

# GRANDES ESCAVAÇÕES EM MEIO URBANO. UMA PERSPECTIVA SOBRE AS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E OS SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA O SEU SUPORTE

Large urban excavations. A view on construction solutions and structural systems for their support

Manuel Matos Fernandes<sup>a</sup>, António Silva Cardoso<sup>a</sup>, Nuno Guerra<sup>b</sup>

<sup>a</sup> CONSTRUCT-GEO, Dep. de Eng. Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

<sup>b</sup> UNIC, Dep. de Eng. Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

**RESUMO** – Analisa-se as principais soluções construtivas usadas no suporte de grandes escavações em meio urbano e situa-se no tempo o seu desenvolvimento. Mostra-se como às técnicas construtivas estão associados sistemas estruturais que, ao longo do tempo, foram sendo sucessivamente mais complexos, permitindo a execução de escavações em situações geotécnicas difíceis e com segurança adequada. Analisa-se as soluções construtivas disponíveis em relação à sua adequabilidade face a cinco cenários geotécnicos simplificados e, para os casos considerados adequados, classifica-se essas soluções em relação ao seu grau de viabilidade, ao potencial para controlo de deslocamentos e ao custo esperado. Classifica-se ainda as soluções construtivas do ponto de vista estrutural, associando-se a cada tipo de estrutura os principais esforços estruturais envolvidos.

**SYNOPSIS** – The main construction solutions used to support large excavations in urban areas are analyzed and their development is placed in time. It is shown how the construction techniques are associated with structural systems that, over time, have been successively more complex, allowing the execution of excavations in difficult geotechnical conditions with an adequate level of safety. The construction solutions available are analyzed considering their suitability in relation to five simplified geotechnical scenarios and, for the cases considered suitable, these solutions are classified according to their degree of viability, the potential for controlling displacements and the expected cost. Structural solutions are also classified from a structural point of view, associating the main structural loadings involved to each type of structure.

**Palavras Chave:** escavações profundas em meio urbano, técnicas construtivas, sistemas estruturais, classificação.

**Keywords:** deep urban excavations, construction techniques, structural systems, classification.

## 1 – INTRODUÇÃO

Nas grandes escavações urbanas a conceção estrutural está muitas vezes ligada à técnica e à sequência construtivas, o que também acontece em obras tão diversas como as estruturas subterrâ-

---

E-mails: mfern@fe.up.pt (M. Matos Fernandes), scardoso@fe.up.pt (A. Cardoso), nguerra@fct.unl.pt (N. Guerra)

ORCID: [orcid.org/0000-0003-2661-9357](https://orcid.org/0000-0003-2661-9357) (M. Matos Fernandes), [orcid.org/0000-0002-6025-4681](https://orcid.org/0000-0002-6025-4681) (A. Cardoso), [orcid.org/0000-0001-8380-9902](https://orcid.org/0000-0001-8380-9902) (N. Guerra)

neas ou as pontes. No presente trabalho passa-se em revista as técnicas construtivas e as correspondentes soluções estruturais disponíveis para a execução de grandes escavações urbanas. Tal é feito sem entrar em detalhes executivos, mas com a preocupação de transmitir uma perspetiva da evolução e do encadeamento das soluções conhecidas. De facto, o entendimento da cadeia de avanços tecnológicos e estruturais relevantes é crucial na procura de novos desenvolvimentos.

O Quadro 1 apresenta uma lista das principais técnicas construtivas, e das correspondentes soluções estruturais, usadas desde as primeiras décadas do século XX na realização das grandes escavações urbanas, bem como uma tentativa de situar o seu uso no tempo. Essas técnicas e soluções são analisadas na secção seguinte.

**Quadro 1** – Técnicas construtivas usadas no suporte de grandes escavações em meio urbano e datação do seu desenvolvimento

Técnicas construtivas	anos 50	anos 60	anos 70	anos 80	anos 90	2000 até hoje
Escavação em talude com (ou sem) suporte parcial de madeira	×					
Paredes de madeira escoradas	×					
Escavação em vala	×	×				
Paredes tipo Berlim (com pranchas de madeira), escoradas	×	×	×	×	×	×
Ancoragens		×	×	×	×	×
Paredes tipo Berlim (com pranchas de madeira), ancoradas		×	×	×	×	×
Paredes moldadas executadas com <i>clamshell</i> , escoradas ou ancoradas		×	×	×	×	×
Paredes suportadas pelas lajes da estrutura permanente (solução <i>top-down</i> )		×	×	×	×	×
Paredes tipo Berlim definitivas (com painéis de betão armado), escoradas ou ancoradas		×	×	×	×	×
Paredes moldadas executadas com hidrofresa, ancoradas ou escoradas				×	×	×
Paredes de estacas tangentes ou espaçadas, ancoradas ou escoradas				×	×	×
Paredes de estacas secantes, ancoradas ou escoradas					×	×
Pregagens em solos				×	×	×
Tratamento do terreno ( <i>jet-grouting</i> , <i>compaction grouting</i> , <i>deep-soil-mixing</i> )					×	×
Poços elípticos construídos com o método sequencial de escavação-betonagem					×	×
Tratamento do terreno ( <i>cutter-soil-mixing</i> ) ou <i>cross-walls</i> executadas com a técnica das paredes moldadas						×
Sistema de escoramento pré-esforçado				×		×

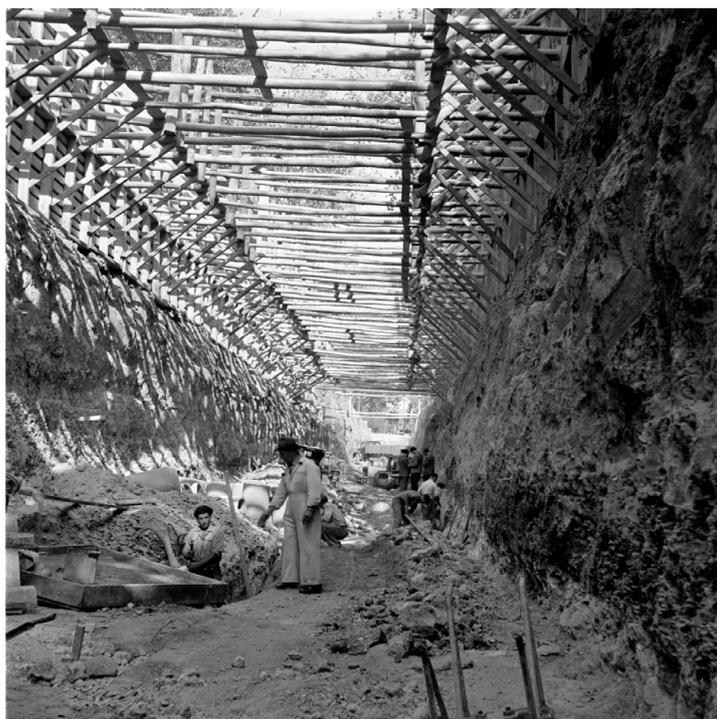
Das soluções apresentadas, analisa-se posteriormente aquelas que se consideram realizáveis atualmente (excluem-se, portanto, as soluções mais antigas que não asseguram suficiente controlo dos deslocamentos e (ou) adequado nível de segurança) do ponto de vista da sua aplicação a cinco cenários geotécnicos relevantes. As soluções são, assim, classificadas, nos casos aplicáveis, quanto ao seu grau de viabilidade, ao potencial para controlo de deslocamentos e ao seu custo. Tal é apresentado na secção 3.

Finalmente, na secção 4, as soluções são classificadas do ponto de vista estrutural, identificando-se o principal tipo de esforço estrutural em causa, tanto na parede como nos seus apoios, nos casos em que existem.

## 2 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E SISTEMAS ESTRUTURAIS

### 2.1 – Soluções usadas antes dos anos 60

Antes dos anos sessenta, as técnicas construtivas empregues eram muito primitivas: i) escavações sem suporte ou com suporte parcial em madeira, com inclinação do talude adaptada à resistência do terreno (Figura 1); ii) escavações com suporte integral em madeira, o que exigia escavação prévia à instalação da estrutura de contenção (Figura 2); iii) perfis de aço verticais (tipo H ou I) instalados em furos na periferia da escavação previamente à realização desta, combinados com pranchas de madeira instaladas entre banzos, acompanhando o progresso da escavação (Figuras 3 e 4). Em todos estes casos, os apoios da face da escavação, quando existiam, eram escoras de madeira (Figura 3) ou de aço (Figura 4).



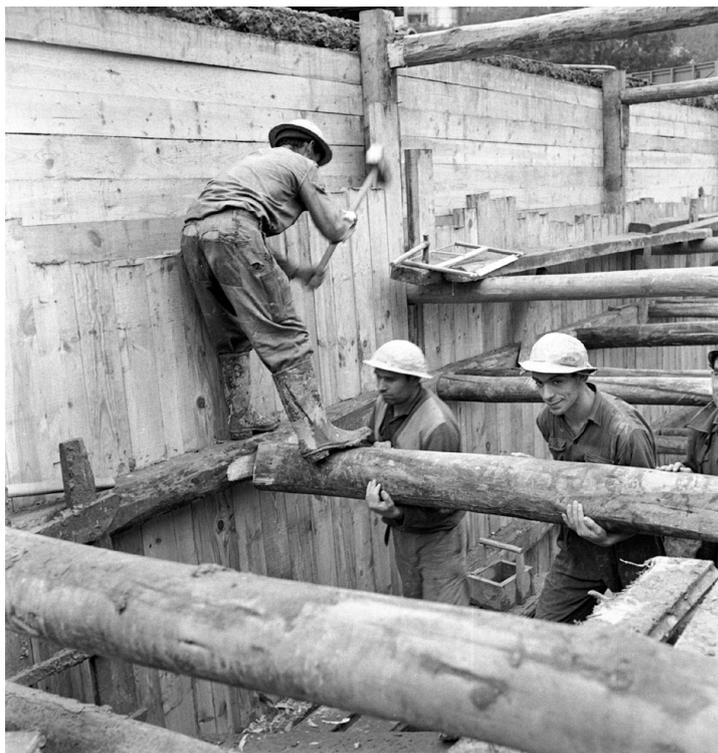
**Fig. 1** – Metro de Lisboa, avenida da Liberdade, 1955 (gentileza do Metropolitano de Lisboa).

