



Análise Numérica 3D e Critérios do Projeto de Fundação Profunda de um Edifício Sobre a Linha 4 do Metro de São Paulo.

Dirney Cury Filho

Gerente Técnico, G2Base Fundações e Contenção, São Paulo-SP, Brasil, dirney.cury@gmail.com

José Luiz de Paula Eduardo

Sócio Diretor, Apoio Assessoria e Projeto de Fundação, São Paulo-SP, Brasil, apoioapf@terra.com.br

Alline Evangelista Silva

Coordenadora de Projetos, Apoio Assessoria e Projeto de Fundação, São Paulo-SP, Brasil, alline.ev@gmail.com

David de Carvalho

Professor, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo-SP, Brasil, d33c@uol.com.br

Rodrigo Belli Vieira

Engenheiro Geotécnico, Apoio Assessoria e Projeto de Fundação, São Paulo-SP, Brasil, ro.belli.vieira@gmail.com

RESUMO: Recentemente tem sido cada vez mais frequente a construção de edifícios, comerciais e residenciais, próximos de estruturas metroviárias subterrâneas em fase de implantação ou operação. Esta proximidade, em alguns casos, implica necessidade de os empreendedores demonstrarem que a implantação destas edificações não causará interferências físicas ou danos nas estruturas metroviárias decorrentes da execução de suas escavações ou carregamento das fundações. No presente trabalho é apresentado o caso de um empreendimento de uso misto em que parte das fundações foram projetadas e executadas sobre a projeção do túnel de via da Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo. São apresentadas as principais características do edifício e seus projetos de escavação e fundações, bem como as análises realizadas, previamente à execução da obra, para avaliação dos impactos de sua construção nas estruturas metroviárias existentes sob o terreno. Adicionalmente são apresentados o sistema de monitoramento geotécnico implantado para o acompanhamento do comportamento do maciço e da estrutura do túnel e os resultados observados ao longo da implantação da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Hélice Contínua, Modelagem Numérica, Metro.

ABSTRACT: Lately, the construction of commercial and residential buildings in close proximity to underground metro structures, whether under construction or in operation, has become increasingly common. This proximity, in some cases, necessitates that developers demonstrate that the establishment of these buildings will not cause physical interference or damage to the metro structures due to excavation or foundation loading. This paper presents the case of a mixed-use development where a portion of the foundations were designed and executed over the projection of the tunnel for Line 4 - Yellow of the São Paulo Metro. The main characteristics of

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



sefe 10

the building, its excavation and foundation projects are presented, as well as the analyses conducted prior to the execution of the project to assess the impacts of its construction on the existing metro structures beneath the site. Additionally, the implemented geotechnical monitoring system is described, which tracks the behavior of the massif and tunnel structure, along with the observed results during the implementation of the project. Resumo do artigo na lingua inglesa seguindo as mesmas regras do RESUMO em português.

KEYWORDS: Continuous Auger Pile, Mathematical Modelling, Metro,

Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Em grandes metrópoles, uma alternativa para mobilidade urbana com baixo impacto nas vias públicas é a adoção de transporte público subterrâneo, denominado Metrô. A cidade de São Paulo vem, constantemente, expandindo suas linhas de Metrô nas últimas décadas para locomoção diária de sua população.

Neste artigo é apresentado um caso de obra imobiliária de uso misto, com 28 pavimentos e 1 subsolo, onde foram previstas fundações profundas sobre a projeção do túnel de via do Metrô da Linha 4 - Amarela na cidade de São Paulo. As estacas adotadas em projeto foram do tipo hélice contínua, sendo que parte delas tiveram sua cota de ponta locada a cerca de 5,0 m acima da geratriz superior (calota) do túnel.

Adicionalmente, apresentam-se a análise tridimensional através do método dos elementos finitos realizada por consultor geotécnico especializado da Themag Engenharia, com o objetivo de estimar o desempenho das fundações e avaliar o acréscimo de esforços e deslocamentos na estrutura do túnel de via. Também são apresentados o sistema de monitoramento implantado para o acompanhamento das obras e os seus principais resultados frente às estimativas feitas previamente.

