

DESAFIOS E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DA ESTAÇÃO HOSPITAL SANTO ANTÓNIO DO METRO DO PORTO

Challenges and constructive solutions in Hospital Santo António station (Porto Metro)

Antony Pereira^a, Tiago Azeredo^a, Ana Carvalheira^a, Patrícia Lopes^b, Cândido Freitas^b, Inês Coelho^c

^a CJC Engenharia e Projetos, Brasil.

^b Departamento Engenharia Civil do ISEP, Politécnico do Porto, Portugal.

^c Metro do Porto, Portugal.

RESUMO – A construção da Estação Hospital Santo António, parte da linha rosa do Metro do Porto, envolveu a superação de desafios significativos. Este estudo destaca os obstáculos enfrentados durante o projeto de execução e as soluções inovadoras adotadas. De entre os inúmeros desafios enfrentados, realça-se a presença de um túnel rodoviário, a existência de uma linha de água subterrânea, a necessidade de preservação de espécies arbóreas e a minimização de perturbações nos edifícios e no trânsito. A solução adotada foi uma estrutura subterrânea composta por túneis de grande secção, poços de grande diâmetro e túneis inclinados para acesso à estação. As metodologias utilizadas, como NATM (New Austrian Tunneling Method) nos túneis e a escavação sequencial na vertical nos poços, levaram em consideração as propriedades do terreno. Destaca-se a eficácia da solução na mitigação de impactos ambientais e a possibilidade da sua adoção em futuros projetos de estruturas subterrâneas em ambientes urbanos complexos.

ABSTRACT – The construction of the Hospital Santo António station, part of the pink line of the Porto Metro, involved overcoming significant challenges. This study highlights the obstacles faced during the execution project and the innovative solutions adopted. The presence of a road tunnel, the existence of an underground watercourse, the need to preserve tree species and the minimization of disturbances on residences and traffic were the most relevant challenges. The solution adopted was an underground structure composed of large-section tunnels, large-diameter shafts, and inclined tunnels for access to the station. The methodologies used, such as NATM (New Austrian Tunneling Method) for tunnels and sequential vertical excavation for shafts, consider the terrain properties. The effectiveness of the solution in mitigating environmental impacts is noteworthy, as well as its potential for adoption in future underground structure projects in complex urban environments.

Palavras-Chave – Metro do Porto; desafios ambientais; soluções inovadoras.

Keywords – Porto Metro; environmental challenges; innovative solutions.

E-mails: antony.pereira@cjceng.com.br (A. Pereira), tiago.azeredo@cjceng.com.br (T. Azeredo), ana.sofia@cjceng.com.br (A. Carvalheira), cpl@isep.ipp.pt (P. Lopes), jcf@isep.ipp.pt (C. Freitas), ines.coelho@metrodoporto.pt (I. Coelho)

ORCID: orcid.org/0009-0009-1793-1075 (A. Pereira), orcid.org/0009-0005-0006-4092 (T. Azeredo), orcid.org/0009-0006-6287-0660 (A. Carvalheira), orcid.org/000-0001-7171-499X (P. Lopes), orcid.org/000-0001-9437-3868 (C. Freitas), orcid.org/0009-0001-6530-3702 (I. Coelho)

1 – INTRODUÇÃO

Os seres humanos usam os espaços subterrâneos há séculos. A decisão, do uso dos espaços subterrâneos, é fundamentada pela necessidade e porque as principais vantagens se sobrepõem às desvantagens na criação e ocupação dos mesmos, que, com o tempo, evoluiu de um abrigo primário para um espaço com infraestruturas e várias instalações e equipamentos.

O subsolo, normalmente, é um local difícil para construção, ambientalmente indesejável e com custo de construção superior quando comparado com a superfície. Por outro lado, pode fornecer uma melhor proteção natural contra elementos ambientais, incluindo clima destrutivo, ruído e eventos sísmicos. Ao mesmo tempo, o espaço criado para a estrutura subterrânea tem a vantagem de permitir que a superfície seja utilizada para outras funções (ITA, 2012).

A linha circular do Metro do Porto, trecho S. Bento – Casa da Música, localiza-se no eixo central da cidade do Porto, entre a Boavista e a Praça da Liberdade, proporcionando o acesso do serviço de metro às zonas da Praça da Galiza e Hospital de Santo António. Com a execução deste novo trecho, o Metro do Porto passará a fornecer acesso a instalações importantes, como o Centro Materno-Infantil do Norte e o Hospital de Santo António, assim como a escolas (Escola Secundária Infante D. Henrique e a Escola Gomes Teixeira), e ainda a equipamentos culturais como o Museu Soares dos Reis e o Palácio de Cristal. A planta da linha circular do Metro do Porto, com os seus pontos notáveis, encontra-se apresentada na Figura 1.

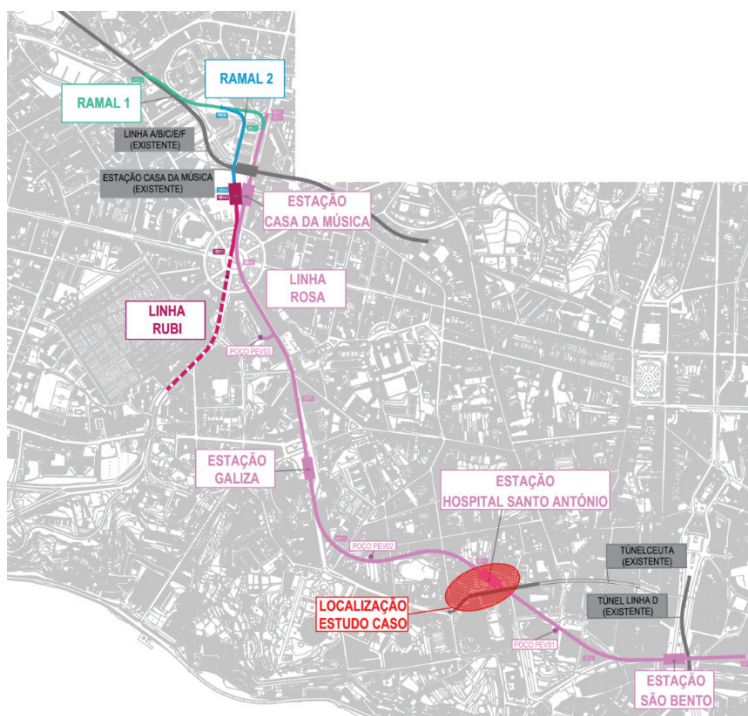


Fig. 1 – Planta com a localização do caso de estudo (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2020).

O trajeto da linha circular tem aproximadamente 3,1 quilómetros de extensão e abrangerá a construção de quatro novas estações: Estação S. Bento, Estação Hospital de Santo António, Estação Galiza e Estação Casa da Música. Ao longo do percurso, serão construídos três poços de saída de emergência e ventilação (PEV) posicionados entre as estações para garantir condições seguras de evacuação dos passageiros, no caso de uma emergência, bem como assegurar a ventilação da linha

rosa. Além disso, haverá uma conexão técnica com as linhas A, B, C, E e F, atualmente em serviço, a partir da nova Estação Casa da Música, possibilitando a injeção e recolha diária de comboios (Sener/CJC/NSE, 2020).

A Estação Hospital Santo António (EHSA), integrante da linha rosa do Metro do Porto, é o caso de estudo do presente artigo, devido ao seu caráter arrojado e vanguardista. Dada a complexidade desta obra, a sua compreensão é relevante para a aplicação em futuras estruturas subterrâneas urbanas, especialmente pela superação de diversos condicionalismos, incluindo os ambientais.

1.1 – Localização

A EHSA localiza-se no centro do Porto e na vizinhança do hospital com o mesmo nome. A sua implantação está inserida no Jardim Carrilho Videira, também conhecido por Jardim do Carregal, que é delimitado pelas ruas Clemente Meneses, do Rosário e Doutor Tiago de Almeida (Figuras 1 e 2).



Fig. 2 – Enquadramento geográfico do Jardim do Carregal.

1.2 – Desafios enfrentados na conceção da EHSA

A implantação da EHSA enfrentou uma série de desafios que influenciaram significativamente a decisão sobre a localização dos acessos à superfície, bem como a solução e o método construtivo adotados (Pereira, 2023).

Um dos principais requisitos foi a imposição de seguir a solução do Estudo Prévio aprovado, que incluía vários elementos essenciais, como o projeto arquitetónico da estação, o estudo geológico-geotécnico e o traçado escolhido para a linha rosa.

Segundo Pereira (2023), a fase de conceção da construção da estação também foi afetada por outros condicionalismos importantes. Um deles foi o túnel de Ceuta, um túnel rodoviário que cruza o túnel da futura linha rosa imediatamente antes da estação, exigindo cuidados especiais durante a implantação da EHSA. Adicionalmente, foi necessário considerar a presença de uma linha de água subterrânea, o Rio Frio, e a importância de preservar ao máximo as espécies arbóreas do Jardim do Carregal, que possui valor histórico. Além disso, houve a necessidade de minimizar as perturbações no ambiente circundante e no trânsito durante a fase de construção.

A seguir, será apresentado, de forma sucinta, um enquadramento e as medidas adotadas para minimizar o impacto da construção da EHSA, e os principais elementos que condicionaram a sua conceção: o túnel de Ceuta, o Rio Frio e o Jardim do Carregal.

1.2.1 – Túnel de Ceuta

O túnel de Ceuta é um túnel rodoviário, inaugurado em 2006 e com aproximadamente 600 m, que faz a interligação entre a Praça de D. Filipa de Lencastre, portal nascente, e o Jardim do Carregal, portal poente, existindo nesse mesmo local uma bifurcação que continua para a rua D. Manuel II.

