

PALÁCIO SOTTO MAYOR - CONCEPÇÃO E COMPORTAMENTO DE UMA ESCAVAÇÃO PROFUNDA

Sotto Mayor Palace – design and performance of a deep excavation

Alexandre Pinto¹
Sandra Ferreira²
Pedro Lopes³
João Dias⁴
Rita Costa⁵
Frederico Almeida⁶

RESUMO - O presente artigo tem como objectivo a descrição dos principais critérios de concepção e execução considerados na definição de soluções de contenção e recalçamento, projectadas e executadas no âmbito da obra do Centro Empresarial Palácio Sotto Mayor, a qual teve lugar em Lisboa. Destaca-se em particular a análise do comportamento do Palácio durante os trabalhos de escavação. Os principais objectivos da intervenção prenderam-se com a execução de uma escavação em formações miocénicas para a construção de oito pisos enterrados e com o recalçamento do edifício do Palácio, localizado no interior do recinto de escavação.

SYNOPSIS - The aim of this paper is to present the main design and construction criteria considered in the definition of the earth retaining and underpinning solutions adopted at the Sotto Mayor Palace deep excavation works, as well as their performance during the different construction phases. The main purpose of this 150,000m³ excavation, mainly in miocenic soils, was the construction of 8 floors below ground level on a 7,600m² area, keeping in the middle of the site area the historic building of Sotto Mayor Palace, with masonry structure and three floors, resting on a 900m² area.

1 - INTRODUÇÃO

A valorização e ocupação dos espaços urbanos tem determinado nos últimos anos o aumento progressivo do número de estruturas e infraestruturas enterradas, construídas ao abrigo de obras de escavação e contenção, nas quais as soluções adoptadas se encontram, em geral, condicionadas por razões de ordem geológica e geotécnica, condições de vizinhança, serviços afectados, entre outras. Na mesma perspectiva de valorização dos espaços urbanos, tem-se igualmente destacado a preocupação com a preservação do património histórico e arquitectónico, a qual tem determinado o desenvolvimento de soluções construtivas de contenção e recalçamento, progressivamente mais adaptadas a este objectivo e às particularidades de cada cenário, Pinto *et al.* (2001 a)).

¹ Tecnasol FGE, Fundações e Geotecnia S.A. Email: apinto@tecnasol-fge.pt

² Tecnasol FGE, Fundações e Geotecnia S.A. Email: sferreira@tecnasol-fge.pt

³ Tecnasol FGE, Fundações e Geotecnia S.A. Email: plopes@tecnasol-fge.pt

⁴ Tecnasol FGE, Fundações e Geotecnia S.A. Email: jdias@tecnasol-fge.pt

⁵ Somague Engenharia S.A. Email: RCosta@somague.pt

⁶ Área Chave, S.A. Email: areachave@mail.telepac.pt

Tendo por base o enquadramento citado, no presente artigo são descritos os principais critérios de concepção e execução de uma obra em meio urbano onde estiveram presentes, de forma articulada, as exigências relativas a uma escavação de 150.000 m³ de terras, com altura máxima de 27 m e numa área correspondente a um quarteirão com cerca de 95x80 m², e ainda com a necessidade de preservar a integridade de um edifício histórico localizado no centro do recinto de escavação. O novo Projecto de Arquitectura além de prever a realização de uma escavação em torno do Palácio para a construção de oito pisos enterrados, destinados a hotelaria, comércio e estacionamento, contemplava ainda a execução de uma galeria subterrânea sob a estrutura do Palácio, atravessando a zona central entre as fachadas Poente e Nascente. A execução desta galeria determinou a necessidade de recalçar os elementos estruturais interiores do Palácio adjacentes à mesma. O edifício em causa dispõe de cem anos de existência e foi classificado pelo IPPC como imóvel de interesse público (Fig.s 1 e 2).



Fig. 1 – Vista do Palácio no início do século XX, após a sua construção.

2 – PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 - Condicionamentos de ordem arquitectónica e estrutural

A solução adoptada foi significativamente condicionada pela necessidade de preservar a integridade do Palácio Sotto Mayor. Este edifício, de estilo clássico e com influência francesa, foi projectado pelo Arqtº Ezequiel Bandeira e construído entre 1902 e 1906, no local onde teria existido anteriormente o solar da família Mayer, construído no século XIX e demolido em 1900. O edifício é constituído por uma estrutura com paredes exteriores em alvenaria de pedra de boa qualidade, paredes do átrio interior em alvenaria de tijolo e paredes divisórias em tabique e alvenaria de tijolo. A estrutura encontra-se fundada directamente em formações miocénicas, dispondo de uma cave semi-enterrada, piso térreo nobre, 1º piso e mansardas, ocupando uma área em planta de cerca de 30x30 m² (Fig.s 1 e 2).

No início dos anos 90 teve lugar um incêndio que danificou severamente a cobertura e alguns elementos estruturais do edifício do Palácio, em particular os pavimentos, em madeira

de solho, o qual determinou a necessidade de colocação de uma cobertura metálica provisória, que permaneceu no local durante os trabalhos de escavação. O valor patrimonial do Palácio determinou a necessidade de realizar trabalhos preparatórios que incluíram, entre outros, o levantamento e a desmontagem de escadarias, vedação exterior e calçadas (Fig. 2).

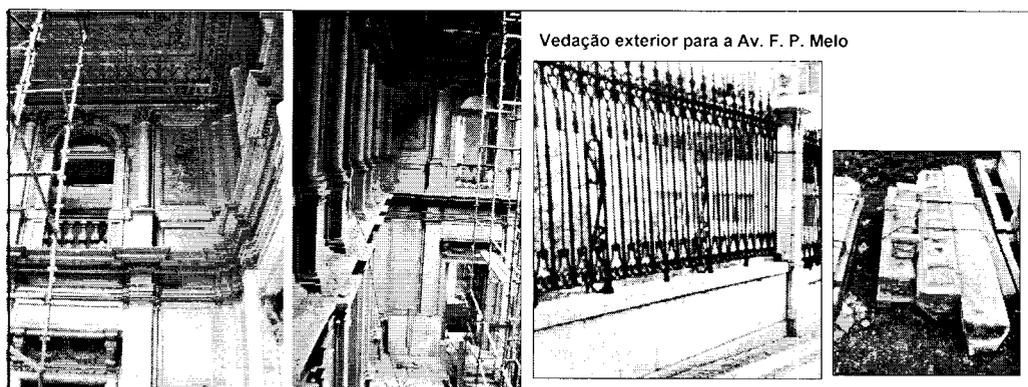


Fig. 2 – Vistas do átrio interior do Palácio e da vedação exterior antes e após o seu desmonte.