As estruturas com perfis metálicos verticais e pranchas de madeira são frequentemente designadas por paredes Berlim, pelo facto de as suas aplicações pioneiras terem provavelmente ocorrido na construção do metro daquela cidade logo nos primeiros anos do século XX (Wittke, 1997).

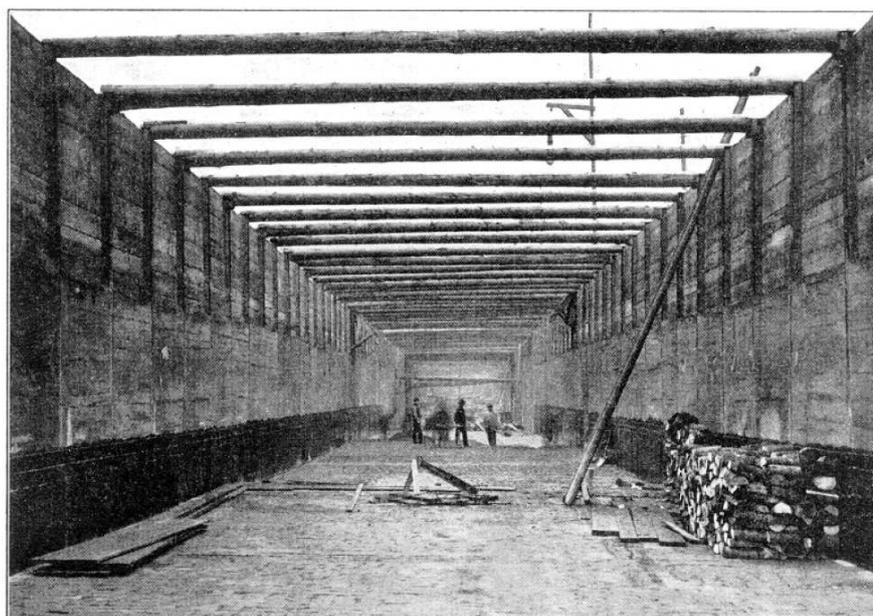
Estas estruturas cumpriam satisfatoriamente a sua função quando estavam reunidas, no essencial, as seguintes condições: i) maciços terrosos de razoável ou elevada resistência; ii) escavações não muito profundas; iii) inexistência de fundações diretas de edifícios na imediata vizinhança da face da escavação; iv) no caso de solos granulares, escavações acima do nível freático ou em circunstâncias em que o rebaixamento seja possível. Muitas das obras em causa corresponderam tipicamente a escavações *cut-and-cover* para linhas de metropolitano sob largas avenidas em muitas cidades da Europa e da América do Norte desde o dealbar do século XX até aos anos 50. Deve, todavia, notar-se que em algumas das obras apresentadas a segurança dos trabalhadores não estava de modo algum acautelada dentro das exigências atualmente consideradas imprescindíveis.

Quando aquelas três condições não se verificavam as dificuldades eram muito grandes. O recalce prévio dos edifícios mais próximos da escavação era por isso, nessa época, muito frequente.

Um método engenhoso para viabilizar as escavações em solos brandos minimizando os danos



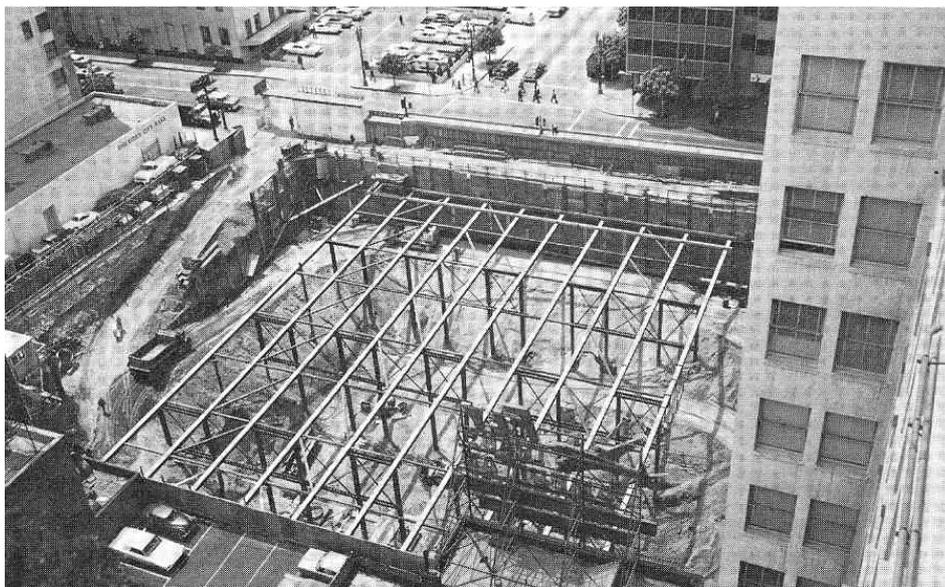
**Fig. 2** – Metro de Lisboa, praça do Rossio, 1960 (gentileza do Metropolitano de Lisboa).



**Fig. 3** – Metro de Berlim, 1908 (Wittig, 1908).

nos edifícios vizinhos é o designado *trench method*, desenvolvido em Chicago nos primeiros anos do século XX, período de rápida e profunda transformação da cidade. Este método foi aplicado pela primeira vez na construção das três caves do novo edifício sede do jornal Chicago Tribune, na Madison Avenue (Figura 5).

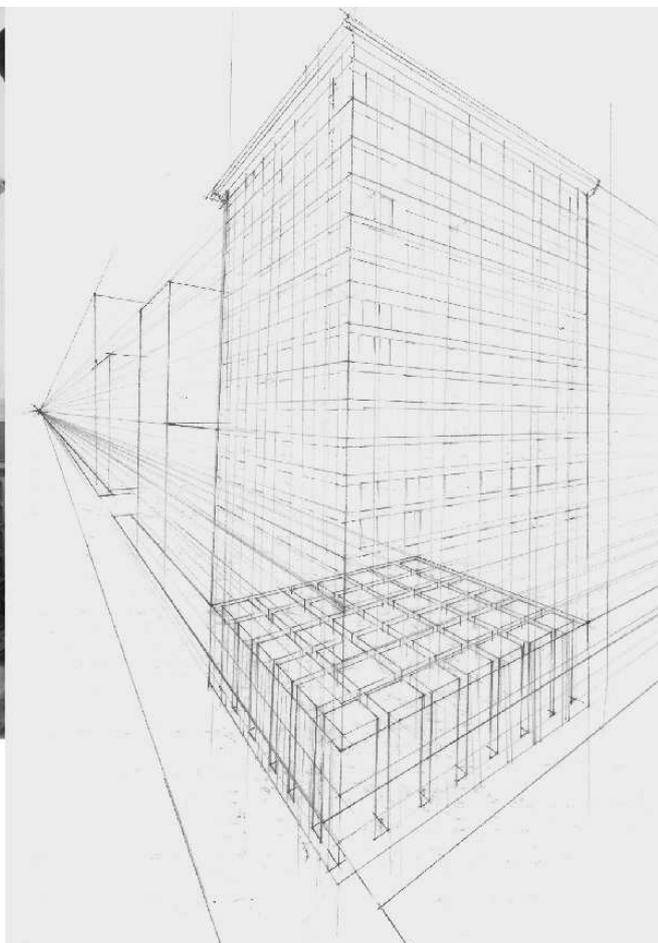
As caves eram necessárias para albergar a tipografia do jornal, para que a vibração das máquinas não afectasse o conforto no restante edifício (Randall, 1999). O método está esquematizado na Figura 6, e é descrito por Peck (1969) no seu famoso *State-of-the-Art Report* apresentado na



**Fig. 4** – Escavação escorada, cortina tipo Berlim com painéis de madeira, São Francisco, década de 1950.

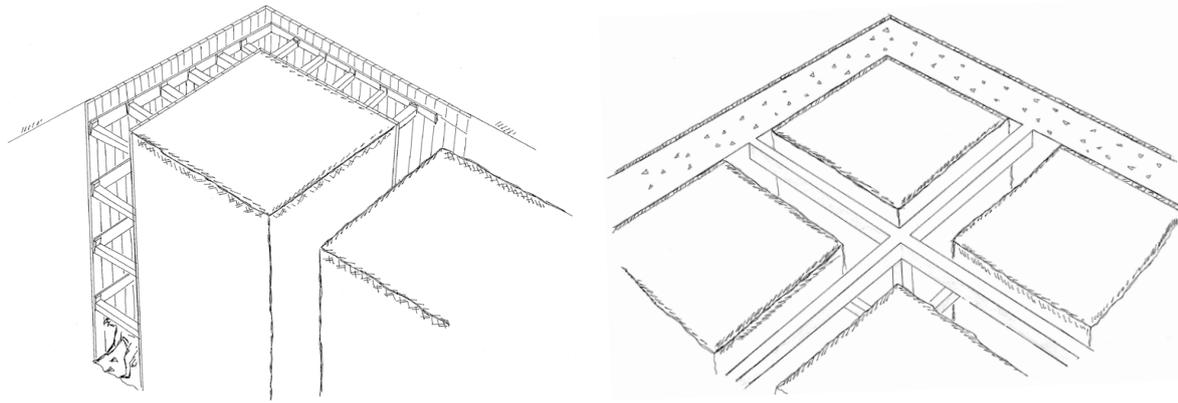


(a)



(b)

**Fig. 5** – Edifício Tribune, Madison Avenue, Chicago: a) fotografia em 1910; b) esquema do *trench method* aplicado na escavação para as três caves; desenho de Bárbara Rangel (Matos Fernandes, 2015).