2 Características da Obra

O empreendimento Haus Mitre Dráusio localizado no bairro do Butantã, zona oeste da cidade de São Paulo, consiste em uma edificação de uso misto, ou seja, parte comercial e parte residencial, composto por um único edifício com 28 pavimentos e um subsolo.

A cota natural do terreno na área do edifício varia entre 732,2 e 732,8 m, sendo seu subsolo com o fundo da escavação na cota 728,0 m. Parte das fundações foram projetadas e executadas sobre a projeção da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo, que liga a zona oeste ao centro da cidade, entre as estações São Paulo - Morumbi e Butantã. A Figura 1 apresenta a localização do empreendimento sobre a projeção da Linha 4 Amarela existente.



Figura 1. Localização do empreendimento e projeção da Linha 4 - Amarela do Metrô de São Paulo (relatório Themag).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.1 Perfil Geológico / Geotécnico

De acordo com as sete sondagens a percussão realizadas no local de implantação do edifício para o desenvolvimento do projeto executivo das escavações e fundações, o subsolo local é composto por, inicialmente, uma camada superficial de aterro de, no máximo, 2,0 m de espessura seguida por uma camada de solo residual caracterizado como argila silto-arenosa mole, com valores de índice N_{SPT} da ordem de 2 golpes/30 cm. Sotoposto a ela foi identificada camada composta por silte arenoso pouco a muito argiloso e presença de fragmentos de rocha após, aproximadamente, 20,0 m de profundidade e valores de índice N_{SPT} crescentes ao logo da profundidade, superando 50 golpes/30 cm nos últimos metros das sondagens.

O túnel da Linha 4 – Amarela neste trecho encontra-se, de maneira geral, entre as camadas D e E (Figura 2), inserido quase totalmente em gnaisses do embasamento pré-Cambriano, conforme investigações geológico-geotécnicas realizadas para subsidiar os projetos de escavação e contenção do empreendimento e corroboradas pelas informações obtidas durante a fase de construção desta linha.

A Figura 2 apresenta o perfil geológico-geotécnico esquemático da área do empreendimento. Abaixo da camada E indicada, observa-se a ocorrência de rocha sã.

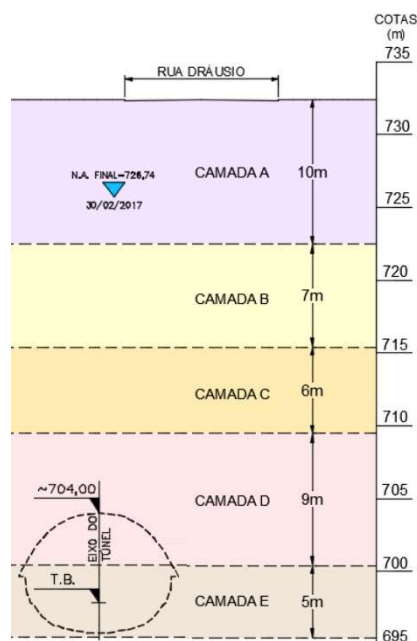


Figura 2. Perfil geológico / geotécnico da região do empreendimento.

Na Tabela 1 estão indicados os parâmetros geomecânicos típicos e caracterização dos solos e rochas da região, empregados nas análises numéricas apresentadas no item 3.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Tabela 1. Parâmetros geotécnicos das camadas.

Camada	Índice N _{spt} golpes/30cm	Peso específico γ (kN/m ³)	Coesão c (kPa)	Ângulo de atrito ϕ (graus)	Módulo de deformabilidade E (MPa)	Coefficiente de Poisson ν (-)	K _o Coeficiente de empuxo em repouso (-)	
A	Aterro/Solo residual	<10	17	20	26	50	0,35	0,7
B		10-20	18	30	28	75	0,33	0,7
C	Solo residual	20-30	18	40	27	150	0,33	0,7
D		>40	18	30	32	250	0,25	0,7
E	Rocha alterada	impenetrável	20	80	35	1000	0,23	0,7
F	Rocha Sã	impenetrável	21	200	43	8000	0,20	0,7

2.2 Projeto de Fundação e Execução

Considerando-se a profundidade do subsolo projetado e as condições geológico-geotécnicas superficiais foi adotada uma contenção de solo no perímetro do terreno, para permitir os serviços de escavação em segurança, com perfis metálicos cravados de 9,0 m de comprimento, tipo W250 X 32,7, associados a pranchas de madeira

As estacas foram dimensionadas através do método semiempírico proposto por Alonso (2008), que leva em consideração o tipo de solo, os índices N_{SPT} das camadas, diâmetro e método executivo dos elementos fundação.