2.2 - Condicionamentos de ordem geológica e geotécnica

Os terrenos interessados pela escavação realizada eram constituídos por aterros superficiais argilo-arenosos, sobre formações miocénicas denominadas de “Argilas e Calcários dos Prazeres”, com consistência média a rija nos horizontes superiores (N_{SPT} médios de 30 a 40 pancadas). A capacidade resistente destas formações aumentava em profundidade através da influência da componente margosa, assim como da presença de calcarenitos (Fig. 3).

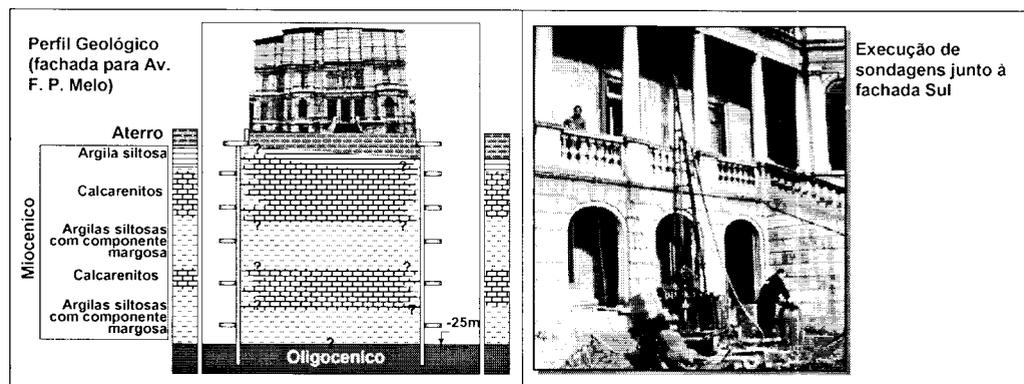


Fig. 3 – Perfil geológico e execução de sondagens.

Na base da escavação foram detectadas as formações de “Benfica”, pertencentes ao Oligocénico (Fig. 3). A caracterização geológica e geotécnica envolveu a realização de três campanhas de prospecção, as quais incluíram a realização de poços, ensaios SPT e ensaios

triaxiais, permitindo a definição de zonas geotécnicas e dos respectivos parâmetros geomecânicos, assim como o levantamento das condições e geometria da fundação do Palácio.

2.3 - Condicionamentos relativos a condições de vizinhança

O recinto de escavação encontrava-se confinado por edificações de médio porte, algumas delas com estrutura em alvenaria de pedra e de idade centenária, assim como por importantes arruamentos (Fig. 10). Em particular, destaca-se a Av. F. P. Melo, sob a qual se localiza o túnel do Metropolitano de Lisboa – M.L. a cerca de 10 m de distância, em planta, da obra (Fig. 4), assim como a articulação das soluções com todos os serviços existentes na zona.

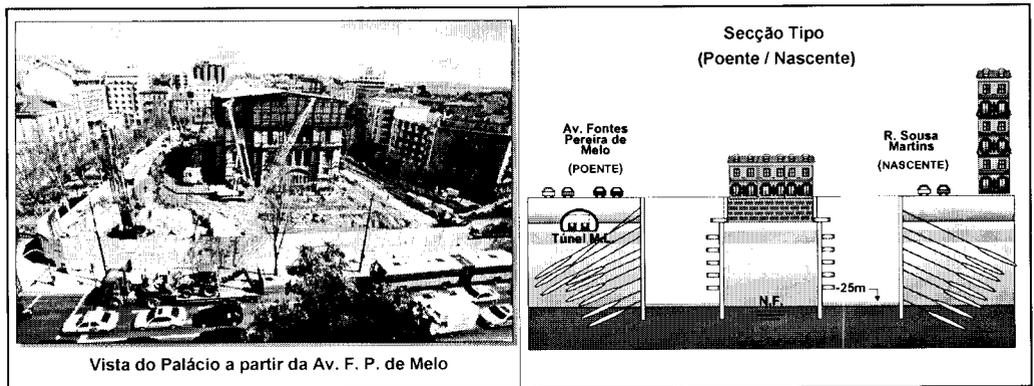


Fig. 4 – Vista do Palácio a partir da Av. Fontes Pereira de Melo e secção tipo.

3 – SOLUÇÕES ADOPTADAS

3.1 – Recalçamento interior do Palácio

Devido à exiguidade de espaço e às características da estrutura a recalçar, a solução adoptada consistiu no recurso a microestacas em aço de alta resistência, com secção em coroa circular, encabeçadas por uma grelha de vigas de betão armado pré-esforçado (Fig. 5). Foram executadas microestacas do tipo N80 $\varnothing_{ext}127$ mm e 9 mm de espessura, com 12 m de comprimento total, incluindo 6 m de selagem. As microestacas acomodaram uma carga axial máxima de serviço de cerca de 600 kN. No que se refere às vigas de encabeçamento, dispostas em grelha, estas foram solidarizadas às paredes de alvenaria de pedra através de mecanismos de costura constituídos por barras tipo “Gewi” $\varnothing32$ mm ($f_{syd} = 500$ MPa). O grau de pré-esforço foi definido de forma a equilibrar a totalidade das cargas permanentes transmitidas às vigas, tendo 50% da carga sido aplicada antes do início dos trabalhos de escavação exterior e a carga remanescente antes do início dos trabalhos de escavação da galeria sob o Palácio.

Os trabalhos de escavação para a realização da galeria só tiveram início após a execução das lajes dos pisos enterrados, localizadas em torno do Palácio. Esta opção de faseamento construtivo permitiu a reposição das condições de confinamento da estrutura e das fundações do Palácio antes do início dos referidos trabalhos de escavação.