**Fig. 6** – Duas fases do *trench method* usado na escavação dos três pisos enterrados do Edifício Tribune, Chicago, 1901; desenhos de Bárbara Rangel (Matos Fernandes, 2015).

conferência da ISSMFE, na Cidade do México:

“De acordo com este processo, era escavada uma vala, à mão, na periferia do edifício no local das paredes permanentes das caves. A largura da vala era tão pequena quanto fosse praticável. As superfícies laterais da vala eram suportadas por pranchas de madeira e por um grande número de escoras horizontais ligando um ao outro lado. As valas suportadas eram executadas até à profundidade final das paredes externas da estrutura. A armadura era então montada nas valas e o betão era colocado directamente contra o suporte, que funcionava como cofragem.

Em simultâneo com a construção da parede, eram escavadas valas transversais, habitualmente ao longo dos alinhamentos dos pilares e eram suportadas e escoradas de forma semelhante, até à mesma profundidade das paredes exteriores. Escoras de betão, mais tarde formando parte do piso mais profundo, eram então betonadas no fundo das valas. Os pilares eram executados na intersecção destas escoras (...). Deste modo, ficava definido um sistema completo de escoramento cruzado enquanto a maior parte do solo no interior das futuras caves estava ainda no local. Como passo final, o solo era escavado (...). Assim os assentamentos eram minimizados.”

É também interessante notar que no seu *state-of-the-art report* (fim da década de 1960) este era ainda o método recomendado por Peck como mais eficaz para escavações em solos brandos!

## 2.2 – As décadas de 60 e de 70

As décadas de 60 e de 70 marcam uma extraordinária viragem tecnológica e de contexto! Em termos de contexto, tendo sido um período de grande crescimento económico, nos países mais desenvolvidos as grandes escavações urbanas multiplicaram-se, agora não apenas para linhas de metro ou outras obras viárias, mas também para estacionamento automóvel em caves de novos edifícios ou sob espaços públicos. Estas escavações passaram, tipicamente, a ter maior largura e maior profundidade do que aquelas que eram destinadas a obras viárias.

No que respeita à tecnologia, a partir do fim da década de 60 passaram a ter generalizada aplicação dois avanços absolutamente brilhantes: i) as paredes de betão armado moldadas no terreno; ii) as ancoragens pré-esforçadas em solos.

Com a nova técnica das paredes moldadas no terreno, passou a ser possível instalar por completo uma parede de suporte periférica — de betão armado, com adequadas rigidez e resistência à flexão, impermeável, estendendo-se em profundidade para além da base da escavação, com descompressão

muito reduzida no terreno envolvente — antes da realização da escavação. Tal parede, servindo de contenção à escavação, é depois incorporada na estrutura resistente definitiva. Parece legítimo admitir que esta nova técnica terá em parte sido inspirada no chamado *trench method* atrás descrito.

As ancoragens pré-esforçadas em solos — executadas numa ampla gama de condições geotécnicas — usadas para apoio da cortina periférica, vieram libertar o interior da escavação dos severos constrangimentos físicos associados ao escoramento e ao respetivo sistema de contraventamento. A combinação destes dois importantes avanços tecnológicos, de que se mostra exemplo na Figura 7, contribuíram de forma relevantíssima para a generalização das grandes escavações urbanas nas décadas seguintes, fruto da redução do custo e do prazo de execução, bem como da redução do risco de danos induzidos nas estruturas vizinhas.



**Fig. 7** – Cortina de paredes moldadas ancorada, parque de estacionamento da Alameda D. Afonso Henriques, Lisboa, 1974, fotografia de A. Campião (gentileza de Teixeira Duarte, Lisboa).

A partir do momento em que foi possível construir a parede periférica pela técnica das paredes moldadas no terreno, parede essa que era incorporada na estrutura definitiva, aparece como natural a chamada solução *top-down*, apoiando a parede periférica durante a escavação nas lajes da estrutura definitiva enterrada, construídas de cima para baixo. Esta solução é conveniente, por exemplo, quando as condições geotécnicas ou outras restrições desaconselham o uso de ancoragens. De modo a facilitar a remoção das terras, numa primeira fase, é comum que as lajes não sejam betonadas em toda a sua área de implantação. O caso ilustrado na Figura 8 (da década de 90, apesar de o sistema ser usado desde os anos 70) é particularmente interessante sob o ponto de vista estrutural, com cada laje funcionando como um anel comprimido de apoio da parede periférica.

Voltando às ancoragens, importa referir que a sua aplicação não se limitou, de modo algum, às obras com cortinas formadas por paredes moldadas no terreno. Como ilustra a Figura 9, a combinação das tradicionais cortinas tipo Berlim, de perfis metálicos verticais e pranchas de madeira entre banzos, com ancoragens tornou-se solução natural, por exemplo para o suporte de valas com grande largura e com cortina de contenção de natureza provisória.

Naquele tipo de cortina, o uso de betão projetado (em geral combinado com malhasol) em alternativa às pranchas de madeira em certas condições (terrenos coesivos de boa resistência, obras relevantes) foi um passo natural.

Quando a escavação, total ou parcialmente, envolvia horizontes de materiais muito rijos, a aplicabilidade da técnica das paredes moldadas tornava-se problemática, dada a dificuldade de desmonte

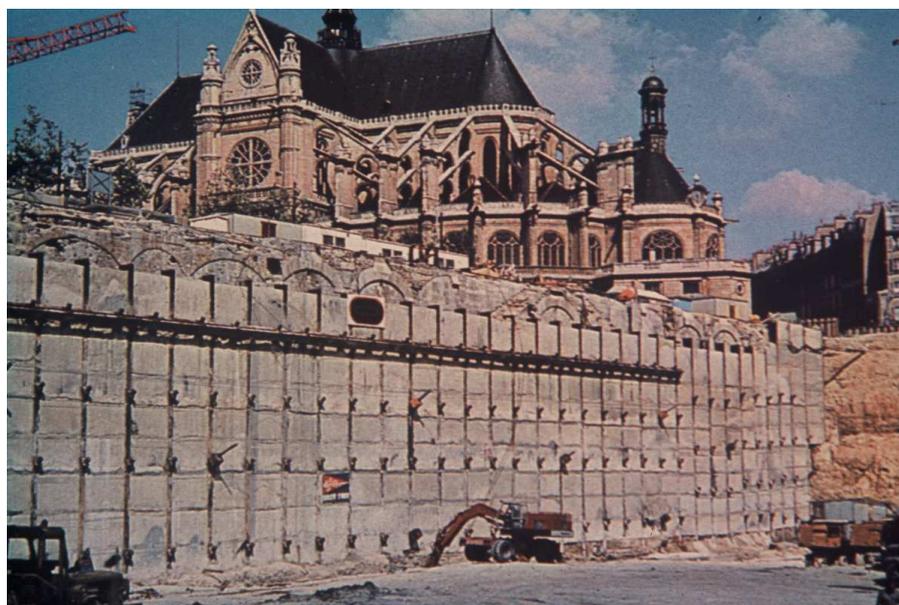


**Fig. 8** – Solução *top-down*, com as lajes da estrutura definitiva parcialmente betonadas, Coimbra, 1998 (gentileza de Teixeira Duarte, Lisboa).



**Fig. 9** – Cortina tipo Berlim ancorada, Estação Saldanha, Metropolitano de Lisboa, 1977 (gentileza de Teixeira Duarte, Lisboa).

do terreno pelos baldes de maxilas. Nessas circunstâncias, em grandes escavações e condições de elevada exigência de desempenho, aparece como solução conveniente a combinação de ancoragens pré-esforçadas, perfis metálicos verticais e painéis de betão armado, betonados contra o terreno, entre banzos dos perfis verticais, acompanhando o progresso da escavação. A Figura 10 mostra um caso notável com tal solução, no qual a parede resistente definitiva foi construída de forma tradicional, a partir do fundo da escavação, betonada contra a face da parede de contenção provisória que a figura ilustra.



