

## Nova Linha Circular do Metropolitano de Lisboa: Recalçamento de Edifícios Centenários

Catarina Fartaria

Engenheira, JETsj Geotecnia, Lisboa, Portugal, [cfartaria@jetsj.com](mailto:cfartaria@jetsj.com)

Carlos Martins

Engenheiro, JETsj Geotecnia, Lisboa, Portugal, [cmartins@jetsj.com](mailto:cmartins@jetsj.com)

André Henriques

Engenheiro, JETsj Geotecnia, Lisboa, Portugal, [ahenriques@jetsj.com](mailto:ahenriques@jetsj.com)

Rui Tomásio

Sócio-Gerente, JETsj Geotecnia, Lisboa, Portugal, [apinto@jetsj.com](mailto:apinto@jetsj.com)

Alexandre Pinto

Sócio-Gerente, JETsj Geotecnia, Lisboa, Portugal, [apinto@jetsj.com](mailto:apinto@jetsj.com)

**RESUMO:** A nova linha circular do Metropolitano de Lisboa atravessa uma área da cidade densamente urbanizada, promovendo a ligação entre a Estação do Rato, localizada numa das colinas da cidade e a Estação do Cais do Sodré localizada na margem direita do Rio Tejo. Deste modo, a escavação subterrânea intersecta diversos tipos de materiais desde maciços rochosos até materiais aluvionares. A nova Estação de Santos ficará localizada parcialmente sob um conjunto de edifícios centenários apresentando um recobrimento de apenas 15m. Os referidos edifícios, contruídos no século XIX, dispõem de uma elevada suscetibilidade a assentamentos diferenciais dada a sua composição em madeira e alvenaria de pedra e apresentam diversas patologias estruturais. Após estimativa dos assentamentos à superfície originado pela escavação subterrânea e considerando o estado de integridade dos edifícios e a elevada heterogeneidade do seu solo de fundação, foi decidida a necessidade de efetuar previamente um recalçamento dos edifícios por forma a mitigar os potenciais danos estruturais. A solução incluiu a realização de microestacas de elevado comprimento, verticais e subverticais, por forma a transmitir as cargas ao solo competente localizado abaixo da zona de influência da escavação subterrânea, conectadas ao edifício por meio de vigas de recalçamento em betão armado. O presente artigo descreve as soluções implementadas e o comportamento do edifício durante os trabalhos da escavação subterrânea.

**PALAVRAS-CHAVE:** Túnel, Recalçamento de edifícios, Edifícios centenários

**ABSTRACT:** The new Lisbon metro line will cross a densely urbanized part of the city, connecting Rato station located at one of the hills of the city and Cais do Sodré station at the Tagus River right bank. Thus, the underground excavation intersects a wide range of materials, from rock mass to soft soils. The new Santos Station will be located partially beneath XIX century buildings with a cover depth of about 15 m, being these structures highly sensitive to differential settlements given its masonry and timber composition with multiple structural pathologies. Given the building conditions, its heterogeneous soil foundation and the level of surface settlements induced by NATM excavation, an underpinning solution was needed aiming to mitigate the buildings potential damages. Hence, high length micropiles, concrete reinforced beams and walls were executed from the building ground floor aiming to transfer buildings loads to the soils located underneath the tunnel excavation. This paper presents an overall description of the adopted solutions, how they were implemented and the buildings' behavior during the underground works.

**KEYWORDS:** Metro, Building Underpinning, Centenary Buildings

## 1 INTRODUÇÃO

A nova linha circular do Metropolitano de Lisboa incluirá uma nova Estação na zona de Santos cujo seu átrio subterrâneo será materializado parcialmente sob um conjunto de edifícios centenários com um recobrimento de cerca de 15m. Estes edifícios são altamente sensíveis a fenómenos de assentamentos diferenciais dada sua composição em alvenaria de pedra e madeira e apresentam já diversas patologias estruturais.

A escavação subterrânea do túnel, que será materializada utilizando o método NATM (New Austrian Tunneling Method) foi analisada mediante modelos numéricos que permitiram estimar os assentamentos à superfície considerando as propriedades geomecânicas dos solos presentes.