Para a obra em questão foram dimensionadas estacas com diâmetros variando entre 0,5 e 1,0 m, e cargas na faixa de 1.000 kN a 3.000 kN. O comprimento das estacas, sobre a projeção do túnel, conforme projeto é de 19 m, sendo sua ponta apoiada na cota de nível 709,0 m, resultando distância de, aproximadamente, 5,0 m da geratriz superior (calota) do túnel. Sobre o túnel as estacas têm diâmetros entre 0,70 e 1,00 m.

Considerando-se a metodologia de cálculo empregada e os comprimentos resultantes, estimou-se que as estacas trabalhariam predominantemente por atrito lateral, sendo 85% da carga total resistidos pelo fuste e apenas 15% pela ponta das estacas. Os critérios de dimensionamento e fatores de segurança seguiram a NBR 6122 (ABNT, 2022).

A execução da obra geotécnica foi dividida em 3 etapas, sendo a primeira etapa a cravação dos perfis metálicos da contenção das escavações do subsolo previsto. Na segunda etapa foram realizadas as escavações em nichos alternados com utilização de pranchada de madeira entre perfis até a cota de nível do subsolo, a saber 728,6 m. A terceira etapa contemplou a execução das estacas tipo hélice contínua, conforme dimensões previstas em projeto e mencionadas anteriormente.

Após a execução das fundações teve início a construção da estrutura do edifício, sendo que as lajes dos pavimentos foram concretadas ao longo de 12 meses, aproximadamente, e esta foi a etapa mais crítica, quando ocorreu o carregamento das estacas das fundações, com aumento sucessivo da mobilização do maciço com acréscimo de tensões e indução de acréscimo de esforços na estrutura do túnel existente. Nas Figuras 3 (a) e (b) são apresentadas imagens da execução das estacas tipo hélice contínua, após escavação do subsolo.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Figura 3. (a) Detalhe da execução da estaca hélice e (b) Vista aérea da obra

3 Modelagem Numérica 3D

Foi realizado estudo a partir de análise tridimensional, solucionada pelo método dos elementos finitos, utilizando-se o programa MIDAS GTS, que permite a simulação das etapas de maneira sequencial e evolutiva. A adoção deste tipo de modelo teve por objetivo avaliar com maior precisão o comportamento estimado do maciço quanto à distribuição das tensões no maciço sobre a calota, decorrente do carregamento assimétrico provocado pelas fundações do edifício. Os resultados também permitiram avaliar a variação dos esforços e dos deslocamentos da estrutura do túnel, levando em consideração o desempenho geotécnico da fundação para dois cenários distintos de distribuição do carregamento entre fuste e ponta das estacas. O empreendimento Haus Mitre Dráusio localizado no bairro do Butantã, zona oeste da cidade de São Paulo, consiste em uma edificação

Nas simulações foram adotados parâmetros geotécnicos usualmente empregados para o tipo de maciço, de acordo com a experiência do consultor responsável, e utilizado modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb para representar o comportamento dos solos e elástico linear para as estruturas em concreto.

As Figuras 4 (a) e (b) apresentam o modelo desenvolvido, indicando a posição relativa das fundações do edifício e o túnel de via.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