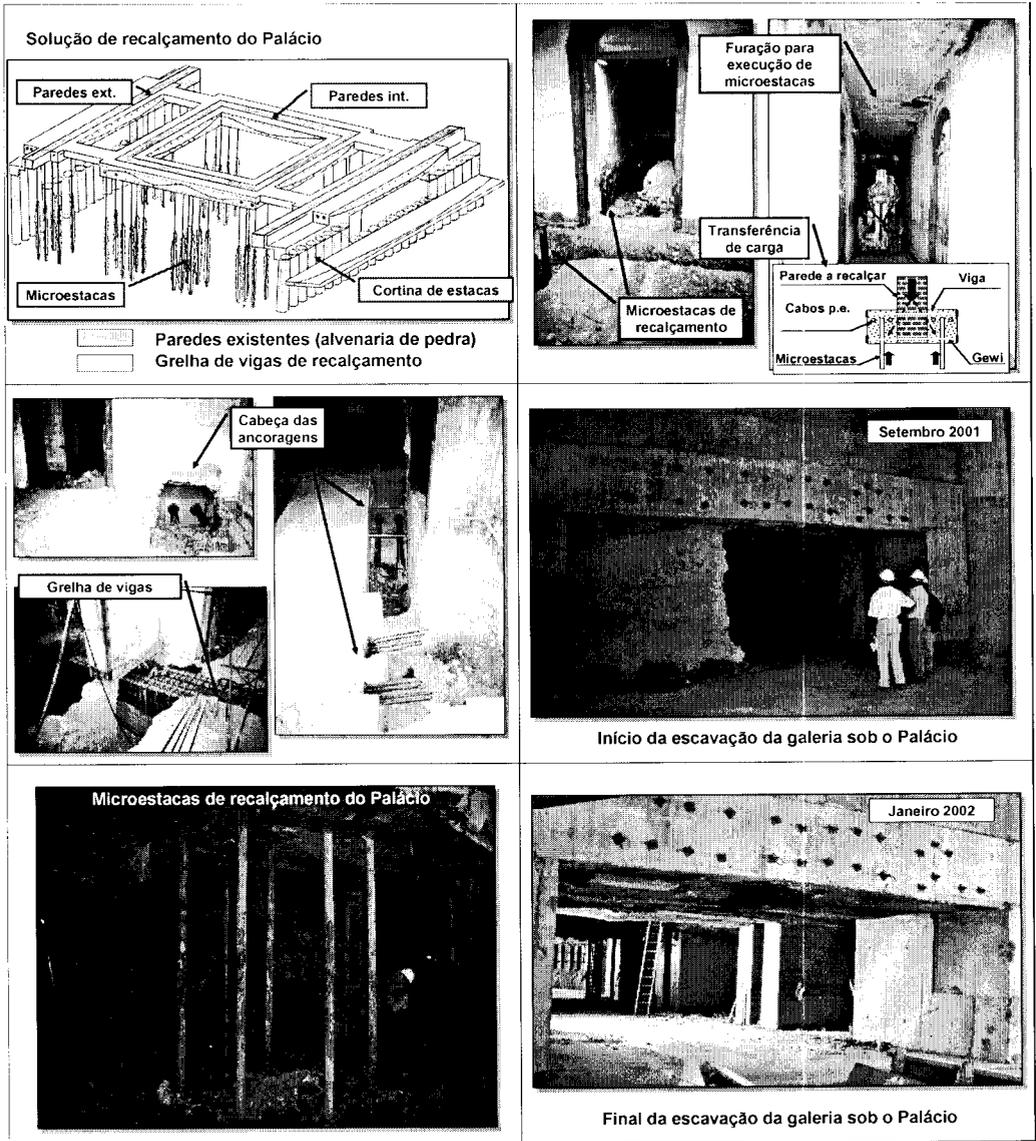


Fig. 5 – Solução e vistas da intervenção de recalçamento.

3.2 – Contenção do Palácio

Atendendo aos condicionamentos de natureza geológica e geotécnica, associados à pequena distância da contenção em relação às paredes periféricas do Palácio, os quais desaconselhavam o recurso a uma solução de paredes moldadas, optou-se pela execução de uma cortina de estacas $\varnothing 800$ mm afastadas 1,0 m, revestidas com betão projectado armado com malha electrosoldada. Devido aos condicionamentos existentes, nomeadamente o facto de se tratar de uma contenção localizada no interior do recinto de escavação, a existência de microestacas no interior do Palácio e, em consequência, a dificuldade na execução, por

incompatibilidade de trajectórias, de ancoragens e tirantes, determinaram que o travamento /confinamento da cortina de estacas fosse efectuado através de vigas horizontais de cintagem em betão armado pré-esforçado. Estas vigas foram executadas em seis níveis, ao longo de uma altura máxima de escavação de cerca de 24 m, tendo sido betonadas e pré-esforçadas contra o terreno e apoiadas ao longo do seu perímetro exterior em perfis HEB200, previamente colocados no terreno antes do início dos trabalhos de escavação. A função destes perfis era a de controlar a deformabilidade vertical das vigas, de forma a evitar a mobilização de excentricidades de 2ª ordem. A localização das vigas foi definida de forma a, sempre que possível, permitir que as mesmas fossem incorporadas na estrutura definitiva, ou seja nas lajes dos pisos enterrados. Estes elementos foram dimensionados com uma secção com cerca de $3,0 \times 0,425 \text{ m}^2$, correspondendo os 0,425 m à espessura das lajes (Fig.s 6 e 7). O grau de pré-esforço foi definido de forma a equilibrar a totalidade dos impulsos transmitidos pelo terreno de fundação do Palácio à cortina de estacas, correspondente a uma carga máxima de serviço de cerca de 130 kN/m. De forma a equilibrar esta carga foram instalados, em cada viga, dois cabos com 27 cordões cada. O pré-esforço em cada viga foi aplicado em duas fases, com sentido alternado entre duas vigas consecutivas. Os cabos foram tensionados a 70% de f_{puk} e não foram injectados de forma a, se necessário, permitir o seu retensionamento.