Conforme Sener/CJC/NSE (2021), a construção do túnel desenvolveu-se, essencialmente, com recurso à metodologia NATM em quase toda a sua extensão. Na zona mais à superfície, os portais nascente e poente foram executados com recurso a uma vala a céu aberto (método invertido) com contenção periférica constituída por uma cortina de estacas com ancoragens. Na zona da bifurcação, entre o Jardim do Carregal e a rua D. Manuel II, executou-se a escavação a céu aberto ao abrigo de uma contenção do tipo “Berlim”.

Devido à grande proximidade entre as estruturas, o projeto de execução, conforme Sener/CJC/NSE (2018-2024), previu a implementação de instrumentação no túnel de Ceuta, antes do início dos trabalhos de escavação da EHSA, com o objetivo de monitorizar as deformações e auxiliar na tomada de decisão, caso fosse necessário recorrer a medidas corretivas.

No relatório técnico de análise de risco de danos do túnel de Ceuta (Sener/CJC/NSE, 2021), considera-se que o túnel de Ceuta é uma estrutura continua e confinada, com elevado grau de hiperstaticidade, e por isso, qualquer solicitação excessiva, que eventualmente venha ocorrer, será facilmente redistribuída e absorvida pelas áreas vizinhas, não se prevendo qualquer cenário de risco à estabilidade do túnel. Eventuais fissuras que possam vir a surgir podem ser tratadas e reparadas, após a conclusão das obras da EHSA, de maneira a garantir o bom desempenho do revestimento estrutural do túnel de Ceuta, ao longo da vida útil da obra.

1.2.2 – Rio Frio

A Ribeira das Virtudes, também conhecida como Rio Frio, é um curso de água que tem a sua nascente próxima à rua da Torrinha e desagua no rio Douro, nas antigas margens da praia de Miragaia. Esse vale arejado e abundantemente abastecido de água foi um fator crucial na escolha do local para a construção do Hospital Santo António. Ao longo do tempo o curso do rio passou por alterações e, atualmente, encontra-se entubado, correndo sob o túnel de Ceuta (com recurso a um sifão invertido) e sob as instalações do próprio Hospital Santo António.

O projeto de execução da Estação Hospital Santo António levou em consideração este curso de água e por isso será realizado o desvio do Rio Frio em torno da futura EHSA, na região do Jardim do Carregal e previamente ao início dos trabalhos de escavação, de modo a permitir a construção nos terrenos graníticos situados sob o leito original desta linha de água, preenchida por espessos aterros assentes e misturados nos depósitos aluvionares originais (Pereira, 2023).

1.2.3 – Jardim do Carregal

O Jardim do Carregal, situado na cidade do Porto, tem uma história rica e significativa. O primeiro desenho do jardim remonta a 1897 e foi elaborado pelo jardineiro-paisagista Jerónimo Monteiro da Costa. Este jardim, originalmente chamado Jardim Carrilho Videira, destaca-se pela singularidade de alguns de seus exemplares no contexto dos jardins da cidade. O Jardim do Carregal é provavelmente o último exemplo de Jardim Romântico do Porto com características do século XIX. A origem do seu nome está ligada à presença de uma planta gramínea, a “*carrega*”, que se desenvolvia nas margens do Rio Frio (CMP, 2024a).

O jardim é constituído por um lago de forma irregular, na parte central, e um conjunto de percursos que permitem circular por todo o espaço (Figura 3).



Fig. 3 – Planta do Jardim do Carregal (Sener/CJC/NSE/Arqpaís, 2018).

O jardim destaca-se por árvores de grande porte, como sequoias, cedros, araucárias, bétulas e plátanos. Os relvados, as plantas herbáceas e pequenos arbustos acrescentam diversidade, criando um equilíbrio harmonioso entre os diferentes tipos de vegetação (CMP, 2024b).

A preservação do Jardim do Carregal e de suas espécies arbóreas é fundamental, especialmente em contextos de desenvolvimento urbano, como a construção EHSA. A manutenção deste espaço verde tem o intuito de preservar um pedaço vital da história e da natureza da cidade do Porto, garantindo que futuras gerações possam continuar a desfrutar da sua beleza e tranquilidade. Portanto, o projeto de execução foi desenvolvido de maneira a ocupar o mínimo espaço possível na superfície, com o objetivo de minimizar o impacto negativo sobre o Jardim do Carregal, especialmente nas espécies arbóreas.

2 – ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A cidade do Porto está estreitamente relacionada com o seu imponente maciço granítico. Esse maciço destaca-se nos afloramentos ao longo da linha costeira e nas escarpas da cidade. No entanto, as condições geotécnicas são complexas devido ao enquadramento tectónico do maciço granítico e às alterações hidrotermais e meteorização que ocorreram após a sua formação.

Entre estas rochas graníticas inclui-se o “*Granito do Porto*”, onde se enquadra a construção da linha rosa do Metro do Porto. No seu conjunto, o granito do Porto define um alinhamento NW-SE contactando a Este com rochas metassedimentares do “Complexo Xisto-Grauváquico” (CXG) e a Oeste com o Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Noronha e Leterrier, 2000). Ao longo do tempo vários autores descreveram o granito do Porto como sendo um granito de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas.

A proximidade do granito do Porto com uma zona de deformação intensa, resultou numa extensa rede de fraturas e circulação profunda de fluidos, o que causou uma primeira alteração hidrotermal no maciço. Posteriormente, ocorreu a meteorização, influenciada pelas condições climáticas e relevo, com a correspondente infiltração de águas superficiais. A sobreposição temporal e espacial

dessas duas fases de alteração levou a um maciço granítico geralmente muito heterogéneo e geotecnicamente complexo, com padrões erráticos.

Ao longo do traçado da linha rosa do Metro do Porto, a rede de drenagem superficial original encontra-se canalizada desviando-se, frequentemente e por vezes significativamente, das linhas de talvegue originais.

A circulação da água subterrânea varia de acordo com o grau de alteração do granito. Em geral, nos níveis menos alterados, granito pouco alterado a muito alterado, observa-se uma circulação típica de um meio fraturado ao longo do maciço rochoso, que ocorre principalmente por meio de uma rede de falhas e que possibilita algum armazenamento de água, enquanto nos níveis mais alterados, granito decomposto a solo residual granítico, a circulação assemelha-se mais a um meio poroso. Nestes níveis mais alterados, as fraturas remanescentes, quando não preenchidas com argila, também podem contribuir para a circulação de água subterrânea.

No local de implantação da EHSA, os terrenos superiores, constituídos por aterros e aluviões cujo desenvolvimento acompanha a morfologia de um paleovale, no seu conjunto representam o enchimento do vale do Rio Frio e integram a unidade geotécnica G7 que atinge os 10 a 12 m de profundidade. Os aterros são arenosos e heterogéneos, incluindo blocos graníticos, níveis orgânicos e restos de entulho. Os solos aluvionares inferiores são essencialmente constituídos por areias silto-argilosas e por siltes areno-argilosos, castanhos ou cinzento-escuros (Sener/CJC/NSE, 2019a).

O granito do Porto é a litologia dominante nas zonas geotécnicas G2 a G6. A unidade G6 e G5 sucede-se à unidade G7 em profundidade. Estas zonas geotécnicas consistem em solos de alteração muito compactos e granito decomposto, respetivamente, caracterizando-se por um desenvolvimento sub-horizontal, com limites ondulados, que atinge uma profundidade de 21 a 24 m. Em algumas áreas da estação, o maciço decomposto (G5) transita para maciços graníticos muito alterados (G4). A zona geotécnica G3 ocorre abaixo da unidade G5, aparecendo ocasionalmente sob a forma de blocos pouco contínuos no seio da unidade G5. O maciço da unidade G3 é classificado como medianamente alterado, com fraturas próximas e medianamente espaçadas, oxidadas e abertas. No centro da estação, o maciço G3 evolui rapidamente para G2, caracterizado como pouco alterado. Localmente, ocorrem interseções de alinhamentos de fraturas sub-verticais, principalmente sem preenchimento, que representam zonas preferenciais de percolação e armazenamento de água no maciço rochoso (Sener/CJC/NSE, 2019a).

O nível de água posiciona-se, aproximadamente, entre os 2 m e os 9 m de profundidade.

Na Figura 4, apresenta-se um corte longitudinal da EHSA, onde está representado o perfil geológico-geotécnico nesta região.

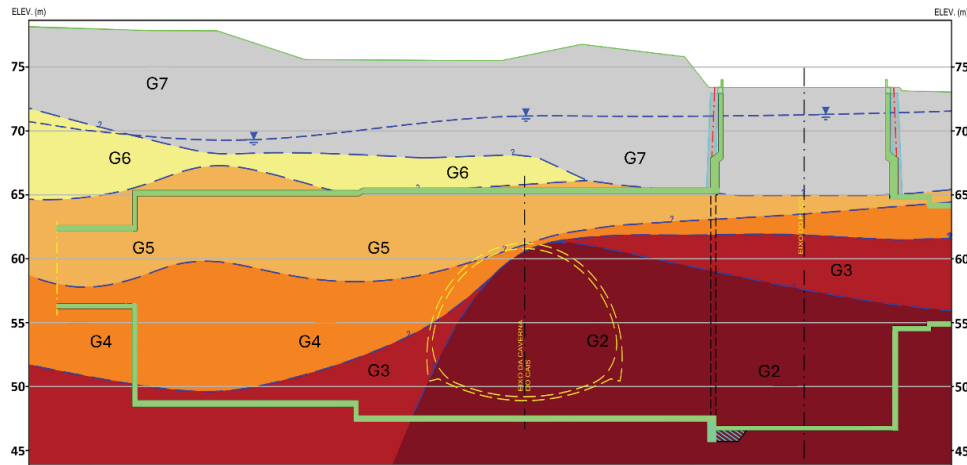


Fig. 4 – Perfil geológico-geotécnico longitudinal com a direção SW-NE da EHSA.