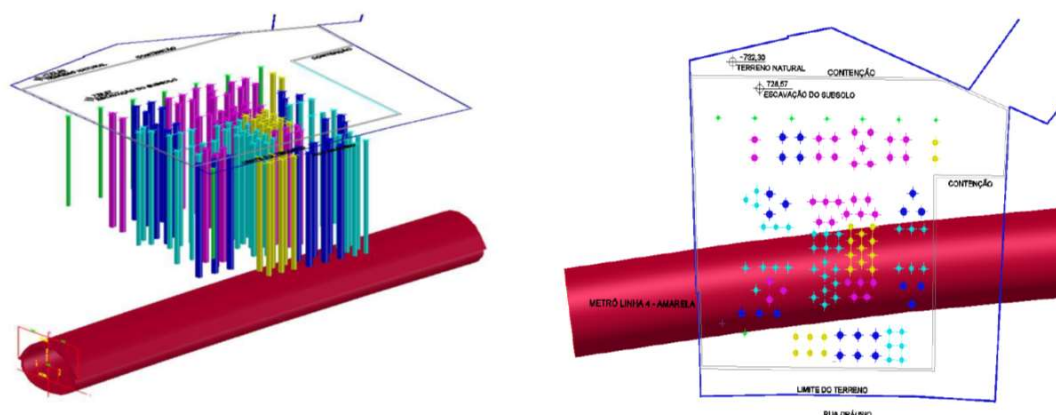


Figura 4. (a) Vista esquemática do modelo numérico (Relatório Themag) e (b) Projeção das estacas e do túnel.

O modelo numérico representou três etapas principais para análise do problema, sendo elas: (i) estado de tensões no maciço e carregamento da estrutura antes do início da construção do edifício, (ii) escavação do subsolo do edifício e alívio do maciço e (iii) carregamento do maciço decorrente da construção do edifício (fundações e torre).

Para as simulações numéricas foram definidos dois modelos de cálculo com cenários distintos em relação à distribuição das parcelas de carga entre fuste e ponta das estacas. Um primeiro modelo, mais próximo das estimativas de capacidade de carga realizadas em projeto, considerou 75% da carga distribuída ao longo do fuste e os 25% restantes aplicados à ponta das estacas. Já para o segundo modelo, mais conservador, foi feita a consideração de que apenas 25% da carga da estaca seria resistida pelo atrito lateral e o restante pela ponta.

Os resultados dos modelos indicaram deslocamentos verticais máximos, na calota do túnel, variando entre 5 e 7 mm, correspondendo a distorções máximas pontuais, longitudinais ao revestimento do túnel, da ordem de 1:3330 e 1:2330, respectivamente. Em relação às variações dos esforços no revestimento do túnel, os modelos mostraram significativo aumento das cargas axiais e ligeira redução dos momentos fletores, porém dentro da envoltória de resistência da estrutura, com fatores de segurança adequados, ou seja, sem riscos de rupturas ou mesmo danos significativos.

Portanto, as avaliações analíticas iniciais e a modelagem numérica mostraram que a implantação da obra e os impactos por ela causados não trariam danos à integridade da estrutura do túnel e que as variações dos esforços solicitantes ainda estariam dentro de faixa admissível em termos de resistência, com níveis de segurança adequados, mesmo para o cenário mais conservador considerando nas análises. A Figura 5 ilustra a malha utilizada na modelagem numérica realizada.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