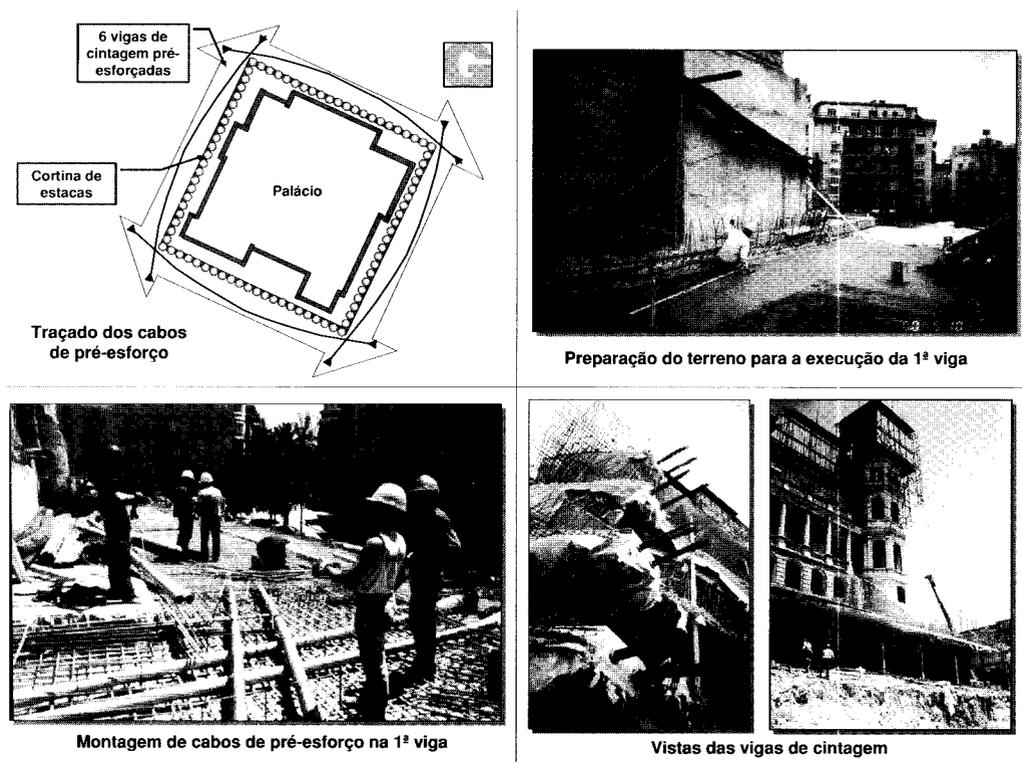


Fig. 6 – Traçado, montagem e vista das vigas de cintagem.

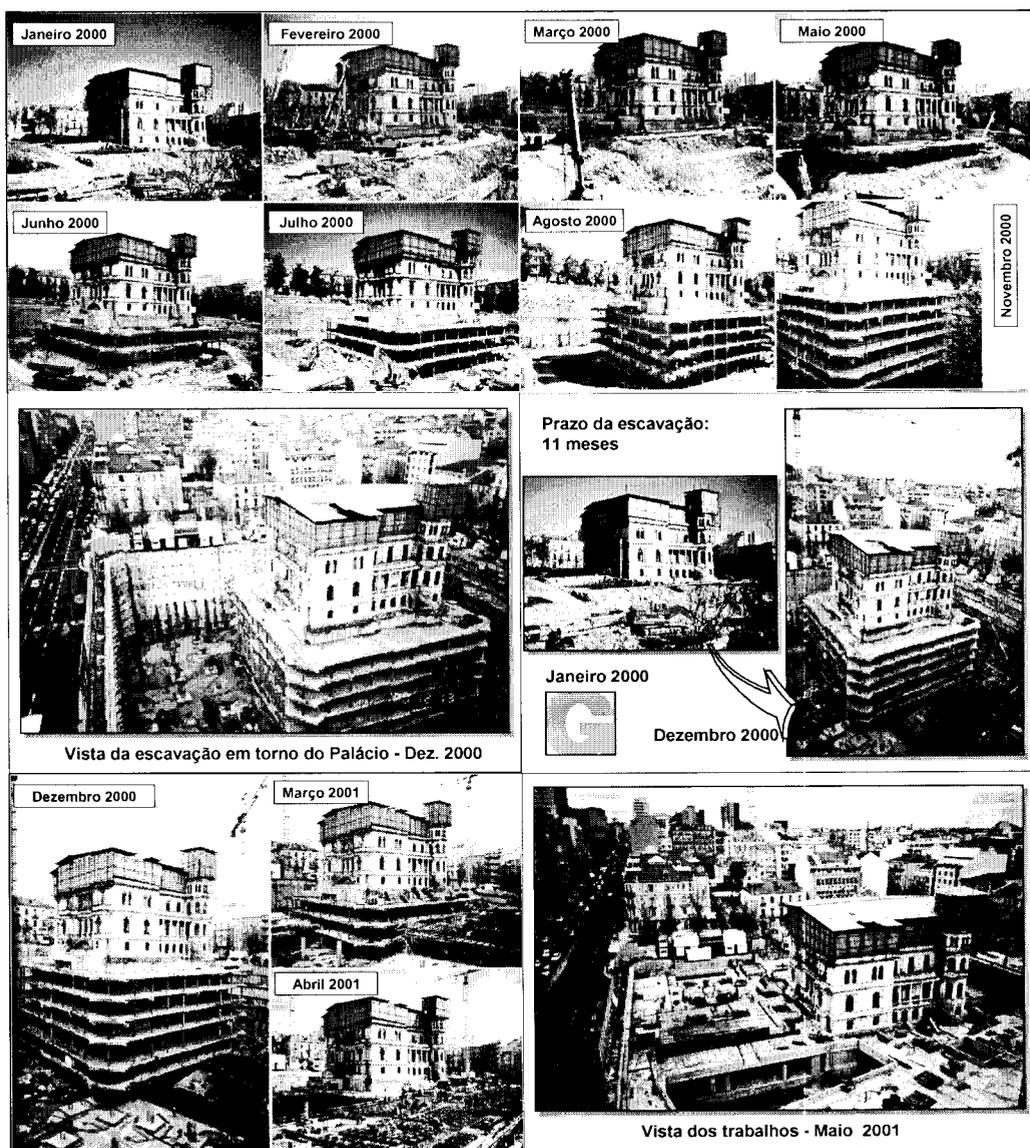


Fig. 7 – Escavação e construção de lajes em torno do Palácio.

