

## Nova linha circular do Metropolitano de Lisboa: Recalçamento de edifícios, o caso da obra especial 3

Carlos Martins

Engenheiro, JETSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, cmartins@jetsj.com

Rui Tomásio

Engenheiro, JETSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, rtomasio@jetsj.com

Catarina Fartaria

Engenheira, JETSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, cfartaria@jetsj.com

Alexandre Pinto

Engenheiro, JETSJ Geotecnia, Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.com

**RESUMO:** A nova linha circular do Metropolitano de Lisboa atravessará uma zona densamente urbanizada da cidade de Lisboa, ligando a estação do Rato, localizada numa das colinas da cidade, à estação do Cais do Sodré, encostada à margem direita do rio Tejo. A escavação subterrânea intersecta uma grande variedade de materiais, desde maciço rochoso a solos moles. Nas zonas onde a construção do trecho do túnel se situa mais próximo do rio, com cerca de 20 m de profundidade, é utilizado um método de escavação Cut & Cover. Neste trecho o traçado da linha intersecta dois edifícios em betão armado, com 9 pisos elevados e fundações indiretas por estacas, determinando a necessidade de proceder ao recalçamento destas estruturas e proceder à transferência de cargas para um novo sistema de fundação. As condições geotécnicas e geológicas presentes neste trecho, associadas às condições de acesso e de trabalho muito limitadas, levaram à materialização de cortinas de contenção com recurso à tecnologia de jet grouting, combinada com a execução de microestacas. Estes elementos foram também utilizados como parte integrante do novo sistema de fundação dos edifícios, o qual passará a ser materializado por uma laje de betão armado (comprimento=50m, largura=11m e espessuras=1,4m e 1,8m) que recebe e distribui as cargas provenientes dos pilares da estrutura original, para as referidas cortinas de colunas de jet grouting armadas com microestacas. Neste processo complexo encontra-se prevista uma transferência controlada de cargas entre as estruturas existentes e a nova laje, a qual é executada com recurso a macacos hidráulicos, limitando os assentamentos diferenciais do edifício através da abertura gradual dos mesmos e da sua permanente monitorização. Este artigo apresenta uma descrição global das soluções adotadas, sua implementação e do comportamento dos edifícios impactados pelos trabalhos descritos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metropolitano de Lisboa, Recalçamento, Jet-grouting, Escavação, Fundações

**ABSTRACT:** The new circular Lisbon metro line will cross a densely urbanized part of the Lisbon city, connecting Rato Station located at one of the hills of the city and Cais do Sodré Station, at the Tagus River right bank. The underground excavation intersects a wide range of materials, from rock mass to soft soils. Where the construction of the tunnel section is closer to the river, with about 10 m of cover, a Cut & Cover method is used. In this metro the tunnel intersected a pile foundation of two reinforced concrete buildings with 9 upper floors, determining the need to underpin the structures and change permanently its foundation system. The geotechnical and geological conditions present in this metro, associated to highly limited access and working conditions, led to the execution of the retaining walls using jet-grouting technology. Those elements were also used as the building deep foundations, which consists of a reinforced concrete slab (length=50m, width=13m and thicknesses=1.4m and 1.8m), being also responsible for the structure underpinning. In this complex process is defined a controlled load transfer between the structure and the new slab, which was executed using hydraulic jacks, limiting the building differential settlements through gradual jacks opening and according with monitoring. This paper presents an overall description of the solutions, how they were implemented and the buildings' behaviour during the underground works.

**KEYWORDS:** Lisbon Metro, Underpinning, Jet-grouting, Excavation, Foundations

## 1 INTRODUÇÃO

A nova linha circular do metro de Lisboa atravessará uma zona densamente urbanizada da cidade, ligando a estação do Rato, situada numa das colinas da cidade de Lisboa, à estação do Cais do Sodré, na margem direita do rio Tejo.