**Fig. 10** – Cortina tipo Berlim ancorada, com painéis de betão armado, Forum des Halles, Paris, 1974 (Sif Bachy).

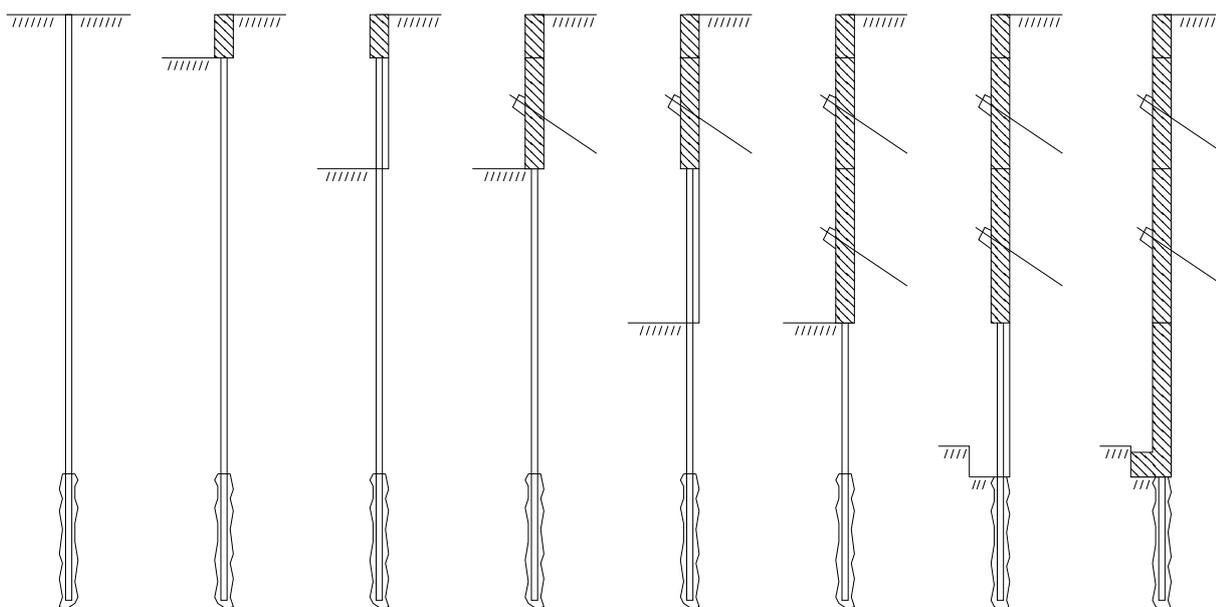
Compreende-se que em condições geotécnicas análogas à anterior (terrenos muito rijos que tornam menos viável o uso de paredes moldadas) tenha aparecido como solução economicamente competitiva fundir as paredes provisória e definitiva de betão armado numa só. Essa parede é construída por painéis de betão armado, de cima para baixo, apoiados nos (e envolvendo os) perfis metálicos. Surgiu assim o que é designado por cortina Berlim definitiva. A Figura 11 ilustra o processo construtivo de tais cortinas.

## **2.3 – As últimas duas décadas do século XX: a variedade de soluções**

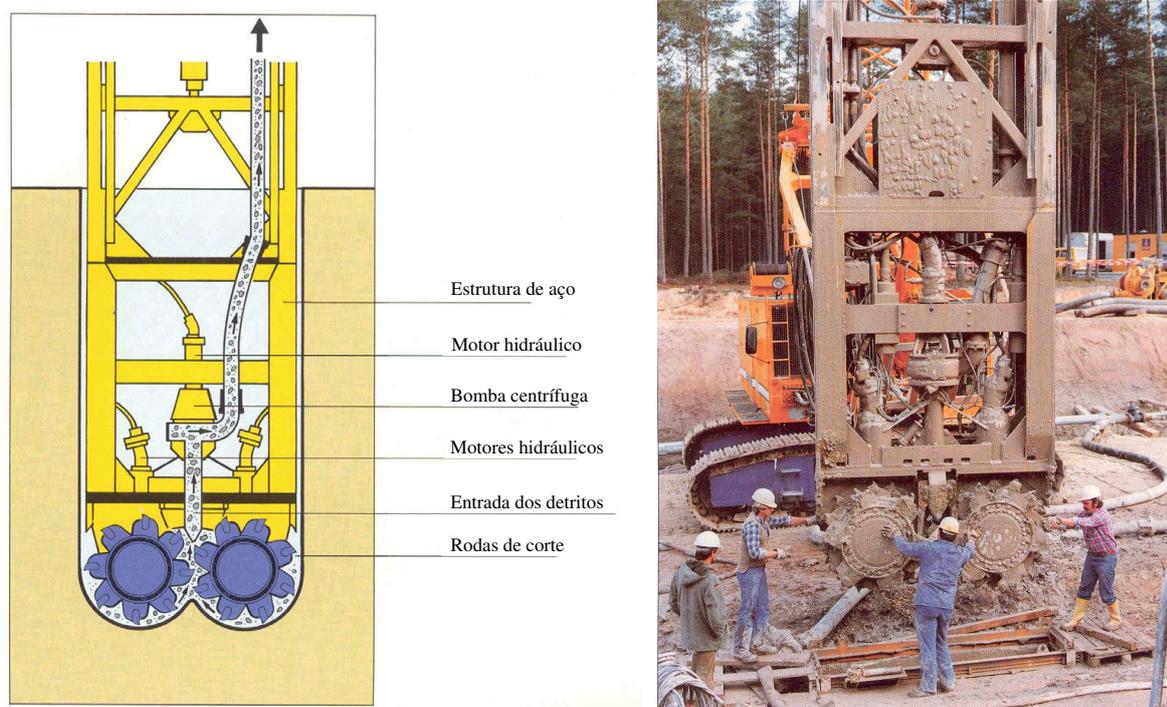
### **2.3.1 – Paredes moldadas executadas com hidrofresa**

A década de 1980 conheceu um importante desenvolvimento da técnica das paredes moldadas no terreno, que permitiu ultrapassar a limitação referida nos parágrafos anteriores.

Esse desenvolvimento consistiu essencialmente em proceder ao desmote do terreno por uma hidrofresa, de que se mostra imagens na Figura 12. Quando os detritos resultantes do desmote passam a ter dimensão suficientemente reduzida, são removidos por bombagem para a superfície juntamente com a lama estabilizadora; em simultâneo, volume similar de lama reciclada é vertida na vala a partir da superfície. A ferramenta em causa é suscetível de desmontar solos muito rijos e maciços rochosos. Para além disso assegura maior rigor na verticalidade da parede e juntas entre painéis praticamente impermeáveis.



**Fig. 11** – Sequência construtiva de uma cortina Berlim definitiva (Guerra, 1999).



**Fig. 12** – Execução de paredes moldadas com recurso a hidrofresa (BAUER Spezialtiefbau GmbH).

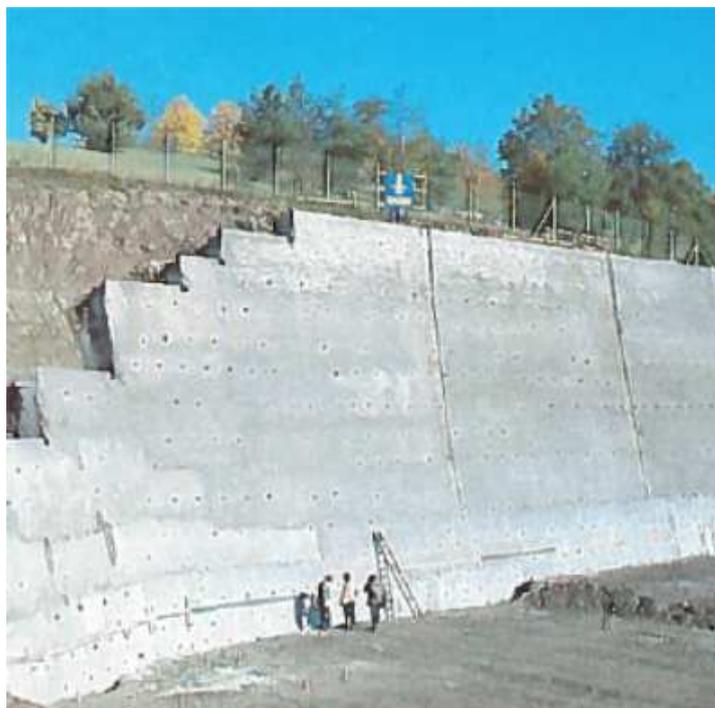
### 2.3.2 – Solo pregado

A década de 80 assistiu também à aplicação generalizada de uma técnica construtiva substancialmente distinta das anteriores: as escavações pregadas em solos.

O uso de pregagens para estabilização de maciços rochosos era já muito antiga. Pode dizer-se que a combinação dessa experiência, com o entendimento do comportamento dos solos reforçados com inclusões proveniente das estruturas de suporte de aterros armados (terra armada e similares), teve como fruto esta nova solução de escavações pregadas.

Esta solução torna-se mais atrativa para solos de resistência razoável e por vezes envolve a face

de escavação com uma pequena inclinação em relação à vertical. Nesta face as cabeças das pregagens estão ligadas a uma pele estrutural formada por malha eletrosoldada e betão projetado. A Figura 13 mostra imagem de uma obra executada com recurso a esta técnica.



**Fig. 13** – Imagem de escavação pregada, Stuttgart, 1980 (BAUER Spezialtiefbau GmbH).

### 2.3.3 – Paredes de estacas

O uso de cortinas de estacas “quase-tangentes” ou com espaçamento ao eixo superior ao respetivo diâmetro é relativamente antigo. (Note-se que estacas tangentes são muito difíceis de construir porque tal exigiria desvios nulos do seu eixo em relação à posição teórica, pelo menos no plano da cortina). Estas cortinas podem constituir uma solução muito conveniente para escavações profundas em terrenos sedimentares muito rijos, nos quais as cortinas de paredes moldadas convencionais enfrentam sérias dificuldades de execução. Também em cenários de formações graníticas, com solos residuais e rocha mais ou menos alterada com as mais diversas combinações em profundidade (e até blocos quasi-esféricos de rocha são envolvidos no solo residual), aquele tipo de cortina afigura-se particularmente conveniente, tendo em conta que a ferramenta de furação pode ser facilmente substituída durante a execução, adaptando-a às características do terreno atravessado em cada horizonte.

No tipo de cenários geotécnicos apontados (solos sedimentares rijos, formações graníticas com variável grau de alteração) a face da escavação entre estacas pode ser protegida por betão projetado ou pura e simplesmente não ter proteção, consoante a resistência do terreno e o espaçamento entre estacas. A Figura 14 mostra uma estrutura deste tipo.