Os resultados das referidas análises e o estado de conservação atual das estruturas serviram de base à realização de análises de danos e avaliação da vulnerabilidade dos edifícios à bacia de assentamentos, concluindo-se que os mesmos são capazes de suportar os assentamentos diferenciais sem danos significativos. Dado o presente cenário, foi definida uma solução de recalçamento dos edifícios por forma a mitigar o impacto da escavação subterrânea na manutenção da sua integridade.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS

Considerando a análise de vulnerabilidade dos edifícios realizada, os dois edifícios com paredes de alvenaria de pedra e pisos de madeira foram classificados com um potencial de danos moderado induzido pela escavação subterrânea a realizar parcialmente sob estes. Os edifícios centenários apresentam 3 e 5 pisos elevados e uma fundação do tipo direta (ver Figura 1).



Figura 1. Edifícios a recalçar: Vista frontal (à esquerda) e localização em planta (à direita).

Os edifícios localizam-se numa zona onde no passado existia um convento que foi destruído no âmbito do terramoto de 1755. Deste modo, estima-se que a fundação superficial dos mesmos se encontre sobre materiais de aterro e detritos das derrocadas ocorridas nessa data, o que poderá justificar as patologias presentes. Considerando o presente cenário e as informações referentes à bacia de assentamentos estimada com base em modelos numéricos, segundo a classificação de Burland (1997) concluiu-se que a realização da obra subterrânea sem reforço dos edifícios conduziria a danos moderados a potencialmente severos, o que motivou a obra de recalçamento.

## 2 PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

### 2.1 Condicionamentos Geológico-Geotécnicos

O desenvolvimento do projeto foi precedido pela realização de uma campanha de prospeção incluindo a realização de sondagens acompanhadas de ensaios SPT e ensaios laboratoriais. Tendo por base essa informação foi possível definir um zonamento geológico-geotécnico que serviu de base ao desenvolvimento

do projeto (ver Figura 2). Verificou-se que a presença de uma camada de aterros superficial com cerca de 10m de espessura apresentando detritos e elevada heterogeneidade e sob esta materiais do Miocénico e do Complexo Vulcânico de Lisboa com boas características de resistência e deformabilidade.

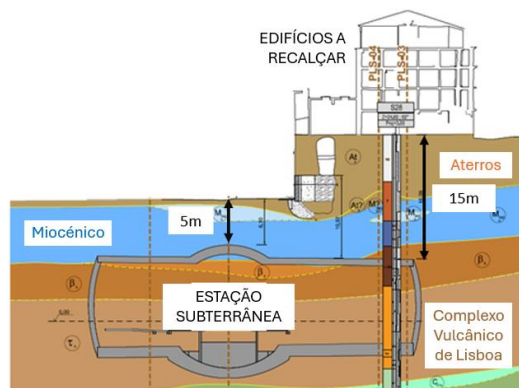


Figura 2. Perfil geológico-geotécnico.

## 2.2 Condicionamentos Relacionados com Tecnologias Construtivas

A escolha das soluções a implementar foi altamente condicionada pela acessibilidade de equipamentos. Considerando a necessidade de operar no interior dos edifícios, as soluções a implementar tiveram de ser compatíveis com a operação de equipamentos em pé-direito reduzido de cerca de 2,5m.

## 2.3 Condicionamentos aos trabalhos de escavação subterrânea

Os trabalhos de escavação subterrânea segundo a metodologia NATM utilizam elementos de reforço que incluem enfilagens em sistema troncocónico assim como geodrenos instalados nas laterais da escavação. O posicionamento das microestacas de recalçamento dos edifícios teve de considerar a posição da galeria subterrânea assim como de todos os elementos relativos ao suporte primário por forma a garantir a não intersecção entre os diversos elementos.

## 3 DESCRIÇÃO DAS SOLUÇÕES DE RECALÇAMENTO IMPLEMENTADAS

Por forma a materializar a solução de recalçamento e reforço dos edifícios foi proposta a execução dos seguintes trabalhos ao nível do piso térreo (ver Figura 3):

- Microestacas (tubo N80 127x9mm), verticais e subverticais, executadas junto às paredes de alvenaria e conectadas às vigas de recalçamento, com comprimentos de selagem de 6m materializado com injeção do tipo repetitiva e seletiva (IRS)
- Grelha de vigas de recalçamento em betão armado (60cmx80cm), conectadas às paredes de alvenaria através de barras pré-esforçadas (GEWI  $\phi$ 32mm) por forma a promover uma efetiva transferência de carga;
- Paredes de revestimento em betão armado de 30cm de espessura conectadas por ferrolhos às paredes de alvenaria;
- Laje de betão armado apoiada nas vigas de recalçamento com 25cm de espessura;
- Reforço das paredes de alvenaria utilizando argamassa de alta resistência projetada e reforçada com malha de fibra de carbono (S&P ARMO-mesh | S&P ARMO-crete w);