Conforme referenciado em Sener/CJC/NSE (2019a), nas zonas geotécnicas G7, G6 e G5 aplicam-se os conceitos da Mecânica dos Solos, sendo pouco significativa a influência das fraturas. Pelo contrário, para as zonas geotécnicas G2, G3 e G4, é necessário utilizar metodologias que considerem a estrutura descontínua do maciço rochoso. Os parâmetros geológico-geotécnicos utilizados nos cálculos do projeto de execução da EHSA estão reproduzidos no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros geológico-geotécnicos adotados para a EHSA (Sener/CJC/NSE, 2019a).

Propriedade	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Módulo de deformabilidade (<i>E</i>) [MPa]	1800	1500	500	120	45	10
Peso volúmico (γ) [kN/m³]	26	24	22	20	19	19
Coesão efetiva (<i>c'</i>) [kPa]	350	200	100	25	5	0
Ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') [°]	50	45	40	35	32	28
Coefficiente de impulso do terreno em repouso (<i>K₀</i>) [-]	0.70	0.70	0.50	0.40	0.35	0.55

3 – METODOLOGIA CONSTRUTIVA ADOTADA

A construção de estruturas subterrâneas é uma das áreas mais desafiadoras da engenharia civil. A necessidade de estruturas subterrâneas tem levado ao desenvolvimento de várias técnicas para a sua construção.

Segundo Cury (1978), estas técnicas poderão ser classificadas mediante o modo como são executadas, em espaço aberto e com grande impacto à superfície, denominadas por método construtivo destrutivo, ou em espaço subterrâneo e com reduzido impacto à superfície, com a designação de método construtivo não destrutivo.

A metodologia de construção de estruturas subterrâneas com recurso a vala a céu aberto (VCA) é o principal exemplo do método construtivo destrutivo.

Os métodos construtivos não destrutivos podem dividir-se em dois grupos: o método de escavação convencional (MEC), cuja escavação pode ser executada por meios mecânicos ou com recurso a explosivos e que têm como exemplo o novo método austríaco de túneis (designado por NATM - New Austrian Tunneling Method), e o método de escavação por tuneladora (MET) (Tender e Couto, 2021).

Cada uma dessas técnicas tem as suas vantagens e desvantagens e a escolha da técnica mais adequada depende das condições geológicas, das exigências do projeto e dos recursos disponíveis.

O projeto de execução da EHSA, em função dos condicionalismos presentes, adotou métodos construtivos não destrutivos utilizando o MEC.

A conceção construtiva e estrutural da EHSA assentou em análises numéricas rigorosas, realizadas com recurso, principalmente, a dois programas de cálculo: o FLAC2D e o SAP2000. Estes programas permitiram caracterizar o comportamento do maciço e das estruturas de suporte em diferentes fases da obra, com o objetivo de garantir a segurança e a eficiência das soluções adotadas.

O FLAC2D, desenvolvido pela Itasca Consulting Group, é uma ferramenta bidimensional baseada no método das diferenças finitas, particularmente eficaz para simular a escavação em solos e rochas. A sua aplicação foi essencial para considerar a sequência construtiva, as características geomecânicas do maciço e as soluções de suporte previstas para os poços e túneis. A modelação axissimétrica permitiu atingir três objetivos principais:

1. Estimar as deformações induzidas no maciço envolvente às estruturas subterrâneas.
2. Avaliar a estabilidade local e global durante as diferentes fases de escavação.

3. Determinar os impulsos transmitidos pelo terreno á estrutura de suporte dos poços e túneis.

Os resultados obtidos no FLAC2D, nomeadamente os impulsos do maciço (ponto 3), serviram como dados de entrada para a modelação tridimensional realizada no SAP2000, desenvolvido pela Computers and Structures Inc. Este programa, baseado no método dos elementos finitos, foi utilizado para avaliar os esforços atuantes e as deformações nos revestimentos provisórios e definitivos das estruturas subterrâneas. Com base nestas análises, foi possível dimensionar com precisão os elementos estruturais, assegurando a sua integridade ao longo de todas as fases construtivas (Sener/CJC/NSE, 2019b).

3.1 – Técnicas construtivas

Conforme Sener/CJC/NSE (2019b), as técnicas construtivas escolhidas variam para cada parte da EHSA, sendo possível identificar três partes distintas:

1. A estação subterrânea, composta por duas galeria de grande dimensão e por dois túneis inclinados. Esta estrutura realiza-se segundo a metodologia NATM e localiza-se ao longo do Jardim do Carregal.
2. Dois poços de ataque à estação executados utilizando o método sequencial na direção vertical (MSV). O primeiro, com formato elíptico, situa-se próximo à rua Clemente Meneres. O segundo possui geometria circular e localiza-se no canto sudeste do Jardim do Carregal.
3. A ligação dos acessos nascente e poente, à superfície, construída por meio de uma pequena vala a céu aberto. Os acessos encontram-se nas ruas Clemente Meneres e na junção das ruas Clemente Meneres, do Rosário e Doutor Tiago de Almeida, respetivamente.

Na Figura 5 apresenta-se a implantação da EHSA no interior do Jardim do Carregal.



Fig. 5 – Implantação da EHSA - imagem base: Google Earth® (2024).

3.1.1 – Metodologia NATM

Segundo Karakus e Fowell (2004), desde o início do século XIX, as técnicas de construção de túneis têm evoluído continuamente, culminando com a apresentação do "New Austrian Tunneling Method" - NATM por Rabcewicz em 1962 no XIII Colóquio de Geomecânica em Salzburgo, sendo reconhecida internacionalmente dois anos mais tarde e usado em todo o mundo até hoje.

O NATM é um método de escavação com suporte mínimo, que depende do tipo de rocha ou solo circundante, para sustentar o túnel, porque considera que o maciço na zona envolvente do túnel contribui para a própria sustentação. Portanto, é necessário permitir a deformação do maciço de forma a mobilizar a máxima resistência possível. No entanto, deve-se garantir que o maciço não sofra grandes alterações das suas características geotécnicas evitando deformações excessivas ou o colapso. Tendo em conta o anteriormente referido, é necessário que o suporte primário seja colocado imediatamente após a escavação. Isso permite aproveitar o efeito de arco criado pela escavação no maciço e garante a segurança dos trabalhadores durante as operações de construção (Moreira, 2006).

O NATM, também designado por método de escavação sequencial, envolve a escavação do solo ou rocha, usando explosivos ou com recurso a meios mecânicos, como escavadora giratória com balde, martelo hidráulico ou fresa. Depois da escavação estar concluída, o suporte é instalado normalmente com recurso a cambota metálica, treliçada ou em perfil tipo H, ou noutro tipo de perfil, ou ainda a pregagens expansivas, tipo “swellex”, em conjunto com malha eletrosoldada. O suporte provisório é concluído com um revestimento de betão projetado, a que pode ser adicionado fibras metálicas ou de polipropileno, que cria um sustimento provisório durável. Na sequência, a escavação continua para a próxima secção do túnel.

Poderá existir a necessidade de, previamente ao avanço da escavação, realizar um tratamento de contorno e de frente do túnel, para melhorar ou reforçar o terreno circundante, e desta maneira permitir uma maior estabilidade da frente de obra, no momento da escavação, e uma diminuição da deformação do maciço associada ao avanço dos trabalhos. Usualmente, é realizado na soleira dos túneis, após alguns metros de avanço e em condições geológicas-geotécnicas menos competentes, a execução de um “arco invertido” concordante com a geometria do túnel, constituído por betão projetado e malha eletrosoldada. O suporte definitivo em betão armado, normalmente com a inclusão de um sistema de impermeabilização, será aplicado após a construção do túnel e tem como principal objetivo garantir a estabilidade da obra ao longo do tempo.

O NATM é amplamente versátil, podendo ser aplicado numa variedade de geometrias e dimensões de estruturas subterrâneas. Esta flexibilidade permite a adaptação do método às especificidades de cada projeto. Quando há a necessidade de criar estruturas subterrâneas de grandes dimensões, é possível parcializar a secção transversal, ajustando-a conforme os requisitos do projeto.

3.1.2 – Metodologia MSV

Para Pereira (2023), a transposição do método de escavação sequencial na horizontal (NATM) para a direção vertical, para construção de estruturas subterrâneas verticais, em particular poços de grande diâmetro, parece uma transformação simples, pois aproveita toda a sabedoria do NATM, que foi utilizada e testada com sucesso em vários projetos ao longo dos anos e em várias partes do mundo, para além de que beneficia do efeito de arco para obter uma solução geotécnica otimizada, em que o maciço é uma parte colaborante no revestimento provisório. Contudo, apesar das aparentes vantagens do uso do método sequencial na direção vertical (MSV), existem poucos exemplos da aplicação dessa técnica, quando comparado com outras metodologias.

O MSV envolve a escavação de uma secção do terreno, ao longo do perímetro da estrutura, com uma determinada altura, seguida pela instalação de um revestimento provisório. Em seguida, a escavação continua na secção seguinte e o processo é repetido até que um nível do poço, com uma determinada altura, esteja concluído. Os trabalhos prosseguem para o nível seguinte até que a profundidade desejada do poço seja alcançada (Pereira, 2023).

Conforme descrito por Cortizo (2015), os poços de grande diâmetro, executados pelo MSV, começaram a ser implementados a partir da década de 80 com um revestimento primário constituído por cambotas metálicas e betão projetado. A engenharia brasileira contribui, de forma significativa, com uma abordagem mais ligeira do MSV recorrendo a betão projetado e malha eletrosoldada como revestimento provisório. Esta abordagem, após a sua aplicação, verifica-se ser também estruturalmente segura, altamente hiperestática e económica para diversos tipos de maciço.

Independentemente do tipo de revestimento provisório utilizado, observa-se que o MSV oferece maior liberdade arquitetónica para o uso do espaço, em comparação com valas a céu aberto. Esta metodologia permite executar poços de grande diâmetro singulares ou múltiplos.