Nos casos em que a construção da secção do túnel está mais próxima do rio, é utilizado o método Cut & Cover. Neste troço, o traçado da linha intersecta a fundação indireta por estacas de dois edifícios de betão armado com 9 pisos elevados e 1 cave, determinando a necessidade de proceder à reformulação da solução de fundações existente, transferindo as cargas para novas fundações e demolindo as existentes.

As condições geotécnicas e geológicas deste troço, associadas às condições de acesso e de trabalho muito limitadas, levaram à execução de cortinas de contenção com recurso à tecnologia jet grouting armadas com microestacas metálicas tubulares. Estes elementos foram também utilizados como fundações profundas de uma laje de betão armado com 1,4m e 1,8m de espessura, construída para receber as cargas das fundações existentes e permitir a sua transferência para os novos elementos de fundação.

Neste complexo processo de transferência de cargas, foi definido o processo de gradual de transferência com recurso a macacos hidráulicos sob todos os pilares e a dispositivos de monitorização altimétrica permanente para controlar os assentamentos de cada apoio e, deste modo, minimizar a ocorrência de distorções de pudessem causar patologias aos edifícios.

## 2 EDIFÍCIOS AFECTADOS

O túnel da linha do metro intersecta os edifícios nº 42 e nº 44 na Avenida D. Carlos I. Ambos os edifícios foram construídos no século XX, apresentando uma estrutura em betão armado e fundações em estacas moldadas. Os edifícios têm 9 pisos elevados e 1 cave (ver Figura 1).



Figura 1. Edifícios de betão armado situados por cima do túnel.

O edifício nº42 foi recentemente objeto de obras de reabilitação para reconversão em uso habitacional. Como resultado dessa reconversão, foram realizados trabalhos de reforço da estrutura e das fundações originais, estes últimos com recurso a microestacas. O edifício nº44, por outro lado, encontra-se nas suas condições originais, utilizado para escritórios, e apresenta um bom estado de conservação. Na Figura 2 apresenta-se a planta de fundações dos edifícios, sobreposta com o traçado do túnel do metro, evidenciando a necessidade de transferir a carga de vários pilares ao longo da área de intervenção, devido às estacas intersectarem o túnel.



Figura 2. Vista em planta dos edifícios e projeção da estrutura do túnel.

### 3 PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

#### 3.1 Condicionamentos geológicos e geotécnicos

A campanha de investigação geológico-geotécnica realizada incluiu a execução de múltiplas sondagens que permitiram a caracterização das unidades de solo e de rocha interessadas ao longo da extensão do túnel Cut & Cover sobre a qual se localizam os edifícios em análise (ver Figura 3). Foi possível constatar que, no sentido crescente da quilometragem do túnel, se verifica um aumento progressivo da espessura dos materiais recentes (aterros e aluviões - essencialmente do tipo arenoso) em paralelo com a diminuição da espessura da camada Miocénica subjacente às unidades do Complexo Vulcânico de Lisboa.

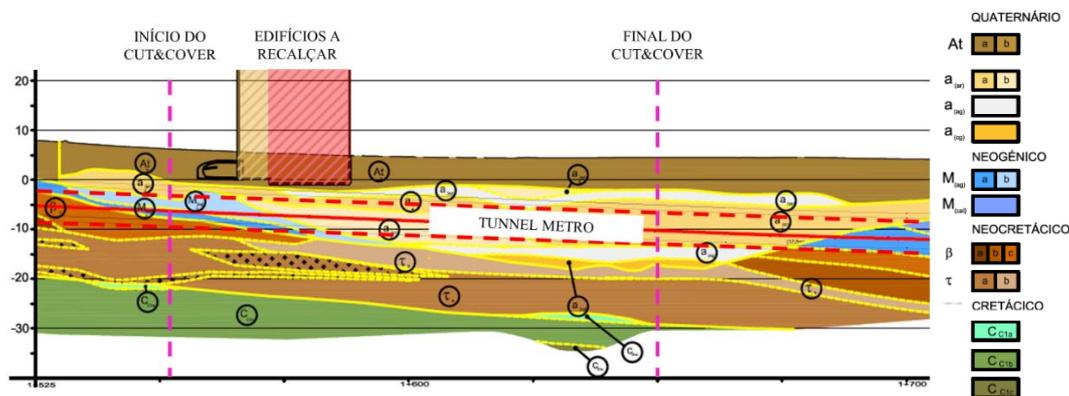


Figura 3. Cenário geológico.