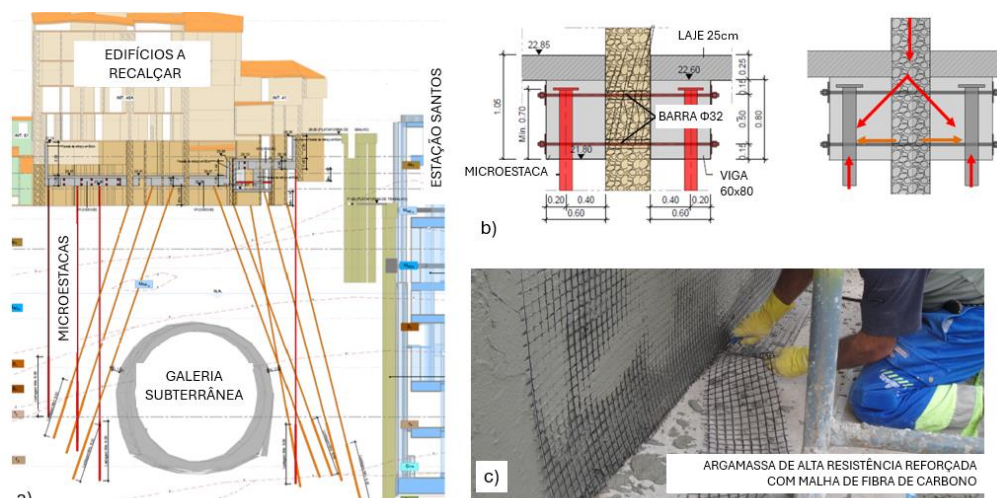


Figura 3. Solução de contenção e recalçamento: a) Seção transversal tipo; b) Sistema de transferência de carga; c) Reforço das paredes de alvenaria.

A solução de recalçamento foi dimensionada para transferir a totalidade das cargas dos edifícios para o solo do Complexo Vulcânico de Lisboa localizado fora da área de influência da escavação subterrânea através das microestacas de recalçamento com comprimentos entre 20m e 25m, totalizando cerca de 4000 metros lineares de tubos de microestaca utilizados na solução de recalçamento. A transferência de carga irá ocorrer assim que os trabalhos de escavação subterrânea induzam assentamento ao nível dos solos de fundação dos edifícios (ver Figura 4).

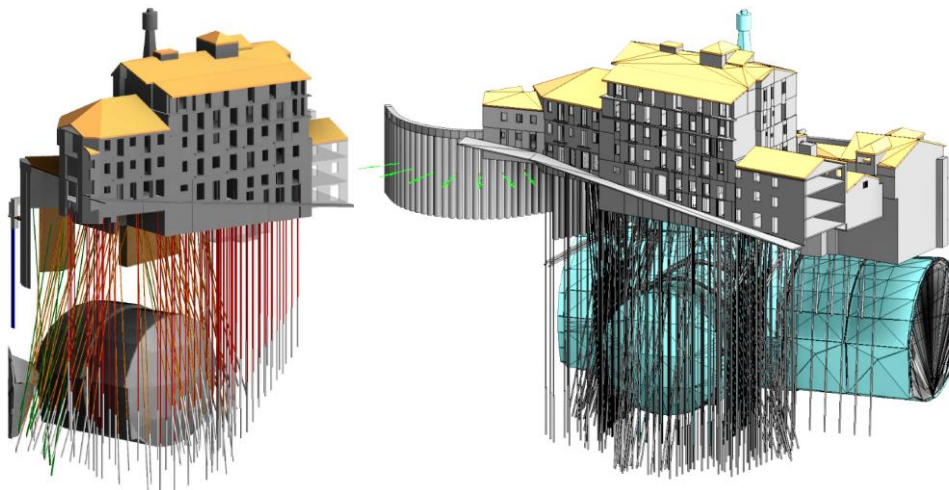


Figura 4. Vista do posicionamento das microestacas na proximidade da galeria subterrânea.

#### 4 DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO

O dimensionamento da grelha de vigas de betão armado que irá permitir a transferência de cargas dos edifícios para as microestacas de recalçamento foi realizado utilizando o software SAP2000. Os apoios dos elementos lineares correspondentes às vigas foram colocadas na posição das microestacas considerando a sua inclinação, no caso das microestacas subverticais e também molas lineares por forma a considerar a rigidez axial do comprimento livre das mesmas. O referido modelo permitiu estimar os esforços atuantes nas vigas, as cargas a transmitir a cada microestaca e ainda a estimativa de deformações do sistema de recalçamento (ver Figura 5).