3.3 – Contenção Periférica

Por razões relacionadas com os condicionamentos existentes, em particular o prazo para a realização da escavação exterior de cerca de 11 meses, a optimização e gestão de equipamentos determinou a adopção de três técnicas distintas, em função da altura total de escavação e das condições de vizinhança: parede moldada com 1,0 m de espessura (Av. Fontes Pereira de Melo: $h^{\max} \cong 27$ m), parede moldada com 0,6 m de espessura (Rua Martens Ferrão: $h^{\max} \cong 27$ m), cortina de estacas $\varnothing 800$ mm afastadas de 1,0 m, revestidas com betão projectado armado com malha

electrosoldada (Rua Sousa Martins: $h^{max} \cong 24$ m) e contenção tipo “MunIQUE” (“Berlim” definitiva) com 0,35 m de espessura, apoiada em microestacas (Largos das Palmeiras e Andaluz: $h^{max} \cong 18$ m). Todas estas estruturas de contenção foram travadas provisoriamente com ancoragens de pré-esforço útil variável entre 1000 e 600 kN, seladas no terreno com recurso ao sistema de injeção tipo multi-válvulas (Fig. 8). As ancoragens apresentavam comprimento total variável entre 42 e 15 m. Em todas as ancoragens foram executados, antes do seu tensionamento, ensaios de recepção simples ou detalhados. Conforme estipulado no Plano de Instrumentação e Observação, em todas as ancoragens onde foram efectuados ensaios detalhados foram instaladas células de carga eléctricas. A solução executada no alçado da Av. Fontes Pereira de Melo foi concebida pela empresa TRIEDE (1999).

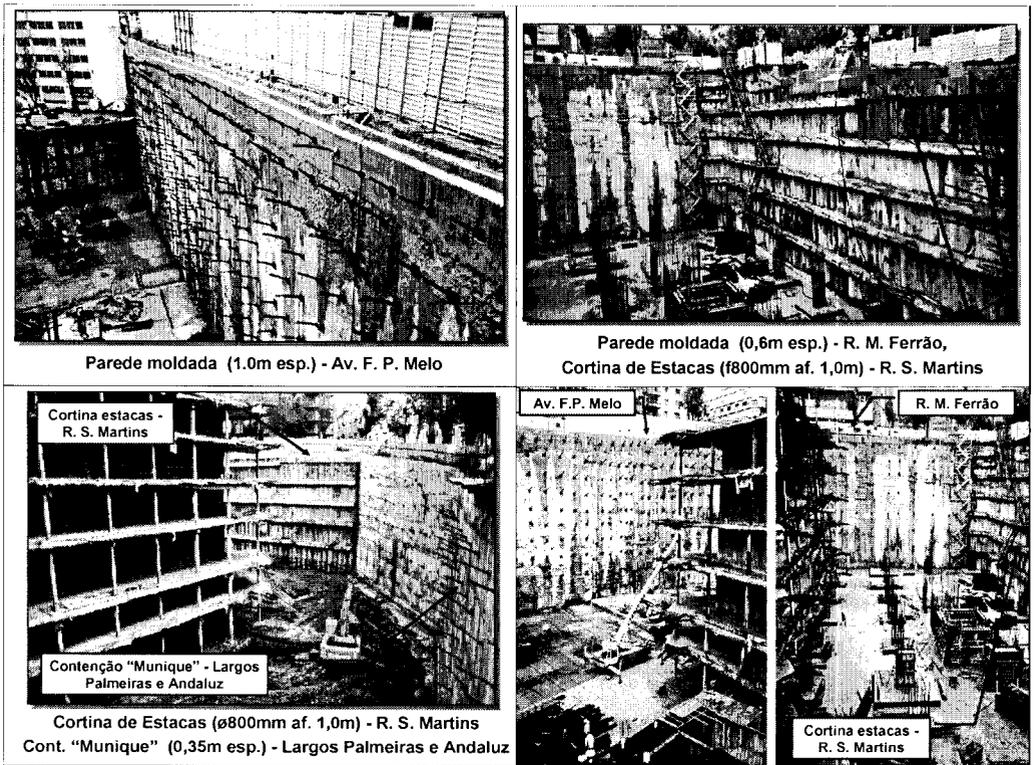


Fig. 8 – Vistas da contenção periférica na fase final da escavação.

4 – MODELAÇÃO ANALÍTICA

A modelação analítica das estruturas de contenção foi efectuada através de um programa de elementos finitos vocacionado para estruturas geotécnicas, tendo a mesma incluído o estudo de todas as fases construtivas da obra (Fig. 9), Tecnasol FGE (2000). No caso particular das vigas de betão armado pré-esforçado adoptadas na grelha de recalçamento e no travamento da contenção do Palácio foram utilizados modelos correntes de viga, sobre os quais foram aplicadas as cargas equivalentes devidas ao pré-esforço.

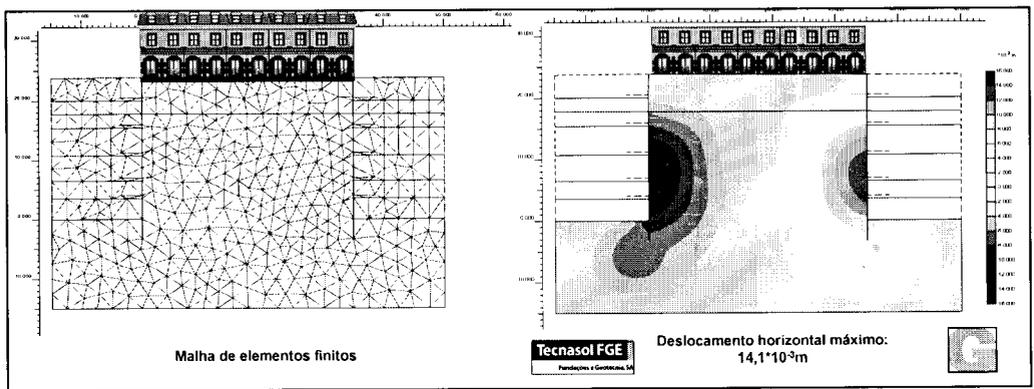


Fig. 9 – Modelo analítico: malha de elementos finitos e deslocamentos máximos horizontais.