#### 3.2 Condicionamentos relativos às tecnologias construtivas

As soluções tiveram de respeitar os condicionamentos locais no que respeita à acessibilidade dos equipamentos. Tendo em conta a necessidade de trabalhar no interior das caves dos edifícios, as soluções tiveram de ser compatíveis com equipamentos de pequeno porte, compatíveis com o funcionamento num pé-direito mínimo de cerca de 3,0m.

### 3.3 Procedimento de transferência de carga

Para minimizar a ocorrência de patologias nos edifícios, determinadas por assentamentos diferenciais, as soluções e as fases de construção foram definidas de modo a permitir um processo de transferência de carga ativo. Este processo recorreu a um circuito integrado de macacos hidráulicos e sensores de nivelamento que permitem o registo e a compensação sistemática de eventuais assentamentos resultantes da demolição das estacas que interseção o túnel do metro e da consequente transferência dessa carga para a nova laje de recalçamento.

## 4 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

A solução de recalçamento, contenção e escavação consiste na transferência das cargas, dos pilares localizados sobre do alinhamento do túnel, para uma laje de recalçamento, de modo a permitir o corte das estacas de fundação, sem afetar a funcionalidade da estrutura do edifício. Depois de realizado este processo, será realizada a escavação sobre a laje de recalçamento que, por sua vez, está fundada em cortinas de jet grouting com função simultânea de elementos de fundação definitiva e elemento de contenção provisória.

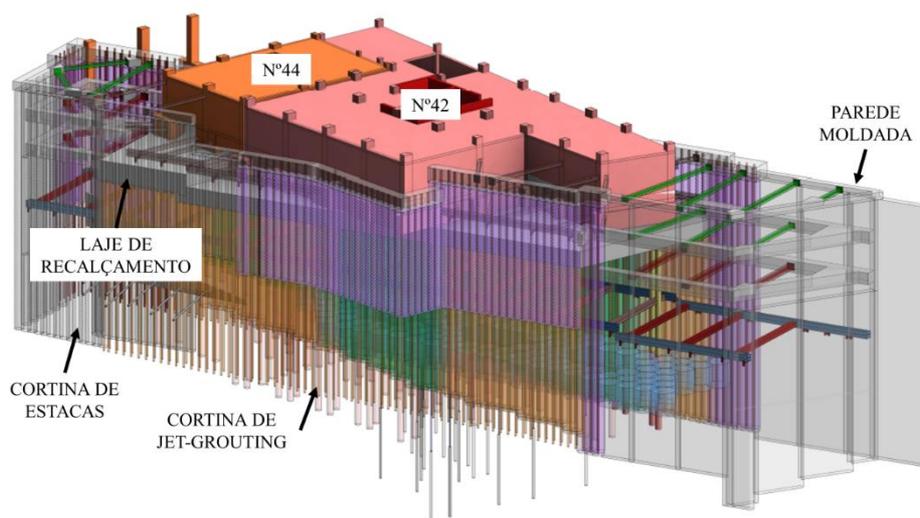


Figura 4. Vista 3D: Solução de escavação e escoramento Cut & Cover.

### 4.1 Descrição da solução de escavação Cut & Cover

A solução de escavação Cut & Cover é realizada, genericamente, ao abrigo de uma cortina dupla de colunas de jet-grouting com 1000mm de diâmetro, espaçadas de 700mm, e reforçadas com perfis tubulares de aço, que têm uma dupla função de fundação da laje de recalçamento e de contenção das terras e das águas para permitir a escavação necessária à construção do túnel do metro. Adicionalmente, para atingir o nível da laje de recalçamento, foi executada uma terceira fiada de colunas de jet-grouting, também reforçadas com perfis metálicos (ver Figura 5).