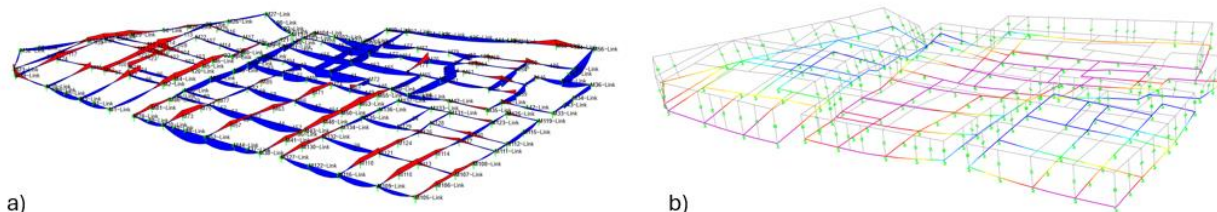


Figura 5. Modelo estrutural da grelha de vigas: a) Momentos fletores; b) Deformação elástica.

Considerando a estimativa das cargas axiais atuantes em cada microestaca obtida com base no modelo estrutural foi possível validar o dimensionamento dos comprimentos de selagem e das secções de tubo de microestaca. Dado que o comprimento livre das microestacas fica localizado na área de influência da escavação subterrânea foi necessário ter em consideração os efeitos de segunda ordem. Para tal foi considerado que os tubos das microestaca poderão estar sujeitos a uma excentricidade máxima de 20mm, sendo a verificação de segurança da secção de aço realizada para esse cenário de interação esforço axial/momento fletor. Os modelos numéricos realizados no âmbito da análise da escavação subterrânea permitiram confirmar que os as microestacas estarão sujeitas a deformações perpendiculares ao seu eixo inferiores a 20mm, sendo assim garantida a verificação de segurança (ver Figura 6).

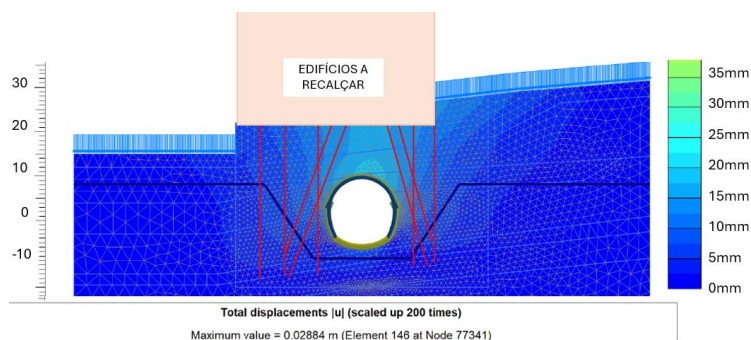


Figura 6. Modelo de análise Plaxis 2D – Deformação induzida pela escavação

## 5 PLANO DE MONITORIZAÇÃO

Dada a elevada complexidade da obra, assim como o cenário de risco geotécnico presente um sistema de monitorização foi implementado utilizando sistemas de aquisição automática de dados. Além dos dispositivos de instrumentação habitualmente instalados no âmbito de obras de escavação subterrânea que incluem marcas topográficas e inclinómetros instalados nos arruamentos e prismas topográficos nas fachadas dos edifícios, foram também instalados nos edifícios a recalçar tiltmeters, fissurometros e sensores de nível líquido. A utilização de sistemas de leitura automatizados, utilizando estações totais instaladas em zonas fora da influência da obra, permite o acompanhamento em tempo real do comportamento das estruturas sendo uma ferramenta essencial para gerir o risco da obra associado à escavação subterrânea.

O Plano de Monitorização implementado inclui a definição de valores de alerta e de alarme para cada um dos dispositivos instalados. A definição desses valores teve por base a estimativa das referidas grandezas obtida com base nos modelos numéricos desenvolvidos, sendo considerados os valores de 80% e de 130% dos valores de referência dos modelos como limites de alerta e de alarme, respetivamente. Assim, ao atingir o critério de alerta significa que o comportamento está a aproximar-se do estimado e ao atingir o critério de alarme significa que foi ultrapassado em 30% a grandeza em questão e, portanto, será necessário implementar medidas de reforço adicionais.