5 – PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

Os condicionamentos existentes determinaram a definição e implementação de um Plano de Instrumentação e Observação com o objectivo de permitir o controlo sistemático do comportamento da obra e das zonas vizinhas, através da comparação dos valores de grandezas aferidas por via experimental e analítica. No âmbito da selecção e localização dos aparelhos, a escavação exterior foi dividida em quatro zonas: contenção periférica exterior (7 alinhamentos), edifícios e arruamentos vizinhos, edifício do Palácio (4 alçados) e túnel do M.L. (9 secções, Fig. 11). Foram assim instalados os seguintes aparelhos, cujas leituras foram efectuadas com periodicidade mínima semanal: 28 alvos topográficos (vigas de coroamento, fachadas e interior do Palácio), 31 marcas de nivelamento (arruamentos), 14 réguas de nivelamento (edifícios adjacentes), 67 células de carga eléctrica (ancoragens), 14 inclinómetros (362 ml, no interior de paredes moldadas, estacas e microestacas), 3 piézometros e 9 secções de convergência, com 4 alvos cada, no interior do túnel do M.L.. De forma a garantir a validação das leituras, o tipo e localização dos aparelhos foi definido de modo a, sempre que possível, possibilitar a leitura da mesma grandeza através de aparelhos diferentes.

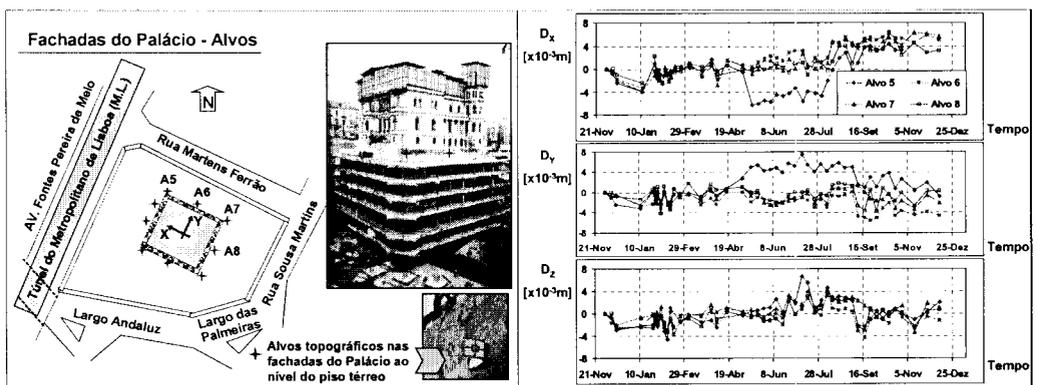


Fig. 10 – Plano de Instrumentação e Observação: alvos topográficos nas fachadas do Palácio.

A análise dos resultados relativos aos aparelhos instalados nas fachadas do Palácio e nas estruturas de contenção revelou-se de grande importância na confirmação dos critérios de concepção. Os valores obtidos por via analítica confirmaram-se através da instrumentação, não tendo os deslocamentos horizontais sido superiores a 0,7/1000 da profundidade da escavação (Fig. 12), e também na definição do faseamento de aplicação do pré-esforço nas vigas de cintagem da cortina de estacas de contenção do Palácio. Em relação a este último aspecto, confirmou-se, através da instrumentação realizada no edifício do Palácio, a importância de aplicação do pré-esforço em duas fases, de forma simétrica e em sequência alternada entre dois níveis de vigas consecutivos (Fig. 10).