No contexto de Portugal, o MSV foi introduzido praticamente ao mesmo tempo nas obras do Metro do Porto e do Metro de Lisboa, graças à intervenção de uma empresa de projeto brasileira, a CJC Engenharia e Projetos (Gomes, 2008). Na Figura 6 apresenta-se, como exemplo de poços de grande diâmetro múltiplos conjugados, a Estação da Reboleira do Metro de Lisboa durante a fase de construção.



Fig. 6 – Construção da Estação da Reboleira do Metro de Lisboa (CJC, 2017).

3.2 – Configuração geométrica e estratégia de execução das estruturas

A estação, totalmente subterrânea e com um recobrimento mínimo de 11 m, será composta por duas galerias de grandes dimensões, interligadas num ângulo de 66 graus (similar a uma cruz de Santo André), com um poço de grande diâmetro em cada extremidade. O acesso à estação será feito por meio de dois túneis inclinados (Sener/CJC/NSE, 2019b).

3.2.1 – *Caverna de Cais*

A primeira caverna, denominada “*Caverna de Cais*” (CC), estende-se por aproximadamente 61 m, abrangendo uma área escavada com cerca de 172 m². Na sua secção transversal, a CC possui uma largura de 18 m e atinge uma altura máxima de escavação de 12 m, conforme Figura 7.

A metodologia executiva, foi concebida em escavação sequencial, com passos de avanço de 1 m e escavação em secção *side-drift*, alargamento da abóbada e rebaixo. O sistema de suporte provisório será em betão projetado armado com cambotas treliçadas de aço e malhas eletrosoldadas de aço (Figura 8).

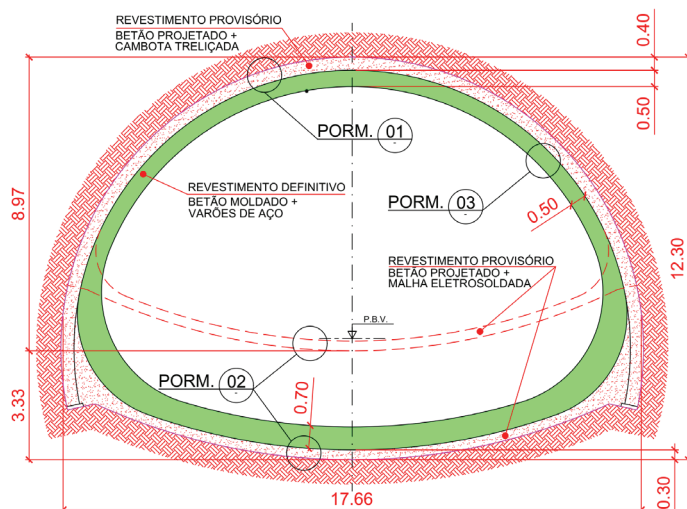


Fig. 7 – Secção transversal da CC (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

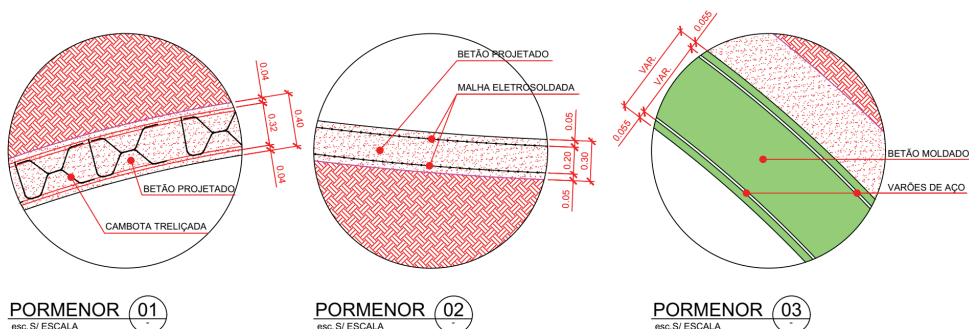


Fig. 8 – Pormenores da CC e da CM (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

Devido à presença de terrenos deformáveis e de baixa resistência mecânica, foram previstos tratamentos de abóbada e de frente. O controlo de águas subterrâneas será realizado através de geodrenos eventuais, concebidos para aliviar as pressões hidrostáticas no revestimento provisório, com o mínimo rebaixamento do nível freático. A galeria será totalmente impermeabilizada com recurso a uma geomembrana de PVC de 2,0 mm de espessura, tornando a galeria totalmente estanque. O revestimento definitivo será em betão moldado armado com varões de aço (Sener/CJC/NSE, 2019b).

3.2.2 – Poço de saída de emergência

No extremo sudeste da CC encontra-se o poço de saída de emergência (PSE). O PSE possui uma configuração circular, com um diâmetro médio de escavação de cerca de 24 m (correspondendo a uma área de aproximadamente 450 m²) e alcançando uma profundidade de sensivelmente 27 m (Figura 9).

A abordagem construtiva para o PES foi concebida segundo a metodologia MSV, com passos de avanço de 1 m de altura e escavação parcializada em planta. O sistema de suporte provisório será em betão projetado armado com malhas eletrosoldadas de varões de aço. Devido à presença de

materiais superficiais caracterizados como G7 foram previstos tratamentos de contorno com recurso a colunas secantes de *jet-grouting* de 0,80 m de diâmetro, sendo executadas com espaçamento de 0,65 m e até a profundidade aproximada de 12 m. O controlo das águas subterrâneas será realizado através de uma malha de geodrenos curtos, concebidos para aliviar as pressões hidrostáticas no revestimento provisório. Esse sistema de controlo de águas é adequado para estes maciços que apresentam permeabilidades médias a baixas. O poço será totalmente impermeabilizado com uma geomembrana de PVC de 2,0 mm de espessura, tornando-o totalmente estanque. O revestimento definitivo será em betão moldado armado com varões de aço (Sener/CJC/NSE, 2019b).

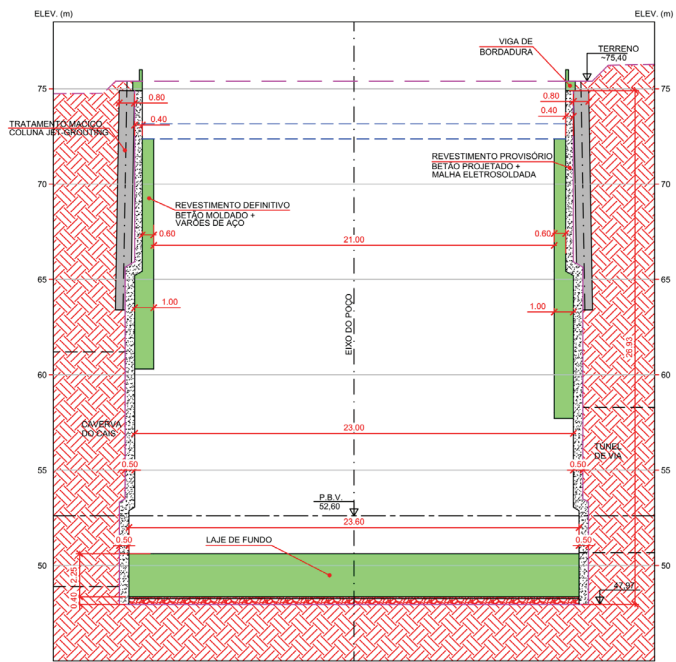


Fig. 9 – Secção geométrica longitudinal do PSE (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

3.2.3 – Caverna Mezanino

A segunda caverna, chamada “Caverna Mezanino” (CM), estende-se por aproximadamente 62 m, ocupando uma área escavada de cerca de 260 m². Na sua secção transversal, aproximadamente, a CM apresenta uma largura máxima de escavação de 20 m e atinge uma altura máxima de escavação de 17 m (Figura 10).

O procedimento executivo adotado baseia-se numa escavação sequencial (NATM), com avanços de 1 metro, recorrendo à escavação em secção *side-drift*, seguida do alargamento da abóbada e de duas fases de rebaixo. O sistema de suporte provisório será constituído por betão projetado complementado com cambotas treliçadas e malhas eletrosoldadas em aço (Figura 8). Atendendo à presença de terrenos deformáveis e com baixa resistência mecânica, estão previstos tratamentos específicos ao nível da abóbada e da frente de escavação. O controlo das águas subterrâneas será efetuado através da instalação de geodrenos, concebidos para alívio das pressões hidrostáticas sobre o revestimento provisório, procurando minimizar o rebaixamento do nível freático. A galeria será integralmente impermeabilizada com uma geomembrana de PVC de 2,0 mm de espessura, garantindo a sua total estanquicidade. O revestimento definitivo será executado em betão moldado, armado com varões de aço (Sener/CJC/NSE, 2019b).

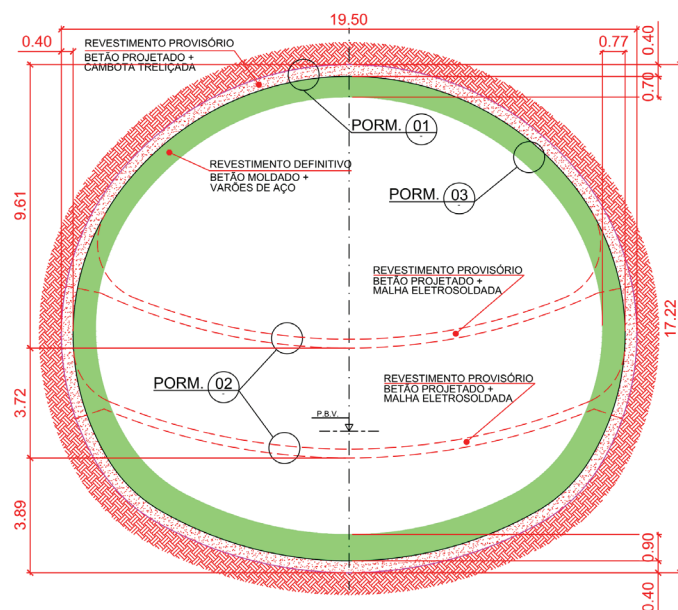


Fig. 10 – Secção transversal da CM (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

3.2.4 – Poço do elevador

No extremo nordeste da CM encontra-se o poço do elevador (PE). O PE possui uma forma elíptica, com uma largura média de escavação de aproximadamente 23 m no eixo maior e 18 m no eixo menor (o que corresponde a uma área aproximada de 325 m²) e possui uma profundidade de cerca de 27,5 m (Figura 11).

