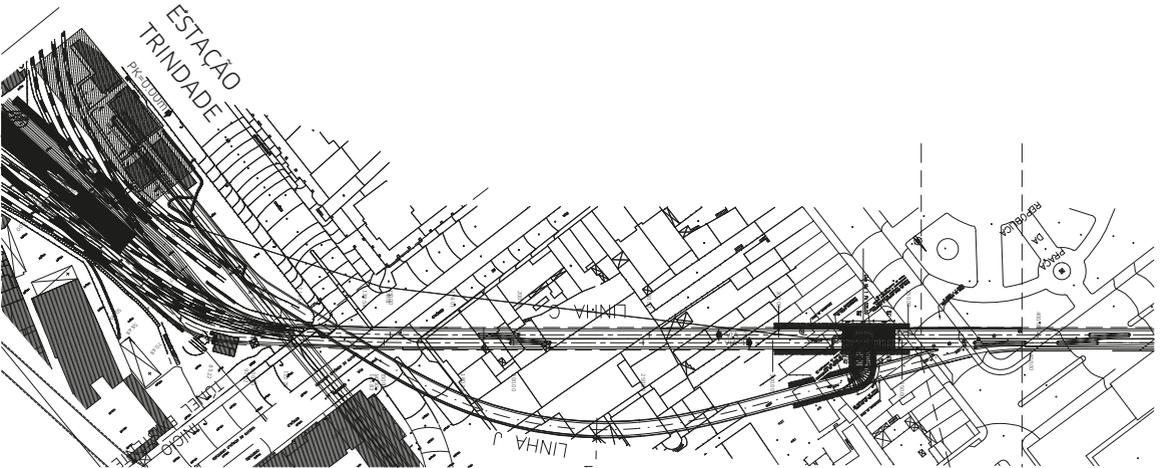


Planta ao nível do cais

- > Estação de Faria Guimarães, totalmente escavada em subterrâneo, a partir de 3 pequenos poços - esquema
- > Esquema tridimensional da estação Faria Guimarães
- > Estação Faria Guimarães - modelo 3D



7. Túnel J



Planta do túnel da Linha J

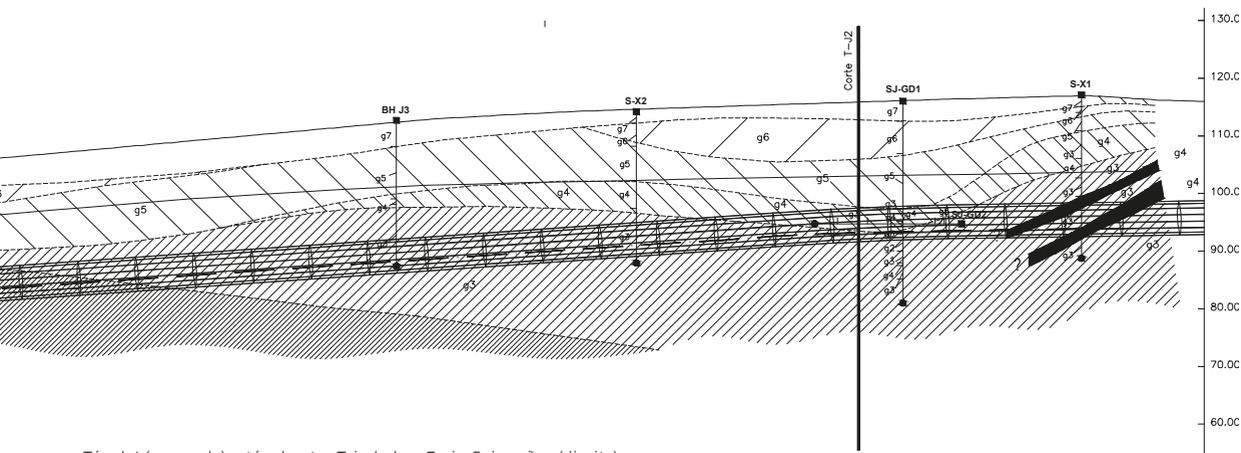
Perfil longitudinal do túnel da Linha J com indicação das várias unidades geotécnicas