Até à data da redação do presente artigo, o Plano de Monitorização tem sido implementado com leituras diárias e o comportamento dos edifícios recalçados durante os trabalhos de recalçamento e depois durante a realização da escavação subterrânea têm se revelado, como espectável, com assentamentos reduzidos atingindo um máximo de 3mm (ver Figura 7).

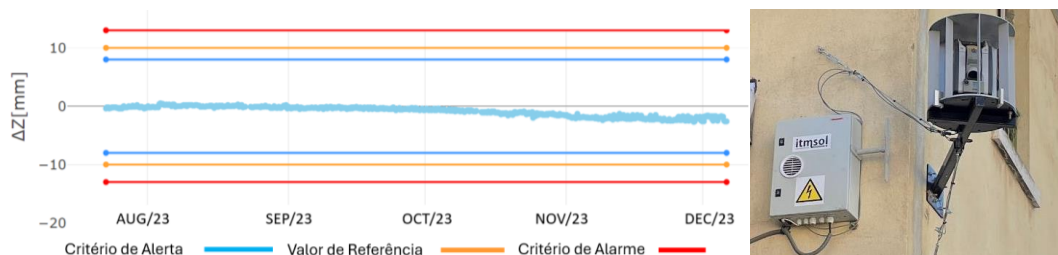


Figura 7. Monitorização: a) Prisma topográfico – Deslocamento vertical; b) Estação Total.

Dado que os edifícios recalçados se encontra numa colina, movimentos horizontais de massa do solo de fundação eram também uma preocupação dado que os trabalhos de escavação subterrânea para a execução da estação se localizam na base da referida colina. Neste enquadramento, foram instaladas calhas inclinométricas com 35m de comprimento no arruamento adjacente aos edifícios por forma a avaliar os movimentos horizontais em profundidade que pudessem indicar um problema de instabilidade global, registando-se até ao momento deformações reduzidas inferiores aos critérios de alerta considerados (ver Figura 8).

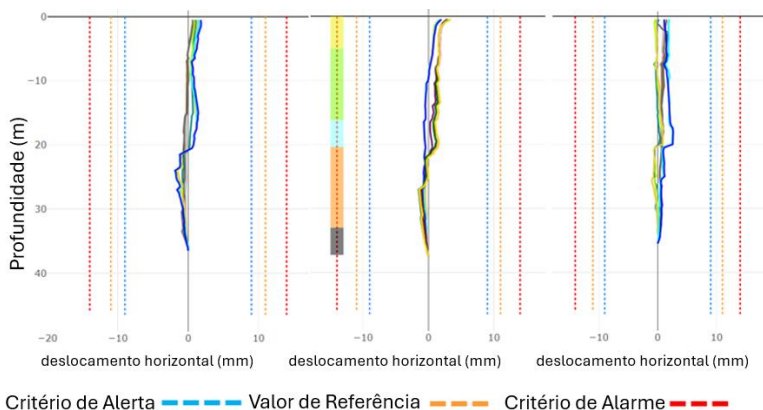


Figura 8. Monitorização: Inclinómetros – Deslocamento horizontal

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Escavações subterrâneas podem conduzir a assentamentos à superfície do terreno que podem colocar em causa a integridade dos edifícios, especialmente caso estes já apresentem patologias estruturais. O uso de modelos numéricos para estimativa da bacia de assentamentos, combinada com a aplicação da metodologia de Burland (1997) é essencial na avaliação do potencial de danos e da necessidade de implementar medidas de reforço. Para cenários extremos, como o apresentado, uma solução de recalçamento poderá assegurar a manutenção da integridade do edifício apesar deste tipo de intervenção ser onerosa e com implementação bastante condicionada em termos de acessibilidade de equipamentos. A implementação de um adequado Plano de Monitorização é fundamental para confirmar, durante os trabalhos de escavação subterrânea, a eficácia do sistema de recalçamento na transferência de carga do edifício e consequentemente a mitigação dos potenciais danos originados por assentamentos diferenciais.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Metropolitano de Lisboa a autorização para a redação do presente artigo. Destacam ainda que os trabalhos descritos foram projetados pelo consórcio que integra as empresas COBA e JETsj e que se encontram a ser realizados pelo agrupamento constituído pelas empresas Mota Engil e Spie Batignolles. A fiscalização dos mesmos trabalhos é, por sua vez, assegurada pelo consórcio que integra as empresas Consulgal e Tecnoplano.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burland, J.B. (1997). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. *Earthquake Geotechnical Engineering*, Balkema, pp. 1189-1201