A metodologia executiva prevista para o PE foi concebida de acordo com o método MSV, com avanços verticais de 1 m e escavação parcializada em planta. O suporte provisório será constituído por betão projetado armado, reforçado com malhas eletrosoldadas de varões de aço. Face à presença de materiais superficiais classificados como G7, foram previstos tratamentos de contorno através da execução de colunas secantes de *jet-grouting* com 0,80 m de diâmetro, espaçadas a 0,65 m e com profundidade aproximada de 10 metros. O controlo das águas subterrâneas será assegurado por uma malha de geodrenos curtos, concebidos para alívio das pressões hidrostáticas sobre o revestimento provisório. Este sistema é particularmente adequado a maciços com permeabilidades médias a baixas. O poço será integralmente impermeabilizado com uma geomembrana de PVC com 2,0 mm de espessura, assegurando a sua total estanquicidade. O revestimento definitivo será executado em betão moldado, armado com varões de aço (Sener/CJC/NSE, 2019b).

3.2.5 – Túneis de acesso

A partir do PE, haverá a conexão com a superfície por meio da execução do túnel de acesso nascente (TAN). Este túnel terá uma extensão aproximada de 25 m e sua secção transversal será variável. No início, no sentido poço-superfície, a secção de escavação será maior, abrangendo cerca de 130 m², com uma altura de 10,5 m e largura de 15 m. No final do túnel, a secção de escavação diminuirá para aproximadamente 57 m², possuindo uma altura de 8,3 m e largura de 8,5 m, conforme Figura 12.

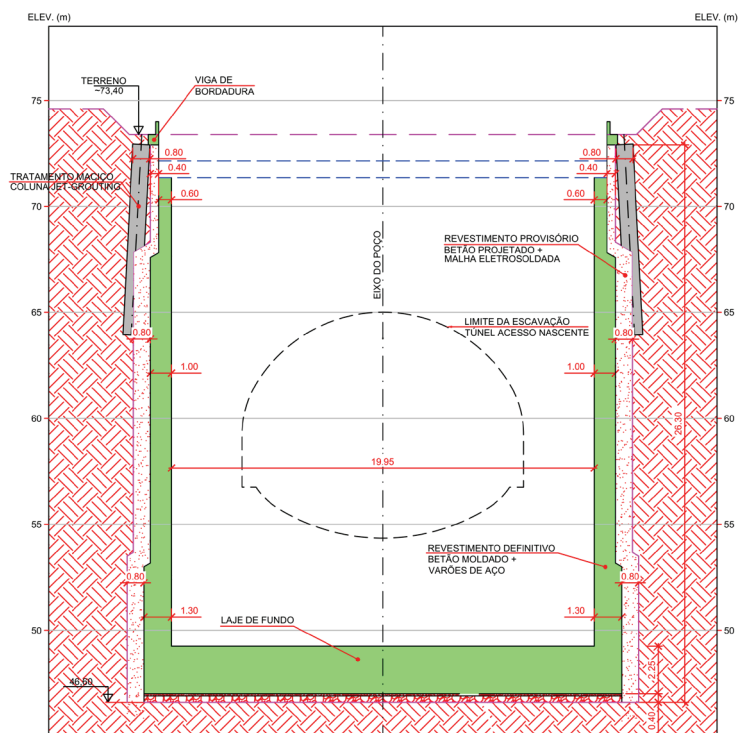


Fig. 11 – Secção geométrica longitudinal do PE (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

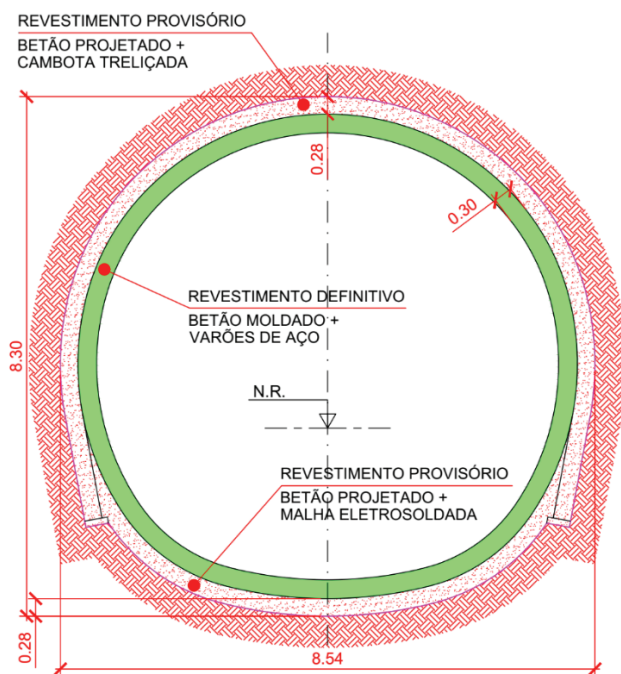


Fig. 12 – Secção transversal dos túneis de acesso (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).

A partir da extremidade sudoeste da CM, será estabelecida uma ligação com a superfície através da construção do túnel de acesso poente (TAP). Com uma extensão aproximada de 70 m, esse túnel apresentará uma secção de escavação única, com cerca de 57 m² de área, altura de 8,3 m e largura de 8,5 m (Figura 12). Ambos os túneis de acesso serão finalizados, para ligação à superfície, com recurso a uma vala a céu aberto (Sener/CJC/NSE, 2019b).

O projeto de execução dos túneis de acesso segue o modelo das cavernas, com a mesma escavação sequencial, estrutura de suporte em betão projetado armado, definição de tratamentos do maciço, controlo da água com recurso a geodrenos, impermeabilização com geomembrana de PVC e revestimento em betão armado.

Nas Figuras 13 e 14 é apresentada uma modelação tridimensional para melhor visualização dos elementos da EHSA.

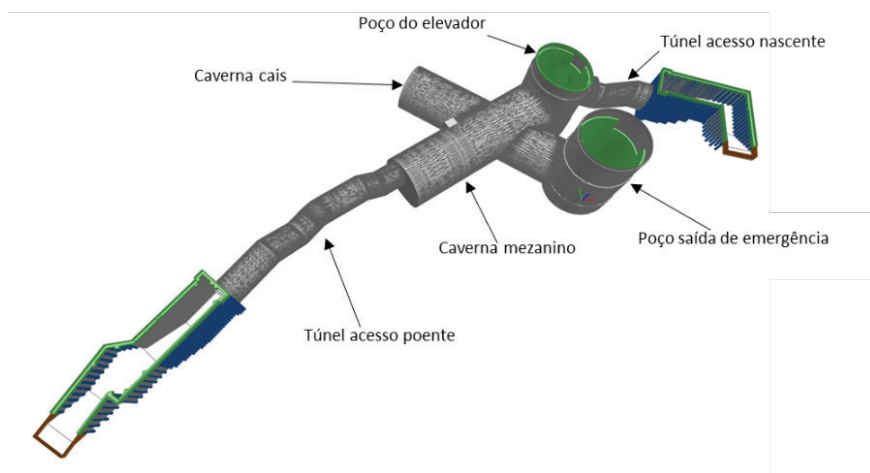


Fig. 13 – Modelação tridimensional da EHSA. Vista SW-NE (Pereira, 2023).

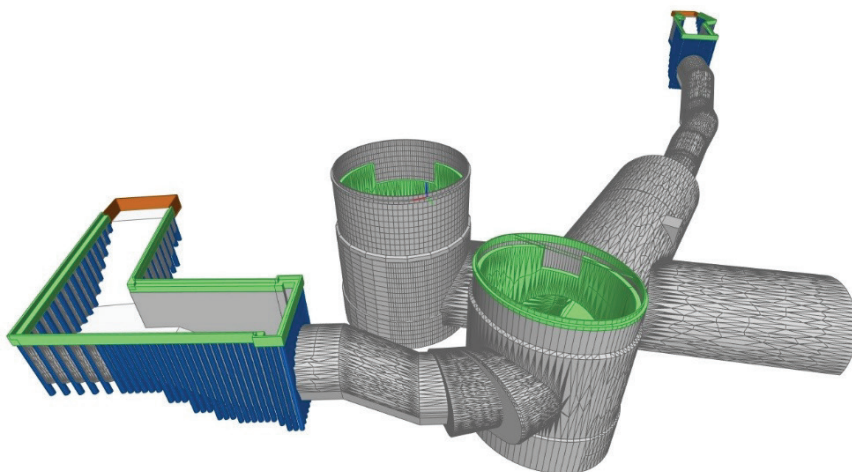


Fig. 14 – Modelação tridimensional da EHSA. Vista NE-SW.