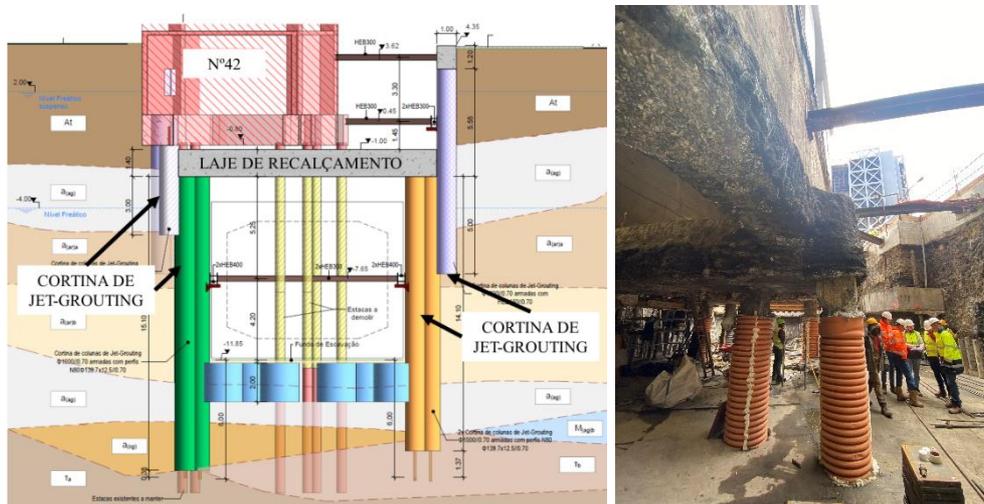


Figura 5. Seção: Escavação Cut & Cover e solução de escoramento (modelo e local).

Refere-se ainda que as cortinas de contenção foram provisoriamente escoradas umas às outras utilizando 3 níveis de escoras de aço, distanciados 5 m entre si, ligados a vigas de distribuição de aço ou de betão armado, e 1 nível materializado pela laje de recalçamento. Por fim, sempre que as formações existentes ao nível do fundo da escavação não eram rochosas, optou-se pela materialização de uma grelha de travamento com colunas de jet grouting com 2000mm de diâmetro, de modo a minimizar a deformabilidade da ficha das cortinas de contenção.

#### 4.2 Descrição da solução de recalçamento do edifício

A solução de recalçamento dos edifícios consiste a construção de uma laje de betão armado, apoiada indiretamente em cortinas de colunas de jet-grouting, reforçadas com perfis de aço de forma a aumentar a sua ductilidade e rigidez, colocadas ao longo dos alinhamentos exteriores do túnel do metro. A laje de recalçamento foi posicionada no espaço disponível entre a base dos maciços de encabeçamento das estacas e a laje de cobertura do túnel do metro, com uma geometria de aproximadamente 50,0m de comprimento, por 13,0m largura e uma espessura variável entre 1,40m e 1,80m (ver Figura 7).

No seu conjunto, estes elementos permitem alterar o sistema de fundação dos edifícios, transferindo as cargas dos pilares estruturais para a nova laje de recalçamento que, por flexão cilíndrica, as transmite às duas fiadas de colunas de jet grouting, que finalmente transmitem as reações às camadas de solo competentes situadas abaixo da laje de fundo do túnel.