O Túnel J constitui um túnel de serviço, de apenas uma via, que permite que os veículos permutem entre as duas linhas que se cruzam, desniveladas, na Estação da Trindade. Trata-se de uma obra com uma extensão aproximada de 380 m, em túnel realizado pelo Método de Escavação Sequencial e atravessando formações típicas do Porto, com diversos graus de alteração, desde as secções em rocha bastante competente até secções em granito completamente alterado (solo residual).

A cobertura média do túnel ronda os 18 m sendo que, na chegada à estação da Trindade, este túnel passa sob o previamente existente Túnel da Lapa. Trata-se de um troço particular onde a problemática da interação com estruturas já existentes assume especial relevância.

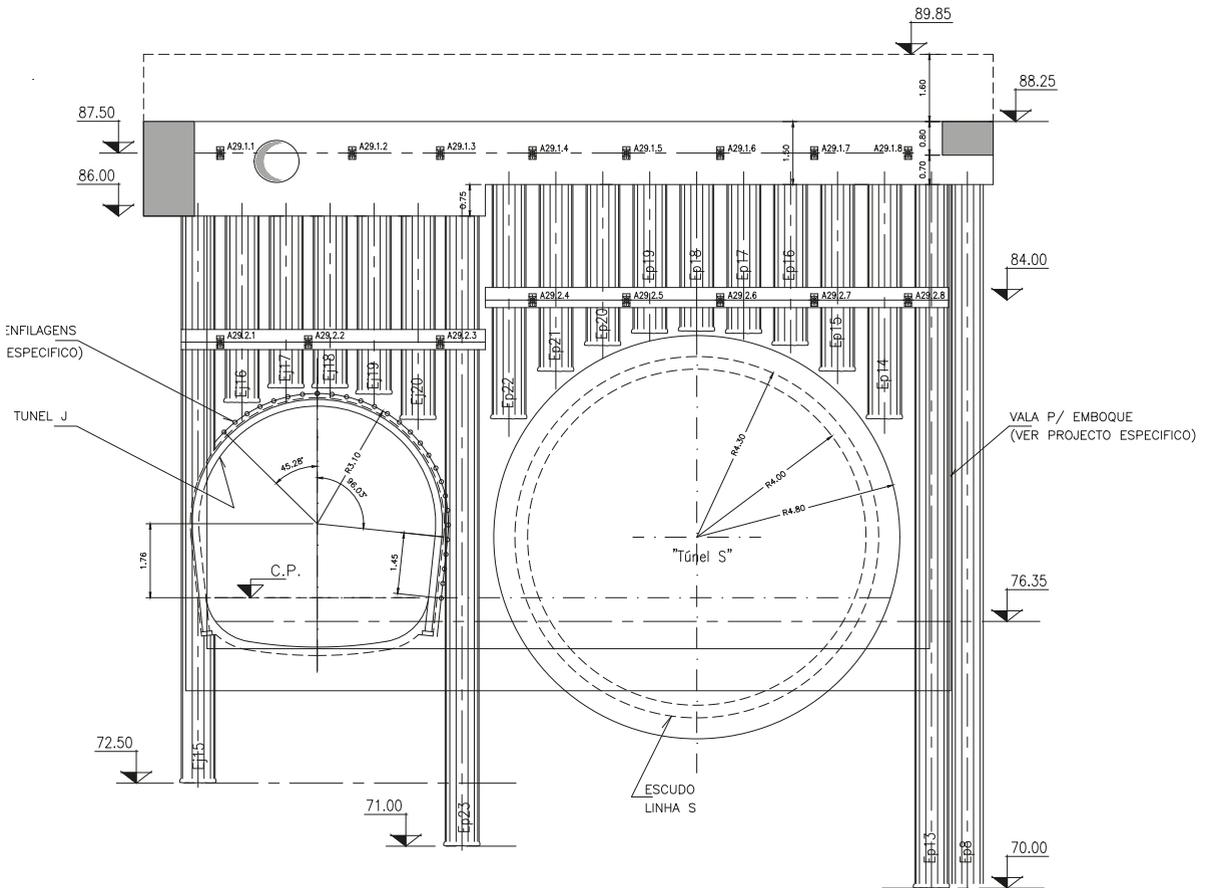
A área de escavação deste túnel ronda os 30 m², tendo sido adotadas 3 secções tipo de escavação/contenção, em função das características do maciço. Nas secções em maciço mais competente, o suporte primário foi constituído por uma camada de 15 cm betão projetado e uma malha de pregagens. Nas secções em solo residual, o revestimento primário foi formado por 20 cm de betão projetado e cambotas metálicas. De referir ainda que toda a escavação foi realizada mediante drenagem prévia do maciço, o que foi conseguido à custa de drenos laterais.