4 – SEQUÊNCIA EXECUTIVA

4.1 – Trabalhos preparatórios

Antes do início efetivo da obra, foram meticulosamente executados uma série de trabalhos preparatórios. Estes preparativos eram essenciais para viabilizar a construção da estação e incluíam as seguintes tarefas:

- Alteração dos percursos do trânsito rodoviário local: para acomodar as futuras obras da estação, houve a necessidade de ajustar as rotas locais de tráfego rodoviário, garantindo a segurança e fluidez do trânsito na região.
- Montagem de estaleiro incluindo a instalação da vedação e barreiras acústicas, quando aplicável, no perímetro da obra.
- Remoção de água, limpeza e demolição da estrutura do lago do Jardim do Carregal.
- Aplicação de medidas de proteção nas espécies arbóreas, transplante de nove espécies e abate de um exemplar (*Acer pseudoplatanus*). Este espécie, dado a importância do exemplar, foi derrubado na presença de um escultor com objetivo de criação de uma escultura com o material resultante do abate.
- Realização de campanha de sondagens arqueológicas: para preservar o patrimônio arqueológico da área foram realizadas sondagens arqueológicas para identificar e documentar quaisquer vestígios históricos, antes do início das escavações.
- Instalação do sistema de instrumentação geotécnica no maciço e estruturas adjacentes (incluindo no túnel de Ceuta).
- Execução do desvio de infraestruturas (elétricas, telecomunicações, abastecimento de água, redes águas pluviais, redes águas residuais), incluindo o desvio do Rio Frio (Figura 15).

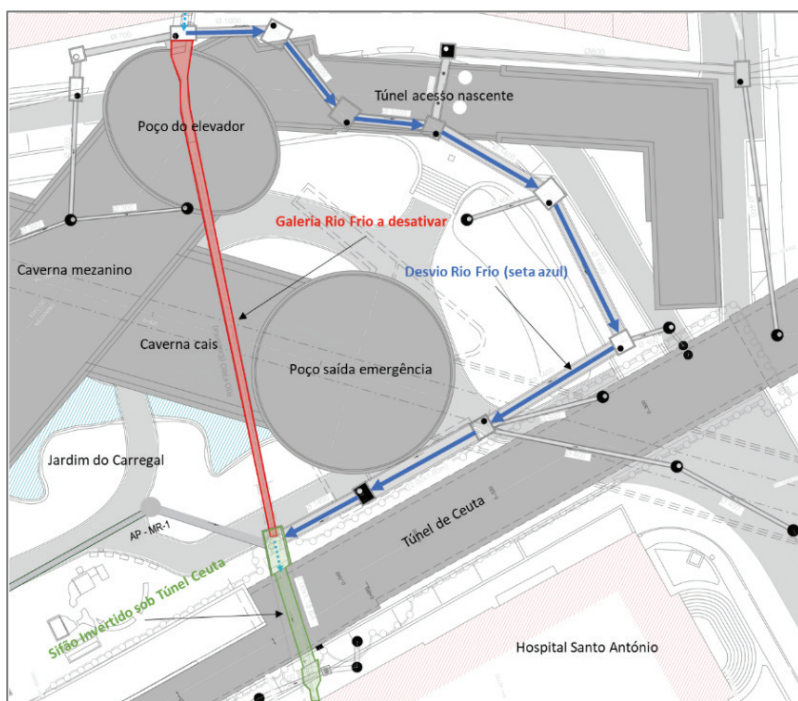


Fig. 15 – Planta do desvio Rio Frio (Pereira, 2023).

Para viabilizar a construção da estação, foi essencial realizar o desvio controlado do Rio Frio antes do início dos trabalhos, de modo a direcionar o curso do rio ao redor da futura área onde a estação será construída. Este desvio manterá o fluxo da linha de água atual até ao sifão invertido, instalado sob o túnel de Ceuta, seguindo-o até encontrar o Rio Douro (Pereira, 2023).

4.2 – Fase de obra

Após a conclusão dos trabalhos preparatórios, deu-se início à fase de construção da EHSA. Neste ponto, é relevante destacar que o processo de construção decorreu de maneira progressiva e estruturada.

Os trabalhos na EHSA tiveram início com a construção do PSE. Tendo em conta a presença dos terrenos superficiais G7, houve a necessidade da implementação de um tratamento perimetral do maciço, que foi aplicado nos dois poços de ataque da estação, constituído por colunas verticais secantes de *jet-grouting* com 0,8 m de diâmetro. Após esta etapa, avançou-se para escavação do poço. A escavação do poço, e aplicação do revestimento primário (betão projetado e malha eletrosoldada), foi realizada com a divisão do poço em níveis de 1 m de altura e painéis de 6 m de extensão, até os 27 m de profundidade, conforme definido no projeto de execução. A partir dos 9 m de profundidade, foram instalados geodrenos para aliviar as pressões hidrostáticas no revestimento provisório, sem causar um rebaixamento acentuado do nível freático. O revestimento primário em torno do túnel de via (TVD) e da CC foram reforçados para permitir o início dos trabalhos de escavação destas estruturas sem a execução do revestimento definitivo do poço.

Na Figura 16, Figura 17 e Figura 18 apresenta-se uma secção longitudinal do PSE e uma vista aérea do PSE e PE, respetivamente.

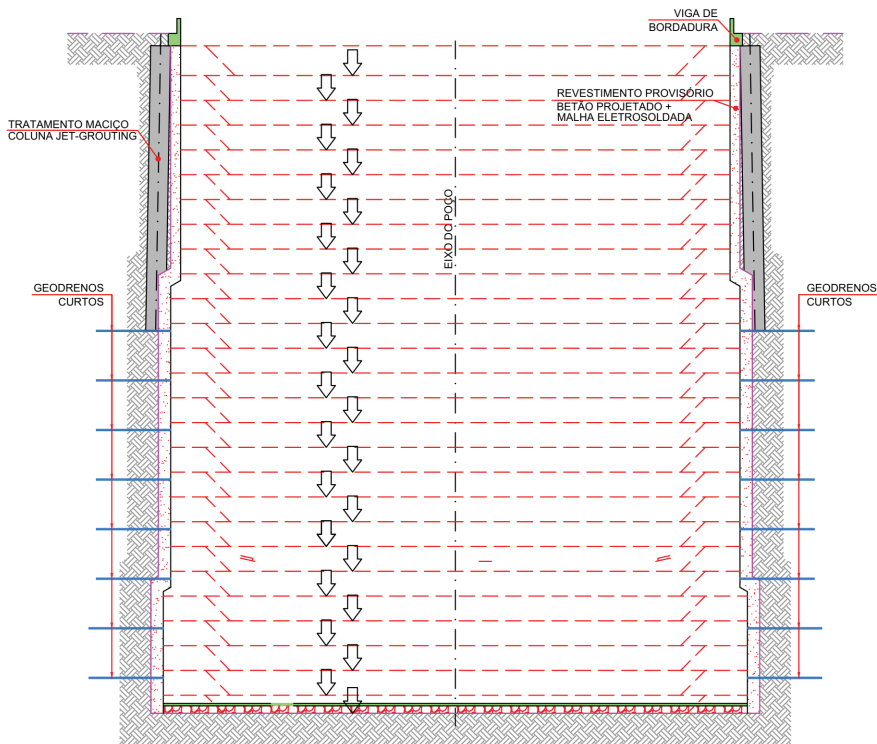


Fig. 16 – Secção longitudinal do PSE (adaptado de Sener/CJC/NSE, 2018-2024).



Fig. 17 – Vista aérea do PSE (Metro do Porto, 2022).



Fig. 18 – Vista aérea do PSE e PE (Metro do Porto, 2022).

Na sequência, os trabalhos na CC avançaram de forma intercalada com o avanço do TVD, segundo a metodologia NATM, em duas fases: abóbada dividida em *side-drift* e alargamento, e o rebaixo. Após o avanço de 6 m realizou-se uma parede de paralisação. Esta frente foi suspensa até terminarem os trabalhos de revestimento definitivo da CM. Quando a execução do PSE estava a

15 m de profundidade, os trabalhos de escavação do PE iniciaram-se, seguindo a mesma metodologia sequencial de execução do PSE.

A escavação do PE foi temporariamente interrompida, aos 15 m de profundidade, permitindo o avanço dos trabalhos na abóbada da CM, do TAN e do TAP.

A escavação da CM foi conduzida de forma seccionada: em abóbada (dividida em *side-drift* e alargamento), primeiro e segundo rebaixo, respeitando a metodologia executiva sequencial NATM (Figura 19). O revestimento primário da CM, como dos restantes túneis da EHSA, é constituído por betão projetado, cambota treliçada e malha eletrosoldada.

Os trabalhos de escavação, a partir do PE, iniciaram-se com os tratamentos de contorno e frente do emboquilhamento da abóbada da CM e do TAN. Após isto, avançou-se com a escavação do *side-drift* da CM. O alargamento da abóbada da CM foi iniciado assim que o *side-drift* se encontrava a meio da CM. Após a conclusão da abóbada da CM foi realizada a parede de paralisação e os tratamentos de emboquilhamento do TAP e CC (no sentido nascente e poente).

Enquanto a CM era escavada, também se iniciou a escavação do TAN, seguindo a sequência construtiva NATM, até os 12 m de avanço, aproximadamente. Relativamente ao TAP, os trabalhos de escavação subterrânea avançaram cerca de 12 m. Após isto, ambas as frentes de escavação foram suspensas, ficando a aguardar o avanço dos trabalhos a partir da superfície.

De seguida, foi iniciado o avanço para o primeiro rebaixo da CM. Após a conclusão dos trabalhos de escavação da abóbada e do primeiro rebaixo da CM, a escavação do PE foi retomada até à sua conclusão. À medida que os trabalhos de escavação do PE avançavam, os trabalhos do segundo rebaixo da CM prosseguiram até à sua conclusão (Figura 20).