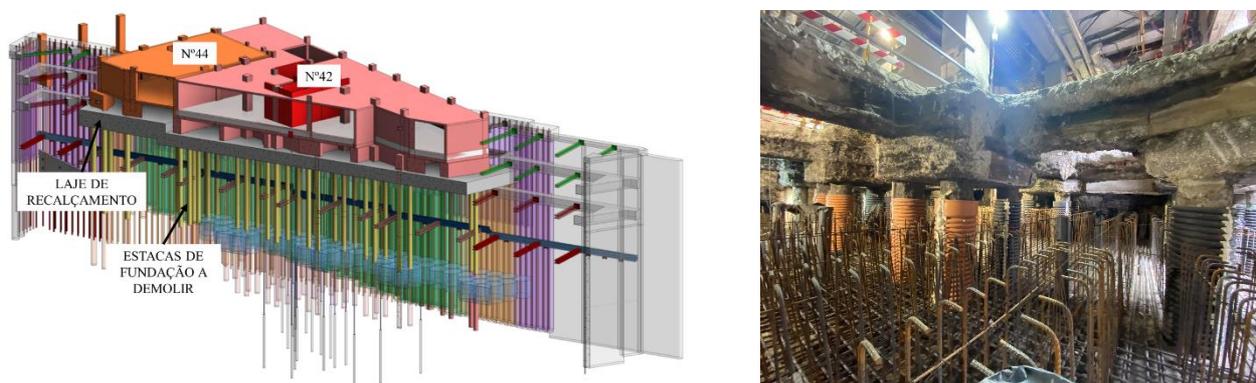


Figura 6. Vista 3D: A solução de escoramento e as estacas são desativadas.

Com esta solução implementada, é possível demolir as estacas de fundação existentes, que se localizam sobre o alinhamento do túnel do metro, bem como proceder aos trabalhos de escavação para a construção do referido túnel (ver Figura 6).

### 4.3 Descrição do procedimento de transferência de carga

De modo a garantir que uma transferência de cargas gradual entre os pilares dos edifícios e a laje de betão armado de recalçamento, permitindo assim um maior controlo dos assentamentos que ocorrem neste processo e, em particular, dos assentamentos diferenciais que podem provocar patologias nos edifícios, foi instalado um sistema de macacos hidráulicos e de monitorização de assentamentos. Os macacos hidráulicos, posicionados entre a laje de recalçamento e os maciços de encabeçamento de estacas, serão responsáveis por aliviar as cargas das atuais estacas de fundação, transferindo a carga para a nova laje e, deste modo, permitindo que as estacas tenham uma carga residual quando forem demolidas.

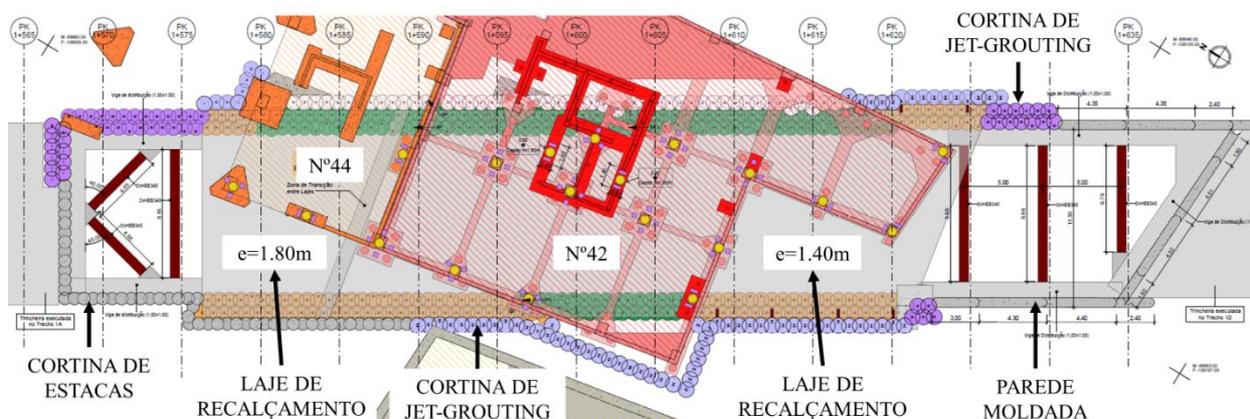


Figura 7. Vista em planta: Solução de escavação e escoramento Cut & Cover.

As fases relacionadas com a transferência de carga são resumidas abaixo e ilustradas na Figura 8:

1. Instalação do sistema de instrumentação nos pilares;
2. Escavação até ao nível inferior da laje;
3. Encamisamento das estacas seguido da construção da laje e da instalação dos macacos hidráulicos;
4. Escavação sob a laje, seguida de ativação dos macacos hidráulicos e posterior demolição das estacas existentes, gerida pela análise dos dados de monitorização.