Túnel J (esquerda) e túnel entre Trindade e Faria Guimarães (direita) - vista desde a estação Trindade em fase final de construção
Câmara de alargamento - túnel da Lapa (direita) e zona para receção do túnel J (esquerda)

O revestimento definitivo deste túnel foi realizado, excepcionalmente, em betão projetado, com 20 cm de espessura. Tal opção resultou da necessidade de encurtar prazos e do fato de se tratar de um túnel de serviço, sem acesso público. Mantiveram-se, no entanto, todas as preocupações com a durabilidade da estrutura, visando garantir um tempo de vida de 100 anos, pelo que especial atenção foi dada à composição do betão e aos ensaios de controlo de qualidade em todo o processo de execução.

A intersecção com o existente túnel da Lapa obrigou ao seu alargamento. Essa câmara de alargamento foi também construída pelo método de escavação sequencial e acabada a betão projetado.



Túnel J - mudança de turno
Corte transversal com o emboquilhamento do túnel J e do túnel TBM na estação Trindade

8. Fotografias de obra



Poço Fonseca Cardoso - visível ataque de dois túneis

Galeria Transversal - três fases de escavação, notar as soleiras provisórias

> Caverna das salas técnicas - escavação da abóbada com *side-drift* (a parte direita da escavação está mais avançada), contenção em betão projetado armado; à esquerda, execução de guarda-chuva em *jet-grouting*

> Caverna da estação com revestimento final em betão cofrado; à direita arranque do túnel de via executado por tuneladora; em segundo plano poço de ataque da R. Fonseca Cardoso, revestido em betão projetado armado

> Caverna da estação com revestimento final em betão cofrado; em segundo plano túnel de via executado por tuneladora



Estação do Bolhão - escavação da caverna principal e túnel já escavado por tuneladora

Estação Heroísmo - foto tirada do interior da caverna principal da estação; poço *cut & cover* revestido a betão cofrado, escavação da galeria transversal (à esquerda), continuação da caverna principal e túnel escavado com tuneladora (em segundo plano)

Estação Combatentes - intersecção das galerias principal e transversal, revestimento primário em betão projetado armado

Estação Heroísmo - galeria transversal com escavação completa, revestimento primário em betão projetado armado



Estação Salgueiros – escavação de grandes dimensões formada pela intersecção de dois poços, revestimento primário em betão projetado armado

Estação Faria Guimaraes – visíveis os três poços de ataque, foto aérea

> Estação Marquês – escavação do poço central da estação, por método sequencial, foto aérea

> Estação Trindade – foto aérea



Estação Bolhão - armaduras do revestimento final das cavernas

87.50

86.00

72.50

71.00

TUNEL J

A29.1.1

A29.1.2

A29.1.3

A29.2.1

A29.2.2

A29.2.3

E16

E17

E18

E19

E20

E22

C.P.

1.76

1.45

45.28°

R33.10

96.03°

Ø.75

E15

E23

apoios



Metro do Porto, SA