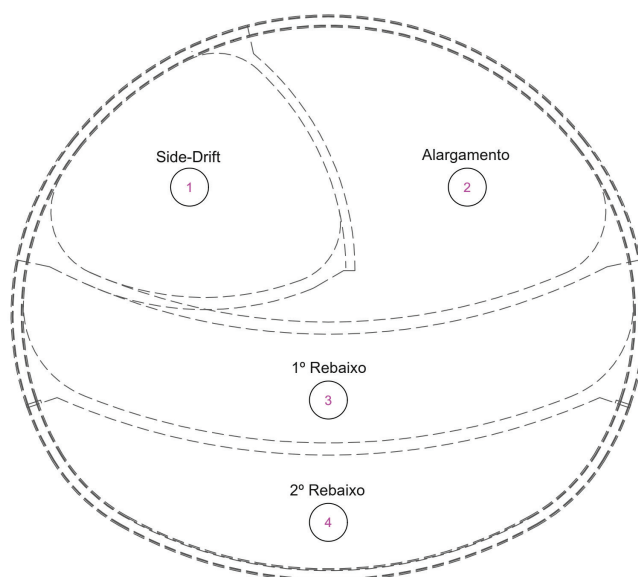


Fig. 19 – Faseamento executivo da CM.

Após a finalização dos trabalhos de escavação e revestimento primário da CM e do PE, iniciaram-se os trabalhos de impermeabilização e revestimento secundário da CM, do PE e do PSE. Durante este período, foram realizados os trabalhos de contenção à superfície, escavação e escoramento interno da vala a céu aberto, para permitir o emboquilhamento e avanço dos trabalhos, em NATM, do TAP e do TAN.



a) *Side-drift*



b) Alargamento da abóbada



c) Primeiro rebaixo



d) Vista geral após conclusão da CM

Fig. 20 – Etapas da execução da CM (Metro do Porto, 2023-2024).

No seguimento da conclusão do revestimento secundário da CM, os trabalhos de escavação e revestimento primário avançaram na CC, tanto do lado nascente como do lado poente. A escavação da CC foi realizada de forma similar à CM e em secções: primeiro a abóbada e depois rebaixo, respeitando a metodologia NATM.

Com a conclusão dos trabalhos de escavação e revestimento primário da CC (Figura 21), TAP e TAN, foram iniciados os trabalhos de impermeabilização e revestimento secundário.

Na data de conclusão da redação deste trabalho (abril 2025), este era o ponto de situação da obra. No intuito de mostrar uma sequência executiva completa, apresenta-se de seguida uma previsão de como os trabalhos se irão desenvolver.

À medida que as frentes de trabalho concluem o revestimento secundário, serão iniciados os trabalhos de execução das estruturas internas, seguidos da execução dos trabalhos de via e dos elementos previstos no projeto de arquitetura. Para concluir a fase de obra da Estação Hospital Santo António, serão executados os trabalhos de reinserção urbana da estação e a devolução à comunidade do Jardim do Carregal e arruamentos em torno da estação.



a) Início lado nascente



b) Início lado poente



c) Término lado nascente



d) Término lado poente

Fig. 21 – Escavação e revestimento primário da CC (Metro do Porto, 2023-2025).

5 – SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A instrumentação geotécnica desempenha um papel fundamental nos métodos construtivos NATM e MSV, permitindo o acompanhamento contínuo dos trabalhos subterrâneos com deteção e quantificação das deformações ocorridas ao longo do tempo. A análise sistemática dos dados recolhidos permite validar as premissas de projeto, adaptar a metodologia executiva, quando necessário, e garantir a segurança das obras, minimizando o risco de ocorrências indesejáveis.

A metodologia adotada no desenvolvimento do projeto de execução da EHSa teve como base a filosofia de projeto flexível, que prevê o controlo sistemático dos trabalhos através de um plano de monitorização. Este plano teve como objetivo principal confirmar o comportamento previsto do maciço e da estrutura de suporte, possibilitando, sempre que necessário, a introdução de ajustes que assegurem o cumprimento dos prazos de execução, bem como uma gestão eficiente das incertezas e imprevistos inerentes ao contexto geológico-geotécnico e urbano em que a obra se insere, sem nunca comprometer a segurança.

A execução de obras subterrâneas implica sempre uma modificação das condições naturais do terreno, em especial na sua envolvente. Estas alterações poderão refletir-se à superfície sob a forma de uma bacia de assentamento, cuja extensão poderá ser significativa. Assim, em intervenções em meio urbano, torna-se imprescindível avaliar antecipadamente o impacto dos trabalhos, não só no maciço e na estrutura de suporte, mas também nas estruturas e infraestruturas adjacentes.

Neste enquadramento, foi definido um plano de observação, conforme Figura 22, específico para a construção da EHSA, o qual estabeleceu os tipos de medições a realizar, a sua localização, a frequência das leituras e os níveis de referência considerados aceitáveis. Este plano foi concebido para acompanhar o comportamento do maciço e da estrutura de suporte ao longo de toda a execução da obra.

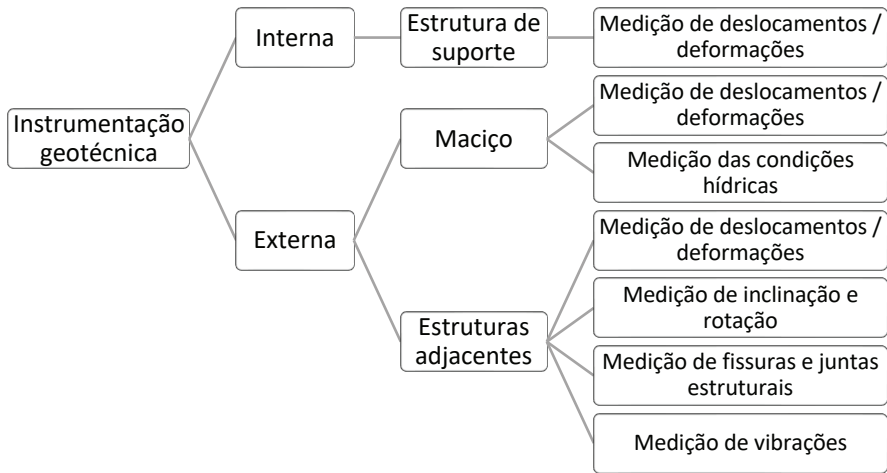


Fig. 22 – Plano de observação utilizado durante a execução da EHSA.

Dado que a EHSA se localiza numa zona densamente urbanizada, o plano de observação foi complementado com a monitorização das estruturas existentes na área de influência da obra. Para a concretização deste plano, foram definidos e instalados, antes do início dos trabalhos, diversos instrumentos destinados à monitorização.

A correta integração destes equipamentos num plano de instrumentação coerente permitiu obter informação fiável e detalhada sobre o desempenho do maciço e das estruturas ao longo dos diferentes momentos do faseamento da obra.

A instrumentação geotécnica para a execução da EHSA será apresentada de forma segmentada, em três áreas distintas: instrumentação do maciço, instrumentação da estrutura de suporte e instrumentação das estruturas adjacentes.

5.1 – Instrumentação do maciço

A instrumentação do maciço visou acompanhar o comportamento geotécnico do terreno durante as fases de escavação e execução do revestimento primário, com especial enfoque na deteção de deslocamentos e variações do nível freático. Para tal, foram instalados equipamentos que permitiram medir deslocamentos verticais e horizontais, na superfície e em profundidade, bem como alterações do nível de água do maciço.

Os principais equipamentos utilizados incluíram marcas de superfície, extensómetros, inclinómetros verticais e indicadores de nível de água. Estes instrumentos foram instalados em localizações ao longo do perímetro da escavação e em zonas adjacentes à mesma, permitindo uma leitura tridimensional do comportamento do terreno ao longo do tempo.

As leituras foram realizadas com periodicidade definida no plano de observação, ajustada em função da fase construtiva e da proximidade da frente de escavação, assegurando um controlo eficiente da resposta do terreno às solicitações induzidas pela obra.

5.2 – Instrumentação da estrutura de suporte

A instrumentação da estrutura de suporte teve como principal objetivo acompanhar a sua resposta estrutural ao longo das várias fases de escavação e construção, desde a instalação do revestimento primário.

Foram utilizadas soluções de instrumentação que permitiram acompanhar deslocamentos relativos e absolutos. Entre os equipamentos instalados destacam-se os alvos topográficos, para medições tridimensionais dos pontos de controlo e variações de distância entre pontos (medição de cordas).

Estes instrumentos foram colocados em zonas estratégicas da estrutura de suporte, com base em critérios definidos na fase de projeto, garantindo a representatividade dos dados obtidos face à globalidade da resposta estrutural. A frequência das leituras foi adaptada à evolução dos trabalhos.

5.3 – Instrumentação das estruturas adjacentes

A monitorização das estruturas adjacentes à futura EHSA constituiu uma componente essencial do plano de instrumentação, tendo como principal finalidade garantir a integridade dos edifícios e infraestruturas existentes dentro da área de influência da obra, como por exemplo o túnel de Ceuta.

Com este propósito, foram definidos pontos de controlo em fachadas, elementos estruturais e fundações das estruturas adjacentes, onde se instalaram diversos tipos de instrumentos, incluindo alvos topográficos, pinos de assentamento, clinómetros, fissurómetros e sismógrafos. Esta instrumentação permitiu acompanhar, em tempo real, eventuais: deslocamentos, variações geométricas e rotações em pontos representativos da estrutura, vibrações e evolução da abertura de fissuras que pudessem refletir interações indesejáveis com o avanço dos trabalhos.

A seleção e distribuição dos instrumentos tiveram em consideração a vulnerabilidade e importância relativa das estruturas monitorizadas, bem como o seu afastamento em relação à área onde decorriam os trabalhos. A leitura regular destes dispositivos foi integrada com os dados da instrumentação do maciço e da estrutura de suporte, permitindo uma análise global da interação entre a obra e o meio urbano envolvente.