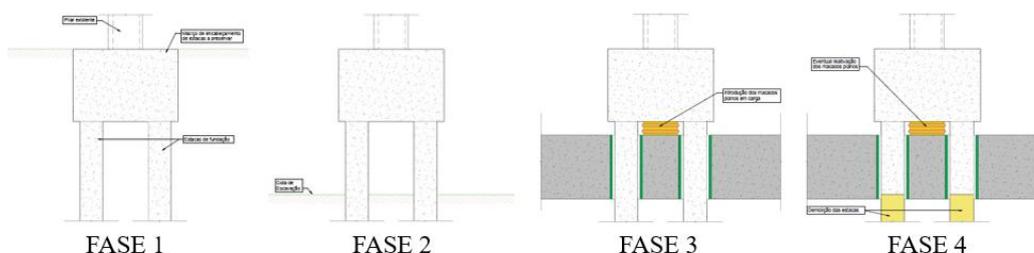


Figura 8. Solução de recalçamento – Sistema de transferência de carga.

## 5 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO

A solução de recalçamento foi dimensionada utilizando modelos estruturais no software *SAP2000*.

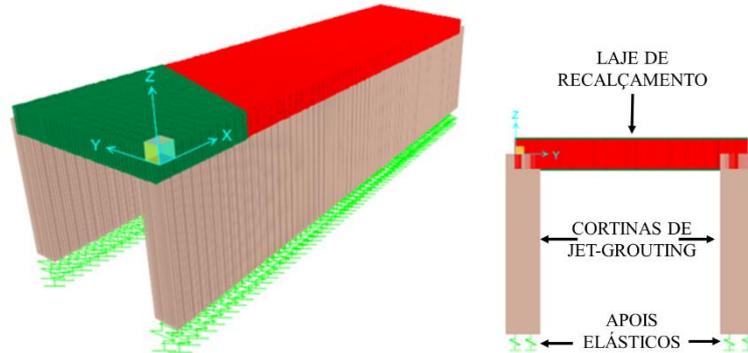


Figura 9. Modelo de análise SAP2000 para a laje de fundação.

A laje de recalçamento, bem como as cortinas de colunas de jet grouting, foram modelados com elementos do tipo casca e, no caso destes últimos, apoiados em molas que tentaram reproduzir a rigidez do terreno de fundação. Este modelo permitiu estimar os esforços estruturais da laje (ver, por exemplo, os momentos fletores na Figura 10), bem como a sua deformação elástica (ver Figura 11).

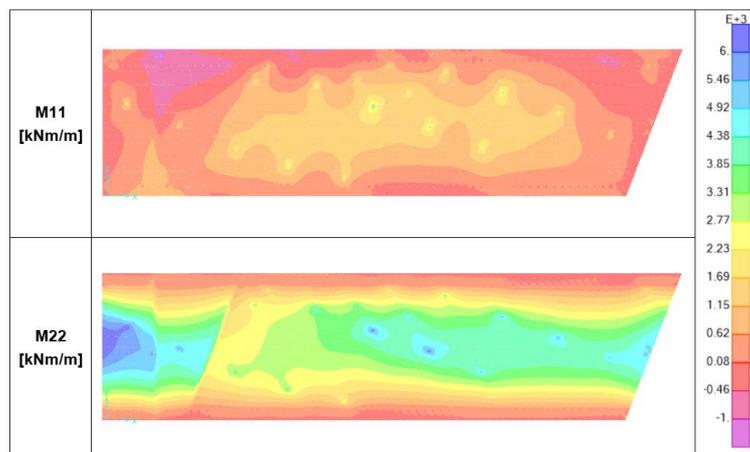


Figura 10. Modelo de análise SAP2000 para laje de fundação - Momentos fletores.

Considerando as rigidezes dos apoios do modelo estrutural, foi estimada a carga axial máxima de projeto em cada coluna de jet-grouting, permitindo, em análise paralela com o modelo geotécnico para a solução Cut & Cover, a validação da segurança desses elementos, simultaneamente para a fase provisória e para a fase definitiva.