A partir da última década do século passado, passaram a ter aplicação as cortinas de estacas secantes. Trata-se de cortinas de estacas com espaçamento ao eixo menor do que o respetivo diâmetro, formadas pelas chamadas estacas primárias, de betão simples, executadas em avanço, e as estacas secundárias, executadas em segunda fase, de betão armado. A ponderação da relação entre o espaçamento das estacas e o seu diâmetro tem a ver com a tolerância a respeito do desvio do seu eixo em relação à posição teórica. Naturalmente, pretende-se que desvios dentro da tolerância de projeto não impliquem aberturas entre estacas primárias e secundárias.



**Fig. 14** – Cortina de estacas de betão armado com espaçamento entre eixos superior ao respetivo diâmetro, *El Corte Inglés*, Lisboa, 1999 (gentileza de Teixeira Duarte, Lisboa).

Como se compreende, este último tipo de cortina apresenta todas as “capacidades” do anterior, mais as decorrentes de constituir uma cortina que fornece uma proteção estrutural integral e impermeável à face da escavação previamente à realização desta. Isso alarga a sua adequação a cenários geotécnicos muito distintos dos anteriores, como os solos argilosos muito moles ou os maciços que incluem estratos muito permeáveis, nível freático elevado e em que se torna imperioso manter durante a escavação as condições da água no maciço. A Figura 15 mostra uma estrutura deste tipo.



**Fig. 15** – Cortina de estacas secantes de betão simples e de betão armado, Aeroporto Francisco Sá Carneiro, Porto, 2001 (gentileza de Teixeira Duarte, Lisboa).

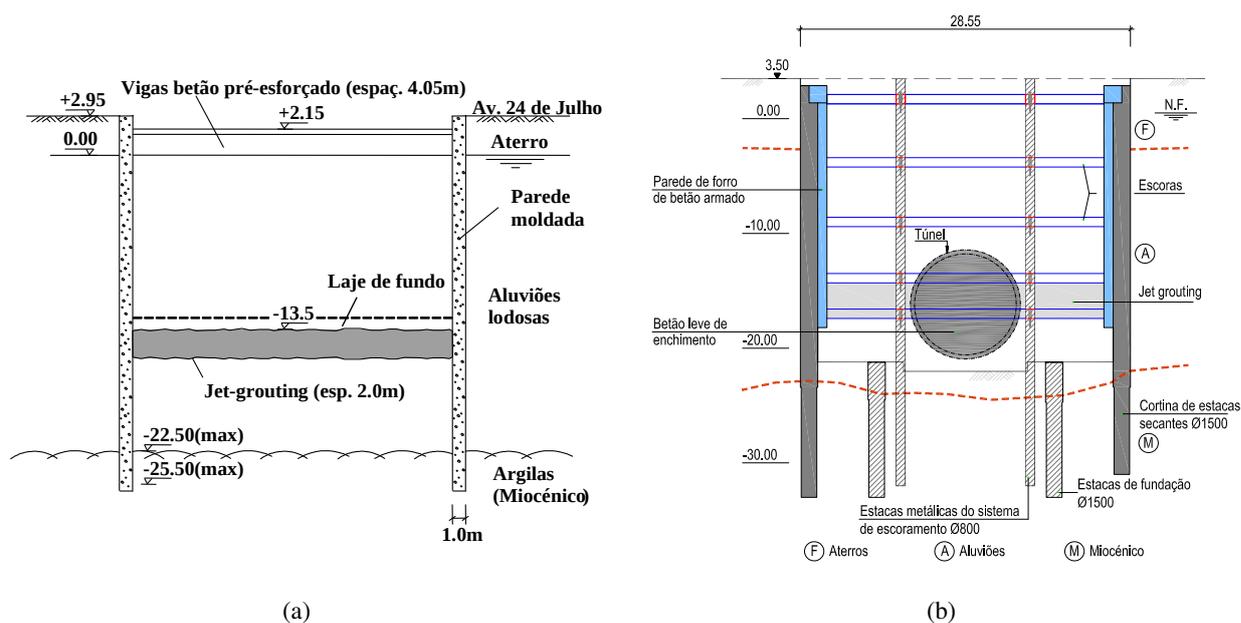
#### 2.3.4 – Tratamento de solos moles

Nos cenários geotécnicos mais adversos, as escavações em espessos depósitos de solos argilosos moles, desde cedo se concluiu ser altamente conveniente estender o pé da cortina até ao primeiro estrato firme subjacente. Em complemento, o tratamento do terreno imediatamente sob a base da

escavação torna-se conveniente para controlar os movimentos da parte enterrada da cortina e os importantes esforços que nesta tendem a ser mobilizados.

Desde pelo menos a década de 1990 que diversas técnicas de tratamento (*jet-grouting*, *compaction grouting*, *deep soil mixing*) têm sido aplicadas para formar elementos de solo tratado entre as cortinas periféricas com diversas geometrias (colunas discretas em malha quadrada, elementos laminares horizontais ou “lajes” e elementos laminares verticais ou “contrafortes”).

Nos caso das chamadas “lajes” de solo tratado, em escavações cuja base se aproxima ou atinge mesmo o estrato firme inferior, cedo se concluiu que a posição ótima do horizonte a tratar seria acima da base da escavação final, sendo assim o solo tratado removido juntamente com o restante no decurso da escavação. As Figuras 16(a) e (b) ilustram duas situações de escavações profundas em solos moles com “lajes” de *jet-grout*, respetivamente, abaixo e acima da base da escavação final.



**Fig. 16** – Escavação em solo mole com laje de *jet-grout*: (a) abaixo da base da escavação — Estação Cais do Sodré, Metropolitano de Lisboa, 1994 (Matos Fernandes et al., 2007); (b) acima da base da escavação — Estação Terreiro do Paço, Metropolitano de Lisboa, 2003 (Matos Fernandes, 2010).

## 2.4 – Novo século: soluções novas com ferramentas antigas

### 2.4.1 – Poços elípticos construídos pelo método sequencial escavação-betonagem

Neste encadeamento de soluções construtivas, em que novas soluções estruturais estão em regra associadas ao desenvolvimento de novas tecnologias de execução, aparece no virar do século uma inovadora solução estrutural que escapa a esta regra: os poços elípticos construídos pelo método sequencial. Com efeito, adaptando a escavações de eixo vertical a tradicional metodologia de construção de túneis em terrenos competentes — sequência alternada de fases de escavação e de aplicação de betão projetado com armadura — passaram a ser executados poços profundos de forma circular ou elíptica, de grande secção em planta, como mostra a Figura 17.

Podem dizer-se que a técnica construtiva é análoga à abordada na secção 2.3.2, mas com omissão das pregagens, tirando partido da forma anelar em planta da escavação. Num poço de planta circular, cada anel do revestimento está sujeito a esforços puramente axiais (compressão simples). Quanto mais a forma em planta se afasta da circular, mais elevados tendem a ser os esforços de flexão e corte, requerendo assim maior secção de betão e maior taxa de armadura no revestimento.



**Fig. 17** – Poço elíptico construído pelo método sequencial de escavação-betonagem, Estação do Marquês de Pombal, Metropolitano do Porto, 2003 (gentileza da Metro do Porto).

Esta tecnologia, desenvolvida pela Engenharia Brasileira, tem sido aplicada com sucesso para a construção de estações de metro em maciços de solos residuais e maciços de solos sedimentares rijos.

Como tais estações têm em geral desenvolvimento bastante superior à largura, a forma alongada em planta que é necessária para as acomodar pode ser conseguida por meio da intersecção de dois ou mais poços, como mostra a Figura 18. Neste caso, a truncagem dos anéis elípticos no plano em que os mesmos se intersectam requer que os esforços na cortina periférica sejam equilibrados naquele plano por um pórtico formado por duas estacas de grande diâmetro, instaladas previamente à escavação nos pontos comuns às duas elipses, e por um ou mais níveis de vigas horizontais, executadas acompanhando o progresso da escavação.

#### 2.4.2 – Escavação envolvendo totalmente um maciço terroso

Em todos os casos anteriores o contexto era o de pensar uma escavação suportando o maciço terroso envolvente. Mais raro, mas particularmente interessante, é o caso em que a escavação envolve totalmente um maciço, como é o caso da Figura 19a (Pinto et al., 2001).

A escavação, com 25 m de profundidade, foi executada na área dos jardins que rodeavam o edifício, sendo o seu limite interior adjacente às paredes periféricas do mesmo e o limite exterior definido pelos arruamentos vizinhos. O solo era composto por solos argilosos marinhos, do Miocénico.

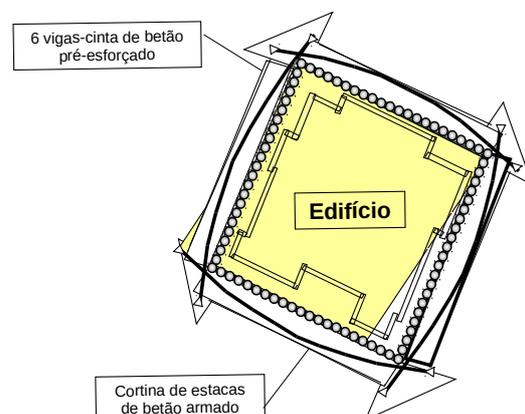
A estrutura de suporte da escavação em redor do edifício foi concebida como a de um barril, conforme sugerido pela Figura 19b. Os elementos verticais são estacas moldadas de betão armado, ligadas no topo às paredes de alvenaria do edifício através de uma viga de coroamento. As estacas foram suportadas por seis níveis de vigas horizontais de betão pré-esforçado projectadas para equilibrar as pressões de terras internas. Estas vigas foram betonadas contra o terreno e as suas cotas foram escolhidas por forma a permitir a sua incorporação nas lajes das caves. As vigas foram suportadas verticalmente próximo do seu limite exterior por um conjunto de perfis metálicos inseridos no terreno antes da escavação.