5.4 – Avaliação do plano de observação implementado

A aplicação de um plano de observação rigoroso e tecnicamente fundamentado revelou-se essencial para o acompanhamento da execução da EHSA, permitindo avaliar a resposta do maciço e das estruturas envolvidas às diferentes fases da obra. A instrumentação implementada, com os ajustamentos pontuais efetuados em obra, demonstrou-se globalmente adequada para os objetivos de monitorização estabelecidos, proporcionando dados fundamentais para a gestão técnica da empreitada.

A integração dos diferentes tipos de medições — no maciço, na estrutura de suporte e nas estruturas adjacentes — possibilitou uma leitura coerente e multidimensional do comportamento observado, contribuindo para uma tomada de decisão informada ao longo do processo construtivo. A inexistência de necessidade de ativação de medidas corretivas ou planos de contingência reforça a adequação da metodologia adotada, evidenciando o papel central da instrumentação geotécnica na

mitigação de riscos e no sucesso da execução de obras subterrâneas em ambientes urbanos complexos.

6 – ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DE OBRA

O dimensionamento geotécnico desempenha um papel fundamental no projeto e execução de obras subterrâneas. Entre as diversas abordagens sobre o dimensionamento geotécnico, o método observacional desempenha um papel crucial no processo de execução de obras subterrâneas, segundo os métodos NATM e MSV. Estes métodos baseiam-se numa abordagem flexível e adaptável às condições geológicas encontradas durante a escavação. Nesse contexto, o método observacional é a abordagem de dimensionamento geotécnico mais compatível, porque vai permitir o ajuste do método executivo de acordo com as condições encontradas, no local, durante o acompanhamento dos trabalhos.

A construção da Estação Hospital Santo António foi acompanhada por uma equipa especializada e experiente denominada Assistência Técnica Especial (ATE). Esta equipa de acompanhamento dos trabalhos, constituída por engenheiros civis, engenheiros geotécnicos e geólogos, com conhecimento em obras de grande porte e nos métodos construtivos, garantiram uma análise precisa e uma resposta adequada aos desafios que surgiram.

O acompanhamento dos trabalhos materializou-se em inspeções regulares do processo executivo. Quando foram observados desvios significativos ou problemas inesperados, a ATE indicou, de imediato, as medidas corretivas em coordenação com o Projetista. Este é um aspeto importante do método observacional, que permite uma tomada de decisão, em tempo real, e possibilita, de forma proativa, identificar potenciais riscos relacionados com a segurança da obra. Acrescenta-se que a ATE, durante o desenvolvimento dos trabalhos, realizou a confirmação das premissas que foram admitidas para a realização do projeto de execução.

Uma das confirmações que a ATE realizou foi a das condições geológicas e geotécnicas, com recurso a cartografia geológica da frente de escavação. Este acompanhamento permitiu uma avaliação contínua das condições geológicas da frente de escavação, garantindo que o projeto fosse adaptado às características reais do terreno. O levantamento geológico realizado foi minuciosamente comparado com o perfil geológico-geotécnico de referência, estabelecido no projeto de execução, e não foram identificadas diferenças significativas ou que tivessem impacto de forma adversa no progresso dos trabalhos.

Outra das confirmações realizadas pela ATE foi do comportamento do maciço, da estrutura de suporte e das estruturas adjacentes, antes e durante a construção da futura estação. A ATE verificou que a instrumentação definida pelo projeto, com os devidos ajustes, foi suficiente para fazer o acompanhamento da evolução das deformações não se tendo registado a necessidade de aplicar um plano de contingência.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção da Estação Hospital Santo António, da linha rosa do Metro do Porto, representa um marco significativo no panorama das infraestruturas urbanas do Porto, enfrentando e superando um conjunto de desafios complexos através de uma abordagem inovadora e sustentável. A estação localiza-se no centro da cidade do Porto, mais especificamente no Jardim do Carregal. Este jardim é considerado uma área de grande importância histórica e ambiental, e por isso a obra exigiu uma consideração meticulosa dos impactos ambientais e patrimoniais.

Para ultrapassar os vários desafios técnicos, a solução encontrada recorreu a métodos construtivos não destrutivos e envolveu a execução arrojada de duas galerias de grandes dimensões, com pouco recobrimento, associadas a poços de grande diâmetro em condições geológicas-geotécnicas complexas e de difícil previsão, como é o caso do granito do Porto. A solução construtiva permitiu não só satisfazer as necessidades arquitetónicas, mas também atender aos

condicionamentos ambientais, como a presença de uma linha de água (Rio Frio). Este rio, mesmo após o desvio necessário para a construção da estação, manteve, de forma geral, o traçado original, demonstrando a eficácia da abordagem adotada. A preservação do Jardim do Carregal foi outro aspeto crucial do projeto. Apesar da execução da obra, foi possível manter a maior parte do jardim intacta. As perturbações que ocorreram em áreas específicas do jardim foram projetadas para serem reversíveis durante a fase de reinserção urbana, com apenas uma espécie arbórea necessitando ser abatida. Este cuidado sublinha o compromisso com a preservação ambiental e o respeito pelos espaços verdes urbanos. Além das considerações ambientais, a construção enfrentou e mitigou os impactos nas estruturas adjacentes, infraestruturas rodoviárias e na população local. Durante a fase de obra, embora houvesse alguma perturbação, estas foram mantidas dentro de condições aceitáveis. A gestão eficaz e a comunicação contínua com os residentes ajudaram a minimizar os inconvenientes temporários.

O resultado é uma estação de metro que, não só se integra perfeitamente na malha urbana, mas também estabelece novos padrões de excelência em construção subterrânea. A inovação tecnológica e as práticas de respeito ambiental implementadas no projeto asseguraram que a construção de infraestruturas modernas pode coexistir harmoniosamente com a preservação do património natural e cultural.

Quando a linha rosa do Metro do Porto, especificamente a EHSA, entrar em operação, prevê-se que os benefícios irão superar em muito os esforços e inconvenientes assumidos durante a fase de construção. O aumento da rede metropolitana do Porto, mais concretamente no local do caso de estudo, irá facilitar o acesso ao hospital Santo António e às áreas circundantes, e proporcionará uma melhor qualidade de vida aos cidadãos e um desenvolvimento urbano mais sustentável.

Em suma, a construção da EHSA é um excelente exemplo de como enfrentar desafios técnicos e ambientais de forma inovadora e eficaz. Este projeto, não só enriquece a rede de transporte da cidade do Porto, mas também serve de inspiração para futuros desenvolvimentos de infraestruturas em meio urbano. A conjugação de geotecnia avançada com práticas de sustentabilidade assegura que o progresso pode ser alcançado sem sacrificar o meio ambiente, fazendo deste projeto um modelo a ser seguido nos anos vindouros.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento ao Metro do Porto pela autorização concedida para a utilização de elementos do projeto e fotografias da obra na apresentação do presente trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CJC (2017). *Projetos/Metros*. Disponível em: <http://www.cjceng.com.br/br/projetos> (cesso em 2024).
- CMP (2024a). *Jardim do Carregal*. Disponível em: <https://ambiente.cm-porto.pt/parques-e-jardins/jardim-do-carregal> (acesso em 2024).
- CMP (2024b). *Portal de Informação Geográfica do Porto*. Disponível em: <https://cm-porto.maps.arcgis.com/apps/dashboards/dcdbff863c8546a8a4026b3de8f4660c> (acesso em 2024).
- Cortizo, P. T. (2015). *Análise de poços de grande diâmetro executados pelo método de escavação sequencial na vertical*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- Cury, K. (1978). *Métodos Construtivos para obras subterrâneas*. Companhia Metropolitana de São Paulo, Brasil.

- Gomes, A. T. (2008). *Poços elípticos pelo método de escavação sequencial na vertical. O caso do Metro do Porto*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- ITA (2012). *ITA Report #11. Report on Underground Solutions for Urban Problems*. ITA Working Group #20.
- Karakus, M.; Fowell, R. (2004). *An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM)*. ROCKMEC'2004 - VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas, Turquia.
- Moreira, C. M. (2006). *Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro*. Fundação Ensino e Cultura Fernando Pessoa, Porto, Portugal.
- Noronha, F. e Leterrier, J. (2000). *Complexo metamórfico da Foz do Douro (Porto)*. *Geoquímica e geocronologia*. Bol. Real Acad. Galega Ciencias, 19, Santiago Compostela, Espanha.
- Pereira, J. A. (2023). *Metodologia de execução de poços de grande diâmetro em ambiente urbano*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE (2018-2024). *Peças desenhadas do projeto de execução linha circular do Metro do Porto*. Sener/CJC/NSE, Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE (2019a). *Memória descritiva da geologia e geotecnia do projeto de execução da linha circular do Metro do Porto*. Relatório P-PR-LI-8000-GG-MD-SCN-00001-04. Sener/CJC/NSE, Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE (2019b). *Memória descritiva da Estação Hospital Santo António da linha circular do Metro do Porto*. Relatório P-PR-LI-8003-TU-MD-SCN-001001-02. Sener/CJC/NSE, Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE (2020). *Enquadramento geral do projeto de execução da linha circular do Metro do Porto*. Relatório P-PR-LI-8000-GE-MD-SCN-000001-03. Sener/CJC/NSE, Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE (2021). *Relatório técnico sobre análise de risco de danos do túnel de Ceuta e edifício portal (salas técnicas) do projeto de execução da linha circular do Metro do Porto*. Relatório P-PR-LI-8004-ET-MD-SCN-001001-03. Sener/CJC/NSE, Porto, Portugal.
- Sener/CJC/NSE/Arqpais (2018). *Estudo de impacto ambiental do estudo prévio da linha circular do Metro do Porto. Anexos técnicos - Anexo 5 - Paisagem*. Relatório P-PR-LI-8000-AM-RT-SCN-000003-00. Sener/CJC/NSE/Arqpais, Porto, Portugal.
- Tender, M.; Couto, J. P. (2021). *Métodos de escavação subterrânea o critério "segurança e saúde" como fator de escolha*. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.