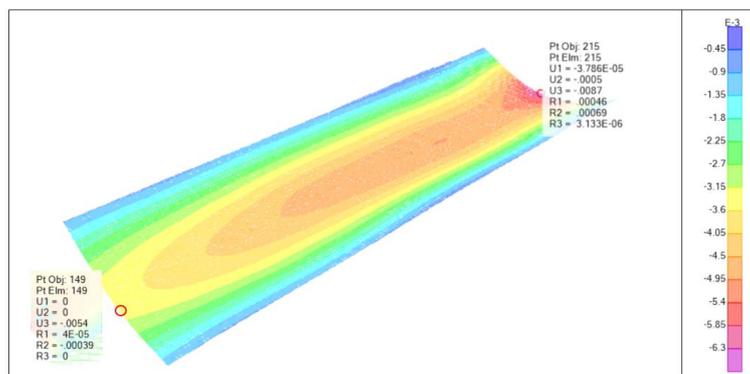


Figura 11. Modelo de análise SAP2000 para a laje de fundação - Deslocamentos.

## 6 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

Durante os trabalhos de transferência de cargas e, posteriormente, durante os trabalhos de escavação e construção do túnel, foi implementado um plano de monitorização com sensores de nível de líquido e extensômetros para medir os movimentos altimétricos da laje de recalçamento e dos pilares dos edifícios, bem como a interação entre eles (ver Figura 12).

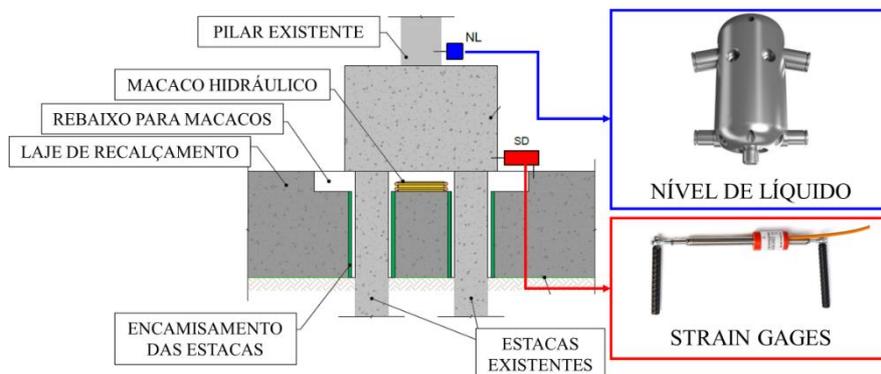


Figura 12. Dispositivos de controlo: Sensores de nível de líquido e strain gages

O plano de monitorização estabelece ainda valores-limite para cada dispositivo, para cada fase da transferência de carga. Os resultados das análises numéricas foram utilizados para determinar os valores de referência dos parâmetros medidos, que foram utilizados para fixar valores de alerta, para 80% dos valores de referência, e de alarme, para 120% dos referidos valores.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A definição e implementação de uma nova linha de metro numa zona densamente urbanizada pode conduzir a interferências com estruturas existentes. Para cenários como o apresentado neste trabalho, a solução de recalçamento das fundações foi a mais adequada para permitir manter a integridade das estruturas existentes, embora este tipo de solução apresente muitas vezes múltiplas restrições ao nível do acesso e operação dos equipamentos.

Para o sucesso de intervenções com a complexidade da presente, considera-se essencial a implementação de um plano de monitorização adequado, o qual ajudará a garantir uma eficaz transferência de cargas entre os elementos de fundação existentes e os novos elementos de recalçamento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Metropolitano de Lisboa a autorização para a apresentação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pinto, A. (2008) Soluções adoptadas na Interferência nº16 da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa: Oriente – Aeroporto. In: XI Congresso Nacional de Geotecnia – SPG, Guimarães, Portugal.

Eurocódigo 2 – Projeto de Estruturas de Betão Armado

Eurocódigo 7 – Projeto Geotécnico