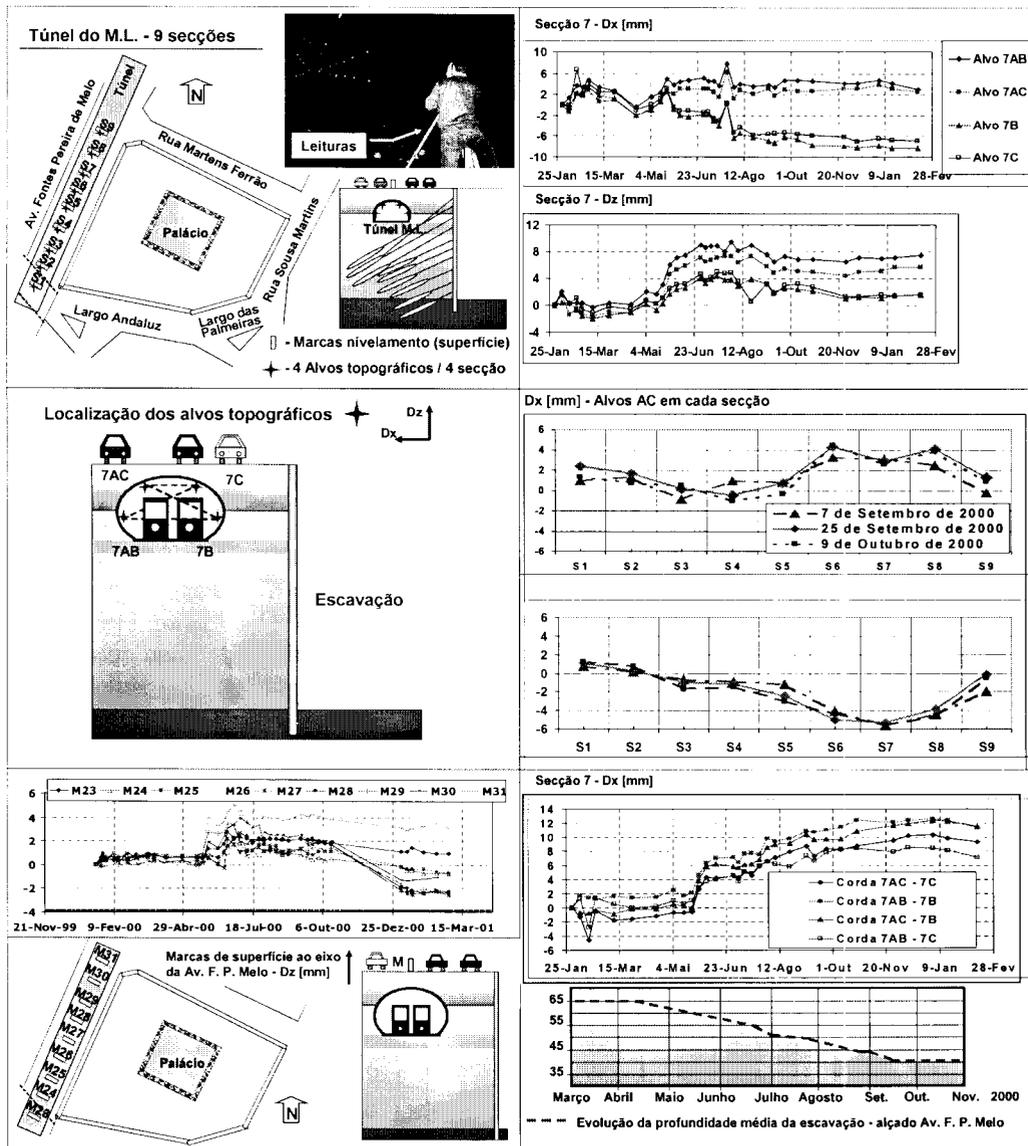


Fig. 11 – Plano de Instrumentação e Observação: túnel do M.L. sob a Av. F. P. Melo.

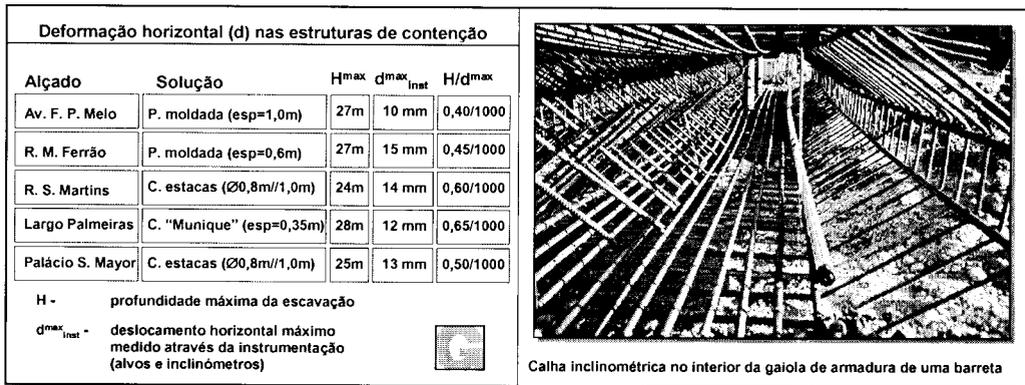


Fig. 12 – Plano de Instrumentação e Observação: deformações horizontais máximas.

No caso particular da análise dos resultados relativos aos aparelhos instalados no túnel do Metropolitano de Lisboa - M.L. e na Av. Fontes Pereira de Melo, estes revelaram-se como muito importantes na confirmação dos critérios de concepção e na aferição do faseamento da escavação e da metodologia de injeção das ancoragens. Neste último caso, destacam-se em particular as ancoragens localizadas nos níveis superiores, em que o empolamento observado determinou correcções na sua metodologia executiva. Na Fig. 11 são apresentados os valores máximos de deslocamentos obtidos no interior do túnel do M.L., em particular os observados na secção S7, assim como os valores obtidos através da leitura das marcas topográficas instaladas no eixo da Av. F. P. Melo, sendo de destacar a boa concordância que, em geral, foi obtida através das leituras efectuadas por aparelhos diferentes. Destaca-se ainda, a tendência para o incremento de deformações horizontais junto à extremidade Norte, onde a profundidade da escavação era máxima.

Relativamente à galeria escavada sob o Palácio, antes início dos respectivos trabalhos de escavação e de forma a melhor controlar o comportamento do edifício, o Plano de Instrumentação e Observação foi reforçado no interior do Palácio com os seguintes aparelhos: 12 marcas topográficas nos pavimentos, 27 réguas topográficas e 12 "tiltmeters" nas paredes.

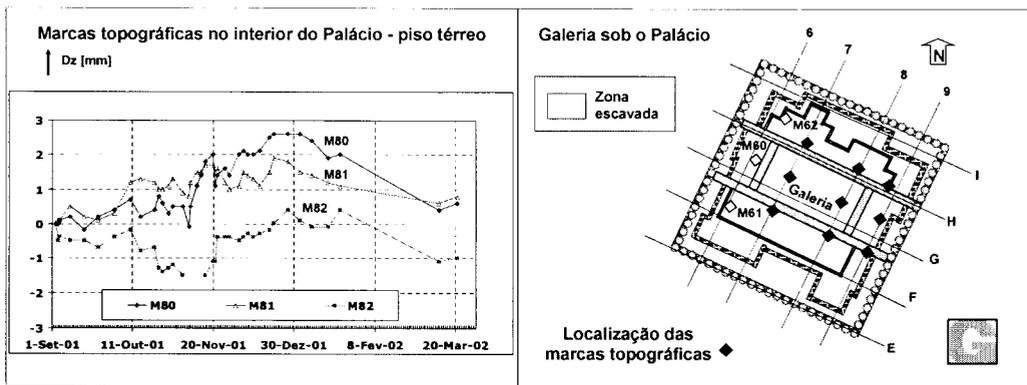


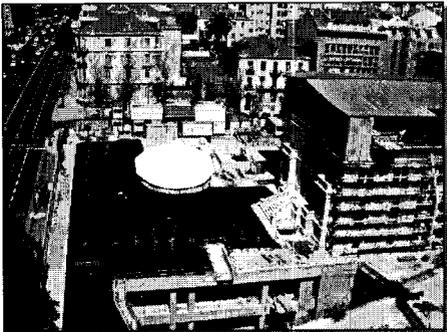
Fig. 13 – Plano de Instrumentação e Observação: marcas topográficas no interior do Palácio.

A análise dos resultados obtidos através dos aparelhos instalados na zona da galeria, à cota do piso térreo do Palácio, permitiu concluir da importância da aplicação integral do pré-esforço na grelha de vigas de encabeçamento das microestacas antes do início dos trabalhos de escavação. Assim, tendo estas vigas sido betonadas contra o terreno verificou-se que à medida que a escavação evoluía, de Poente para Nascente, e que as vigas deixavam de estar em contacto com o terreno contra o qual foram betonadas, o seu efeito sobre a estrutura determinava a compensação das deformações, favorecendo a transferência de carga para as microestacas e gerando mesmo situações de levantamento da estrutura do Palácio, em particular nas zonas de meio vão em relação às vigas. Este fenómeno pode ser comprovado pela análise da Fig. 13, onde na zona central foi observado o empolamento máximo, o qual após a conclusão dos trabalhos de escavação apresentou tendência para a dissipação gradual, que se estima venha a ser total aquando da aplicação das sobrecargas sobre o piso térreo e ainda com o efeito das perdas de pré-esforço.