**Fig. 18** – Duplo poço elíptico construído pelo método sequencial de escavação-betonagem, Estação Salgueiros, Metropolitano do Porto, 2004 (Topa Gomes et al., 2008).



(a)



(b)

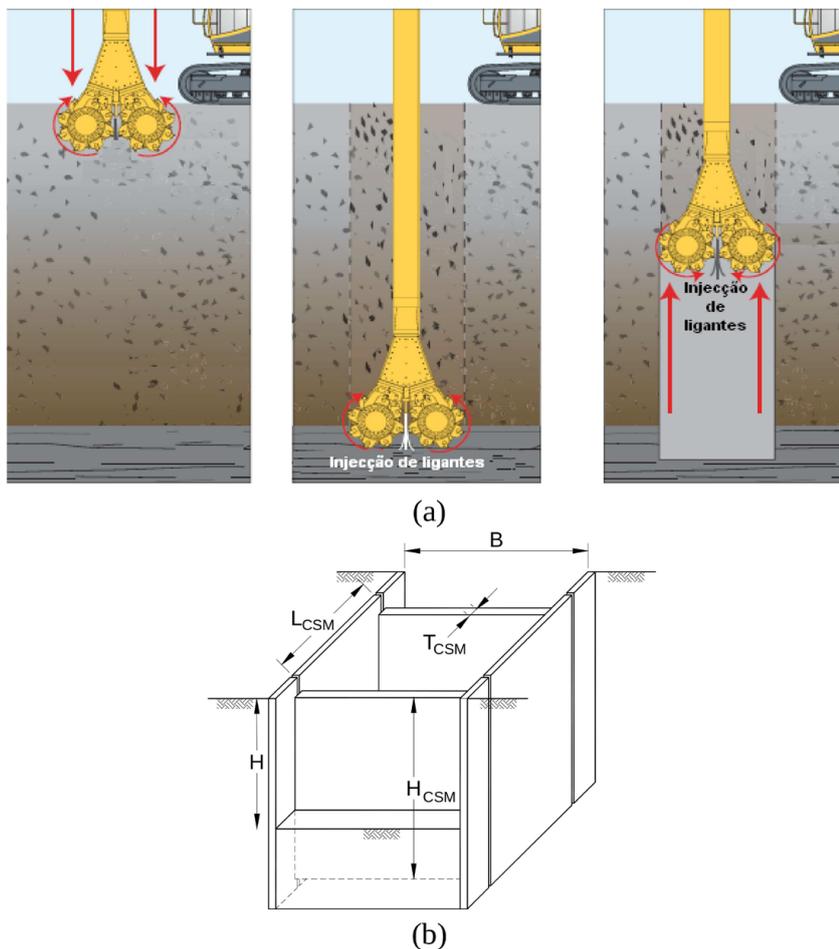
**Fig. 19** – Escavação em redor do Palácio Sotto Mayor, Lisboa, 2000 (Pinto et al., 2001).

#### 2.4.3 – Contrafortes de solo tratado por CSM e *cross walls* executadas com a técnica das paredes moldadas

O tratamento do maciço mencionado em 2.3.4 tem por base a ideia de fornecer apoio à parede previamente à escavação, criando zonas do maciço de elevada rigidez entre as paredes periféricas.

Isto é particularmente recomendável para controlar os movimentos destas paredes em condições muito exigentes, como é o caso das escavações em espessos depósitos de solos argilosos moles.

Enquanto o *jet-grouting* parece estar mais vocacionado para a construção de “lajes” de solo tratado (ver Figura 16), o mais recente método designado por *cutter-soil-mixing* (CSM), pelo equipamento que envolve, inspirado nas hidrofresas das paredes moldadas, afigura-se mais apropriado para a construção de elementos laminares verticais que funcionam como contrafortes (Figura 20a).



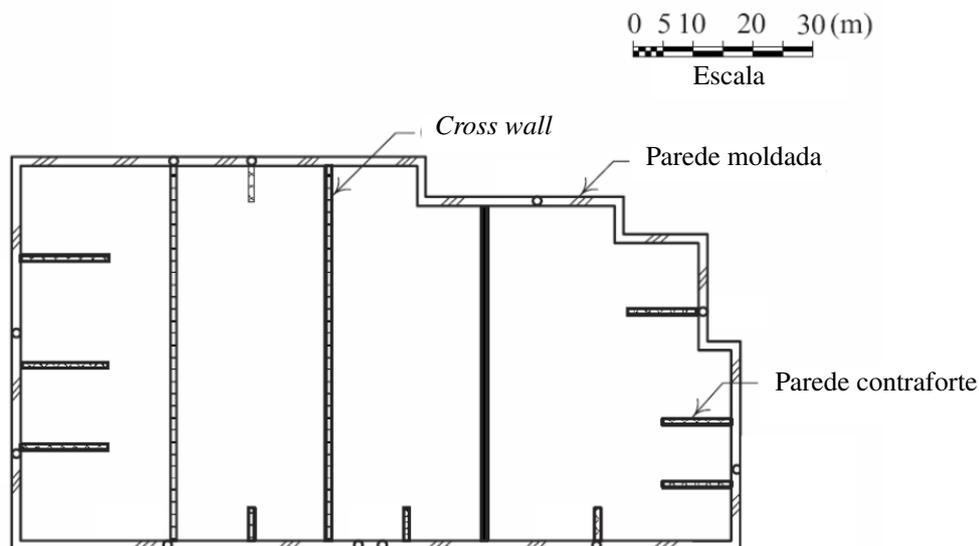
**Fig. 20** – Cutter-soil-mixing: a) sequência de execução (www.golder.ca); b) contrafortes de solo tratado entre paredes periféricas (Matos Fernandes, 2015).

O CSM tem algumas importantes vantagens em relação aos métodos de tratamento precedentes, nomeadamente o rigor da geometria e da posição do solo tratado, bem como o facto de não envolver nem a descompressão nem a sobrecompressão do terreno envolvente.

Em escavações destinadas a obras viárias, de largura não elevada, o tratamento entre paredes periféricas aparece como atrativo, como sugere a Figura 20b. Estes contrafortes podem ser instalados com alturas diversas, isto é, mantendo-se subjacentes à base da escavação final ou prolongando-se acima desta, bem como com diversos espaçamentos longitudinais.

Dentro da mesma perspetiva, como ilustra a Figura 21, podem ser entendidas as chamadas *cross walls*, construídas, tal como as paredes periféricas, pela técnica das paredes moldadas no terreno. Aquelas paredes, que têm sido aplicadas em Taipei, Taiwan, são construídas até à superfície, sendo preenchidas com betão simples (sem armadura) acima da base da escavação (Ou et al., 2006; Hsieh et al., 2008; Wu et al., 2013).

No exemplo pioneiro da figura, pode observar-se que a filosofia de suporte é, até certo ponto,



**Fig. 21** – Escavação em solo mole com lajes de jet grout acima e abaixo da base da escavação, Taiwan (Ou et al., 2006, 2011, com permissão da ASCE/*with permission from ASCE*).

distinta da dos trabalhos previamente descritos, nos quais o comprimento da escavação é muito maior do que a sua largura. De facto, o uso de *cross walls* subdivide a escavação larga (largura e comprimento com a mesma ordem de grandeza) em escavações mais estreitas. Deste modo, a eficácia do controlo dos movimentos provém principalmente do chamado efeito de canto (efeito tridimensional), que reduz os deslocamentos nos cantos côncavos das escavações. Naturalmente que esse efeito será potenciado se a escavação e a construção da estrutura enterrada permanente forem executadas, em cada área elementar, de forma desfasada no tempo.

Importa notar que a ideia das *cross walls* (neste caso abaixo da base da escavação final) tinha sido já aplicada com sucesso no Metro de Oslo (Eide et al., 1972) na década de 1970, a que se seguiram outras aplicações nos países escandinavos.

#### 2.4.4 – Escoras pré-esforçadas

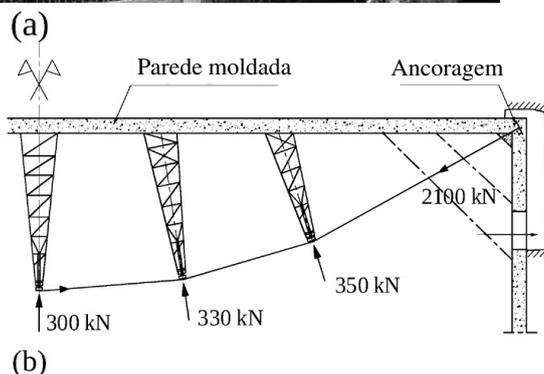
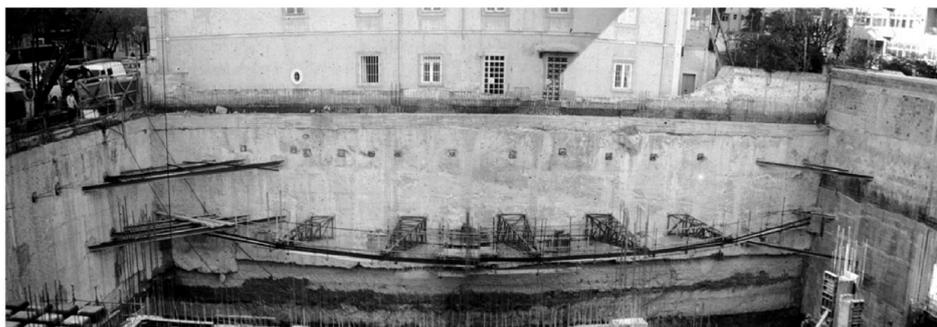
Em escavações de grande largura em condições que não permitem a construção de ancoragens, o escoramento convencional entre paredes paralelas torna-se oneroso, devido à estrutura de contra-ventamento que passa a ser indispensável (ver, a propósito, a Figura 4).

Relevante avanço neste domínio são estruturas como as representadas nas Figuras 22 e 23. Trata-se de estruturas dispostas no plano horizontal, compostas por um arco-funcular pré-esforçado de aço e escoras (dir-se-ia “escoras voadoras”!) que apoiam a cortina. Os esforços nos dois extremos do arco-funcular são absorvidos: i) pelas duas paredes periféricas em cada um dos cunhais que limitam a face suportada (caso da Figura 22); ii) por um sistema composto por uma viga horizontal chumbada à parede e por escoras convencionais nos extremos daquela viga (estas escoras estão apoiadas na parede paralela ou na parede perpendicular, casos das Figuras 22 e 23, respetivamente).

### 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NO CONTEXTO GEOTÉCNICO

No fim deste fascinante itinerário de técnicas e soluções construtivas pareceu aos autores que seria útil apresentar uma opinião sobre a adequabilidade das mesmas para cinco cenários geotécnicos simplificados:

- Cenário 1: maciço sedimentar formado essencialmente por solos arenosos abaixo do nível



**Fig. 22** – Sistema de contenção escoras-arco atirantado pré-esforçado, Lisboa, 1982: a) imagem geral; b) esquema estrutural (Matos Fernandes e Xavier, 2011).



**Fig. 23** – Imagem de escavação com o sistema de contenção escoras-arco atirantado pré-esforçado, Coreia do Sul (Park et al., 2009, com permissão da ASCE/*with permission from ASCE*).

freático;

- Cenário 2: maciço sedimentar formado essencialmente por solos arenosos acima do nível freático;
- Cenário 3: espesso depósito de solos argilosos de baixa resistência;

- Cenário 4: maciço sedimentar formado essencialmente por solos argilosos de elevada resistência;
- Cenário 5: maciço de formações graníticas com horizontes de solos residuais e de rocha alterada.

Para cada um destes cinco cenários, apontou-se quais as técnicas e soluções construtivas apresentadas (com exceção das do ponto 2.1, por motivos óbvios) que deveriam, à partida, ser rejeitadas — designadas como “Não Recomendáveis”. Essas técnicas estão indicadas no Quadro 2 com “NR”, justificando-se tal indicação através de breves comentários.

**Quadro 2** – Classificação das soluções do Quadro 1 em relação à sua viabilidade, potencial para controlo de deslocamentos e custo, para diferentes cenários geotécnicos

Casos em que a solução não é recomendada: NR

Grau de viabilidade: Simples, Normal e Difícil (S, N, D)

Potencial para controlo de deslocamentos: Bom, Variável, Mau (B, V, M)

Custo: Elevado, Médio, Baixo (E, M, B)

Técnicas construtivas	Areias submersas	Areias acima do nível freático	Depósitos espessos de argilas moles	Argilas rijas ou duras	Solos residuais/formações graníticas
Paredes tipo Berlim (com pranchas de madeira), escoradas	NR <sup>1</sup>	N/V/B	NR <sup>2</sup>	S/V/B	S/V/B
Ancoragens	D/B/M	N/B/M	NR <sup>3</sup>	N/V/M	S/B/M
Paredes tipo Berlim (com pranchas de madeira), ancoradas	NR <sup>1</sup>	N/M/B	NR <sup>2,3</sup>	N/V/M	S/B/M
Paredes moldadas executadas com <i>clamshell</i> , escoradas	S/B/M	S/B/M	S/V/M	S/B/M	NR <sup>4</sup>
Paredes moldadas executadas com <i>clamshell</i> , ancoradas	S/B/M	S/B/M	NR <sup>3</sup>	S/V/M	NR <sup>4</sup>
Paredes suportadas pelas lajes da estrutura permanente (solução <i>top-down</i> )	N/B/M	N/B/M	N/V/M	N/B/M	NR <sup>4</sup>
Paredes tipo Berlim definitivas (com painéis de betão armado), escoradas	NR <sup>1</sup>	D/M/B	NR <sup>2</sup>	S/V/B	S/V/B
Paredes tipo Berlim definitivas (com painéis de betão armado), ancoradas	NR <sup>1</sup>	D/M/B	NR <sup>2,3</sup>	S/V/B	S/V/B
Paredes moldadas executadas com hidrofresa, escoradas	S/B/E	S/B/E	S/V/E	S/B/E	S/B/E
Paredes moldadas executadas com hidrofresa, ancoradas	S/B/E	S/B/E	NR <sup>3</sup>	S/V/E	S/B/E
Paredes de estacas tangentes ou espaçadas, escoradas	NR <sup>1</sup>	S/V/M	NR <sup>2</sup>	S/B/M	S/B/M
Paredes de estacas tangentes ou espaçadas, ancoradas	NR <sup>1</sup>	S/V/M	NR <sup>2,3</sup>	S/V/M	S/B/M
Paredes de estacas secantes, escoradas	S/B/E	S/B/E	S/V/E	S/B/E	S/B/E
Paredes de estacas secantes, ancoradas	S/B/E	S/B/E	NR <sup>3</sup>	S/V/E	S/B/E
Pregagens em solos	NR <sup>1</sup>	D/V/B	NR <sup>2</sup>	S/V/B	S/V/B
Tratamento do terreno ( <i>jet-grouting, cutter-soil-mixing, cross walls, etc.</i> )	S/B/E	S/B/E	N/B/E	NR <sup>5</sup>	NR <sup>5</sup>
Poços elípticos construídos com o método sequencial de escavação-betonagem	NR <sup>1</sup>	S/B/M	NR <sup>2</sup>	S/B/M	S/B/M

<sup>1</sup> Este tipo de cortina não assegura a cobertura integral da face do corte antes da escavação, pelo que são previsíveis instabilizações, descida do nível freático no exterior e erosão do solo suportado.

<sup>2</sup> A capacidade resistente da estrutura é inadequada, sendo previsíveis grandes deformações e rotura do maciço suportado.

<sup>3</sup> Em solos argilosos moles e médios não são exequíveis ancoragens.

<sup>4</sup> O equipamento de escavação para a execução dos painéis de parede moldada não tem capacidade de desmonte da rocha alterada ou de blocos de rocha alterados no interior dos horizontes de solo residual; a grande heterogeneidade típica destes maciços agrava o problema.

<sup>5</sup> Neste tipo de maciços de apreciável resistência, o melhoramento do maciço dificilmente será opção competitiva.

Em seguida, para as soluções consideradas possíveis, atribuiu-se a classificação a respeito dos seguintes três aspetos:

- Grau de viabilidade (S, N, D): Simples, Normal, Difícil.
- Potencial para controlo de deslocamentos (B, V, M): Bom, Variável, Mau.
- Custo esperado (E, M, B): Elevado, Médio, Baixo.

O resultado deste exercício classificativo, desenvolvido pelos autores, está igualmente apresentado no Quadro 2. Naturalmente, as classificações atribuídas não são objetivas e algumas serão provavelmente controversas. Sublinha-se, a propósito, que as classificações se referem estritamente a grandes escavações em meio urbano.

#### **4 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS SOB O PONTO DE VISTA ESTRUTURAL**

As soluções disponíveis envolvem um elevado número de sistemas estruturais e de problemas de interacção solo-estrutura. Para uma tentativa de classificação será útil distinguir entre os sistemas usados no suporte de escavações cujo comprimento é muito elevado, podendo ser admitidas condições de estado plano de deformação, e os casos em que, havendo dimensões longitudinal e transversal semelhantes, se tira partido do carácter tridimensional da geometria do problema.

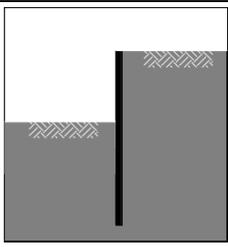
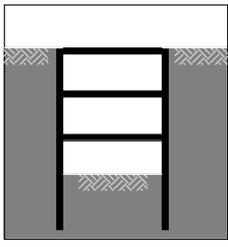
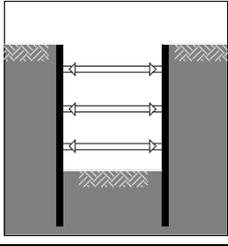
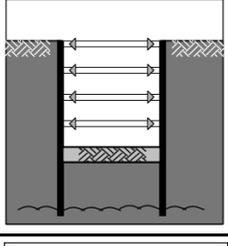
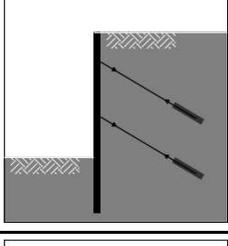
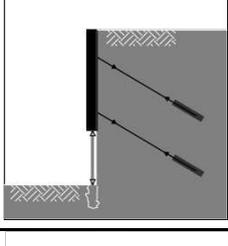
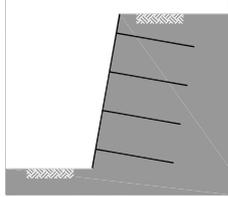
No Quadro 3 estão representados os sistemas bidimensionais, segundo uma secção transversal, e no Quadro 4 mostram-se os sistemas tridimensionais, segundo um corte por um plano horizontal. A ordem de apresentação em cada quadro corresponde, de certa forma, à complexidade crescente na interacção solo-estrutura e a ordem de designação de cada tipo de carregamento reflecte a importância relativa para cada tipo de estrutura.