6 – PRINCIPAIS QUANTIDADES

As principais quantidades relativas às soluções adoptadas na obra encontram-se descritas na Fig. 14.

| Principais Quantidades | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|---------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|-----------------------------------|--------------|---------------|
| <p>‡ Recalçamento do Palácio</p> <table border="1"> <tr> <td>Microestacas N80 Ø127x9mm</td> <td>62 unidades</td> <td>744 metros</td> </tr> <tr> <td>Barras Gewi Ø32mm</td> <td>244 unidades</td> <td>960 metros</td> </tr> <tr> <td>Pré-esforço em vigas de encabeçamento</td> <td></td> <td>851 780 kNm</td> </tr> </table> | | | Microestacas N80 Ø127x9mm | 62 unidades | 744 metros | Barras Gewi Ø32mm | 244 unidades | 960 metros | Pré-esforço em vigas de encabeçamento | | 851 780 kNm | | | |
| Microestacas N80 Ø127x9mm | 62 unidades | 744 metros | | | | | | | | | | | | |
| Barras Gewi Ø32mm | 244 unidades | 960 metros | | | | | | | | | | | | |
| Pré-esforço em vigas de encabeçamento | | 851 780 kNm | | | | | | | | | | | | |
| <p>‡ Contenção exterior do Palácio</p> <table border="1"> <tr> <td>Estacas Ø800mm afastadas de 1,0m</td> <td>133 unidades</td> <td>3 417 metros</td> </tr> <tr> <td>Pré-esforço em vigas de cintagem</td> <td></td> <td>10 800 000 kNm</td> </tr> </table> | | | Estacas Ø800mm afastadas de 1,0m | 133 unidades | 3 417 metros | Pré-esforço em vigas de cintagem | | 10 800 000 kNm | | | | | | |
| Estacas Ø800mm afastadas de 1,0m | 133 unidades | 3 417 metros | | | | | | | | | | | | |
| Pré-esforço em vigas de cintagem | | 10 800 000 kNm | | | | | | | | | | | | |
| <p>‡ Paredes de contenção periférica</p> <table border="1"> <tr> <td>Parede moldada (1,0m espessura)</td> <td></td> <td>2 706m²</td> </tr> <tr> <td>Parede moldada (0,6m espessura)</td> <td></td> <td>2 580m²</td> </tr> <tr> <td>Estacas Ø800mm afastadas 1,0m</td> <td>54 unidades</td> <td>1 296 metros</td> </tr> <tr> <td>Ancoragens provisórias no terreno</td> <td>935 unidades</td> <td>19 431 metros</td> </tr> </table> | | | Parede moldada (1,0m espessura) | | 2 706m ² | Parede moldada (0,6m espessura) | | 2 580m ² | Estacas Ø800mm afastadas 1,0m | 54 unidades | 1 296 metros | Ancoragens provisórias no terreno | 935 unidades | 19 431 metros |
| Parede moldada (1,0m espessura) | | 2 706m ² | | | | | | | | | | | | |
| Parede moldada (0,6m espessura) | | 2 580m ² | | | | | | | | | | | | |
| Estacas Ø800mm afastadas 1,0m | 54 unidades | 1 296 metros | | | | | | | | | | | | |
| Ancoragens provisórias no terreno | 935 unidades | 19 431 metros | | | | | | | | | | | | |



Vista dos trabalhos - Dez. 2001

Fig. 14 – Principais quantidades e vista do Palácio em Dezembro de 2001.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intervenção descrita permite comprovar a gama e a versatilidade das soluções de contenção e recalçamento adoptadas, destacando-se, em especial, a forma como as mesmas foram ajustadas às particularidades de um cenário complexo. Pela sua importância na optimização e ajuste das soluções aos condicionamentos existentes, destaca-se o papel das campanhas de prospecção geológica e geotécnica efectuadas antes e durante os trabalhos, assim como do Plano de Instrumentação e Observação adoptado. No caso da informação geológica e geotécnica recolhida antes do início dos trabalhos, o investimento efectuado permitiu uma optimização substancial das soluções de contenção, Tecnasol FGE (2000). No que se refere à instrumentação e observação da obra, confirmou-se o seu papel fundamental como ferramenta de controlo e gestão de risco em intervenções com a dimensão e enquadramento da presente, permitindo na obra apresentada a validação, em tempo útil, dos principais critérios de execução e concepção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dono da obra a permissão para a divulgação dos aspectos técnicos apresentados na presente comunicação. Não podem ainda deixar de destacar que o trabalho de concepção e execução realizado na obra descrita foi desenvolvido por uma equipa multidisciplinar que além da componente de concepção, execução e fiscalização, incluiu ainda as tarefas de produção, instrumentação, geologia/geotecnia, qualidade, segurança e orçamentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pinto, A.; Ferreira, S. e Barros, V. *Underpinning solutions of historical constructions* - III Seminário Internacional “Possibilidades das técnicas numéricas e experimentais”, Universidade do Minho – Guimarães, Consolidation and Strengthening Techniques, pp. 1003 – 1012, 2001 a).
- Pinto, A.; Ferreira, S.; Barros, V.; Costa, R.; Lopes, P. e Dias, J. *Sotto Mayor Palace – Design and performance of a deep excavation*. Proc. XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istambul, pp. 1237 – 1240, 2001 b).
- Pinto, A.; Ferreira, S. e Barros, V. *Palácio Sotto Mayor. Soluções de Contenção e Recalçamento*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, F.E.U.P. – Porto, Tema 6 – Realizações, pp. 769 – 778, 2000.
- Tecnasol FGE - Fundações e Geotecnia S.A. *Centro Empresarial Palácio Sotto Mayor – Projecto de Escavação, Contenção e Recalçamento, Solução C*, 2000.
- TRIEDE – *Centro Empresarial Palácio Sotto Mayor – Escavação e Contenção, Projecto de Execução*, 1999.