É interessante observar que o tipo de representação adoptada está tacitamente relacionado com o modelo mental de como as estruturas funcionam. De facto, para as estruturas do Quadro 3 o principal modo de funcionamento desenvolve-se em planos verticais, ao passo que os efeitos das acções nos planos horizontais são nulos ou correspondentes a flexão simples (em resultado da natureza discreta dos apoios fornecidos pelas escoras ou pelas ancoragens). Pelo contrário, para as estruturas do Quadro 4 a interacção solo-estrutura e os efeitos das acções são claramente mais complexos no plano horizontal, sendo os do plano vertical de flexão simples.

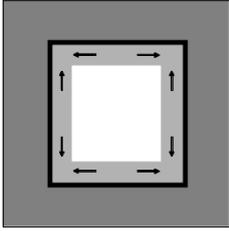
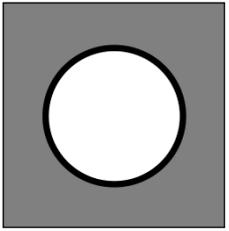
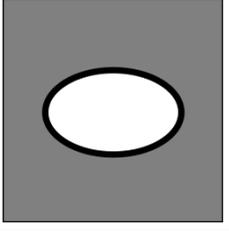
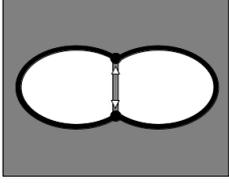
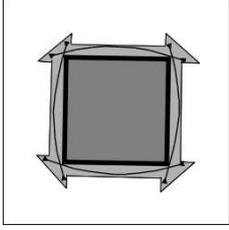
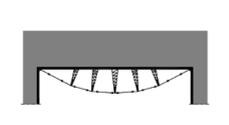
Surge um outro ponto curioso quando se consideram os sistemas estruturais do Quadro 4. De facto, para estes casos, as condições para o desenvolvimento de efeito de arco no solo são as ideais, o que torna claro que, em última instância, é o solo que suporta o solo, sendo o papel da estrutura o de auxiliar a massa de solo a adaptar-se às novas condições de equilíbrio induzidas pela escavação. Assim, para condições geotécnicas e desempenho comparáveis, os sistemas estruturais do Quadro 4 requerem menor quantidade de material estrutural do que os do Quadro 3. Não obstante, para estes últimos, a afirmação de que é o solo que, em última instância, suporta o solo, ainda se aplica, explorando a simetria do carregamento, como em estruturas de suporte multi-escoradas, ou transmitindo os impulsos do terreno suportado para zonas auto-estáveis do maciço, como em estruturas de suporte multi-ancoradas e (ou) prolongando a parede para além do fundo da escavação.

A variedade dos sistemas estruturais acima identificados mostra como este domínio tem sido um permanente desafio para os Engenheiros, requerendo uma combinação bem equilibrada de sensibilidade e especialização geotécnica e estrutural. A compreensão do comportamento desses sistemas estruturais complexos, cuja configuração evolui com o avanço da construção e cuja deformação influencia fortemente a magnitude e a distribuição das pressões de terra e das tensões e deslocamentos estruturais, foi consideravelmente desenvolvida, a partir do final da década de 1970, pelo uso de modelos de elementos finitos. Na verdade, a experiência e os contributos obtidos dos estudos com

**Quadro 3** – Estruturas de suporte de escavações correspondentes a sistemas estruturais bidimensionais

Tipo de estrutura	Principal tipo de esforço estrutural			
	Parede		Apoios	
	Plano vertical	Plano horizontal		
	Autoportante	Flexão	—	—
	Parede suportada por lajes da estrutura definitiva	Flexão e compressão	—	Compressão e flexão
	Parede escorada	Flexão	Flexão	Compressão e flexão
	Parede escorada e tratamento com <i>jet-grout</i> abaixo do fundo da escavação	Flexão	Flexão	Compressão e flexão
	Parede ancorada	Flexão	Flexão	Tracção
	Parede tipo Berlim definitiva	Flexão e compressão (painéis de betão armado) Compressão (perfis verticais)	Flexão	Tracção
	Escavação pregada	Punçoamento e flexão (secundária)	Punçoamento e flexão (secundária)	Tracção

**Quadro 4** – Estruturas de suporte de escavações correspondentes a sistemas estruturais tridimensionais

Tipo de estrutura	Principal tipo de esforço estrutural			
	Parede		Apoios	
	Plano vertical	Plano horizontal		
	Parede suportada pelas lajes da estrutura permanente	Flexão e compressão	Flexão	Flexão e compressão
	Poço cilíndrico	Compressão	Flexão	—
	Poço elíptico executado pelo método sequencial escavação-betonagem	Compressão e flexão	Flexão	—
	Duplo poço elíptico com escora central executado pelo método sequencial escavação-betonagem	Compressão e flexão	Flexão	Compressão e flexão
	Estrutura tipo barril	Flexão e compressão	Flexão	Flexão e tracção
	Arco interno pré-esforçado ligado a escoras 'voadoras'	Flexão e compressão	Flexão	Compressão (escoras) e tracção (cabo)

esses modelos influenciaram de forma progressiva e extensiva as soluções aplicadas, mesmo nos casos em que o projeto era, aparentemente, baseado apenas em métodos convencionais. Esses casos correspondiam à grande maioria até poucos anos atrás.

## 5 – CONCLUSÕES

Nas últimas décadas, sobretudo a partir de meados do século XX, grandes escavações profundas para caves e infraestruturas de transporte — executadas em condições cada vez mais ousadas e exigentes — tornaram-se habituais nas zonas urbanas.

Antes da década de 1960, este tipo de construção era caracterizado por soluções que empregavam técnicas muito primitivas e limitadas. Atualmente, é caracterizada pelo uso de tecnologias avançadas e diversificadas e por operações de construção e componentes estruturais cuidadosamente projetadas e detalhadas.

Em 50 anos — o que não é um período longo, correspondendo à duração de uma vida profissional — a evolução das escavações profundas em meio urbano tem sido notável. Agora realizamos escavações que há algumas décadas seriam inimagináveis ou envolveriam custos, tempo de construção e danos inaceitáveis nas estruturas vizinhas.

O enorme progresso alcançado neste tipo de obras tem sido possível através de uma exploração engenhosa e combinação dos avanços em três áreas principais: tecnologias de construção, concepção das estruturas de contenção e métodos de análise.

O que é fascinante no campo das escavações urbanas profundas é que permite grandes oportunidades para o cultivo do Engenho, naquele sentido profundo que deu origem ao nome da nossa Profissão!

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Eide, O., Aas, G., e Josang, T. (1972). *Special application of cast-in-place walls for tunnels in soft clay in oslo*. Em Proceedings of 5th European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, volume 1, pp. 485–498, Madrid.
- Guerra, N. M. C. (1999). *Mecanismo de colapso de cortinas de contenção tipo Berlim por perda de equilíbrio vertical*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Hsieh, H., Wang, C., e Ou, C. (2008). *Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 3(2), pp. 55–60.
- Matos Fernandes, M. (2010). *Deep urban excavations in portugal: practice, design, research and perspectives*. Soils and Rocks, 33(3), pp. 115–142. Lição Manuel Rocha.
- Matos Fernandes, M. (2015). *New developments in the control and prediction of the movements induced by deep excavations in soft soils*. Soils and Rocks, 38(3), pp. 191–215. Lição Pacheco Silva.
- Matos Fernandes, M., Maranha das Neves, E., Salgado, F., Caldeira, L., Pina, R., Flor, A., Brito, J., e Tavares, A. (2007). *Jet grouting solutions for cut-and-cover subway metro stations in Lisbon downtown*. Em Proceedings of 14th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, volume 2, pp. 895–900, Madrid.
- Matos Fernandes, M. e Xavier, B. (2011). *Discussion on 'New earth retention system with prestressed wales in an urban excavation' by Jong-Sik Park, Yong-Sun Joo and Nak-Kyung Kim*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(5), pp. 555–556.
- Ou, C., Hsieh, P., e Lin, Y. (2011). *Performance of excavations with cross walls*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(1), pp. 94–104.
- Ou, C., Lin, Y., e Hsieh, P. (2006). *Case record of an excavation with cross walls and buttress walls*. Journal of GeoEngineering, 1(2), pp. 79–86.

- Park, J.-S., Joo, Y.-S., e Kim, N.-K. (2009). *New earth retention system with prestressed wales in an urban excavation*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(11), pp. 1596–1604.
- Peck, R. B. (1969). *Deep excavations and tunneling in soft ground*. Em Proceedings of 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, volume state-of-the-art, pp. 225–290.
- Pinto, A., Ferreira, S., Barros, V., Costa, R., Lopes, P., e Dias, J. (2001). *Sotto Mayor Palace – design and performance of a deep excavation*. Em Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, volume 2, pp. 1237–1240, Istambul.
- Randall, F. (1999). *History of the development of building construction in Chicago*. University of Illinois Press, Champaign.
- Topa Gomes, A., Cardoso, A., Almeida e Sousa, J., Andrade, J., e Campanhã, C. (2008). *Design and behavior of Salgueiros Station for Porto Metro*. Em 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington. Missouri University of Science and Technology.
- Wittig, P. (1908). *Zur Eröffnung der Untergrundbahn nach Westend. Überblick über Vorgeschichte und Bauausführung der Bahn*. Hochbahngesellschaft. Em alemão.
- Wittke, W. (1997). *Heritage lecture: state of the art and development of geotechnical engineering in Germany*. Em Proceedings of 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, volume 4, pp. 2075–2095, Hamburg.
- Wu, S., Ching, J., e Ou, C. (2013). *Predicting wall displacements for excavations with cross walls in soft clay*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(6), pp. 914–927.