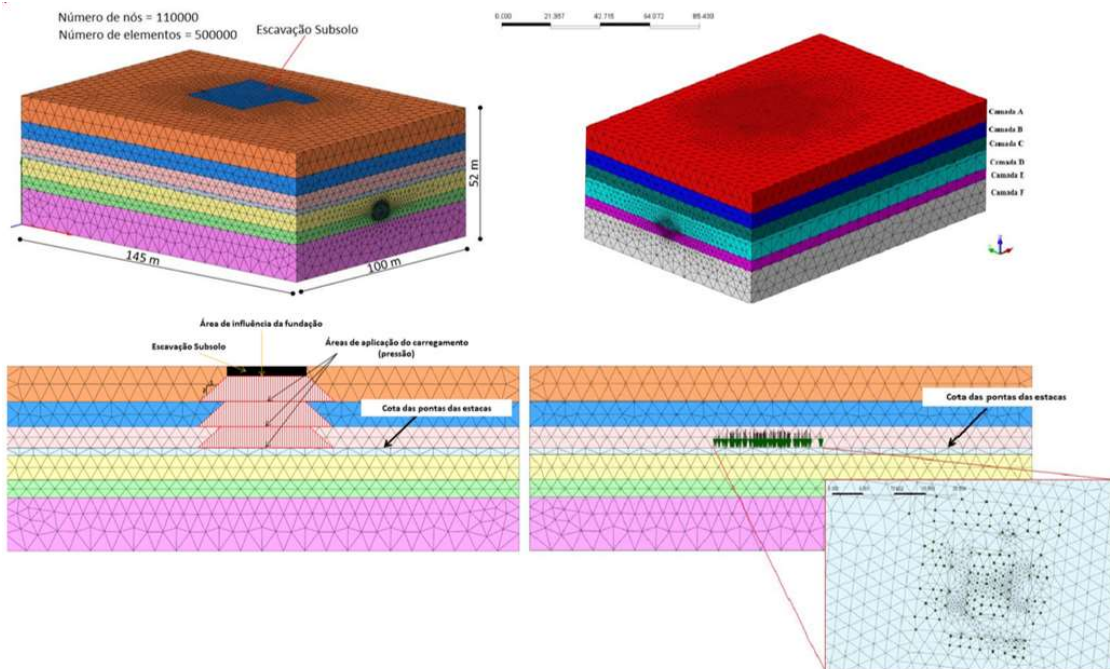


Figura 5. Modelo utilizado na análise numérica (Relatório Themag).

4 Instrumentação Geotécnica e Monitoramento

Uma das recomendações frequentes em casos análogos é a adoção de sistema de monitoramento do comportamento do maciço e das estruturas de túneis através de instrumentação geotécnica, além de vistorias frequentes para inspeção das estruturas sujeitas a impactos decorrentes da implantação de empreendimentos próximos.

Para o presente caso foi proposto e implementado sistema de monitoramento com a execução de tassômetros multinível, posicionados entre a ponta das estacas e a calota do túnel, pinos de recalque na estrutura do edifício, marcos reflexivos e fissurômetros para acompanhamento de fissuras e trincas pré-existentes, no interior do túnel,

A principal finalidade do sistema de monitoramento instalado, como em diversos casos de obras geotécnicas, foi observar as tendências de comportamento e movimentações do maciço, do edifício e da estrutura do túnel, e sua aderência frente às estimativas obtidas nas análises realizadas previamente. Além disso, através dos fissurômetros foi avaliado o possível aumento na espessura das fissuras e trincas pré-existentes no revestimento do túnel. As Figuras 6 (a) e (b) apresentam um marco reflexivo instalado no teto do túnel para medição de convergência e um fissurômetro para acompanhamento da abertura da fissura, respectivamente.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Figura 6. (a) Marco refletivo instalado no teto do túnel para medição de convergência e (b) Fissurômetro para acompanhamento de fissuras.

Os valores de referência adotados para o acompanhamento da instrumentação foram definidos a partir dos modelos numéricos desenvolvidos e apresentados no parecer de avaliação do consultor geotécnico especializado. Estabelecer estes valores previamente é fundamental para permitir a avaliação contínua do comportamento esperado e definir medidas de contingência, se necessárias, caso sejam ultrapassados ou atingidos prematuramente.

A frequência de leitura dos instrumentos variou durante as fases da obra, sendo intensificada, principalmente, na etapa de construção da estrutura do edifício em si, quando houve a mobilização crescente das estacas e aumento da transferência das cargas das estruturas para elas e, conseqüentemente, para o maciço e o túnel.

Os resultados observados através das medidas dos diversos instrumentos instalados, conjuntamente com as vistorias regulares e acompanhamento dos fissurômetros, mostraram valores dentro do comportamento previsto e esperado, permitindo o prosseguimento da obra dentro dos níveis de segurança necessários.

De maneira geral, os resultados da instrumentação indicaram valores inferiores aos previstos pelos modelos de cálculo, apresentando deslocamentos na calota do túnel muito baixos e magnitudes da ordem de grandeza a acurácia e precisão dos equipamentos utilizados para realização das medições – estação total e nível. As variações dos comprimentos das cordas das seções monitoradas do túnel também se mostraram pouco significativas.

Os recalques dos tassômetros indicaram a mobilização do maciço, atingindo valores de até cerca de 10 mm para os pontos a 11 m de profundidade e relativamente inferiores, da ordem de 4 mm, para os níveis mais profundos. De certa forma este comportamento é condizente com o esperado, visto que há tendência de espraiamento dos acréscimos de tensões no maciço com o aumento da profundidade.

Já os pinos de recalques instalados na estrutura da edificação mostraram deslocamentos verticais máximos de até 10 mm, quando aquela atingiu sua máxima altura.

5 Conclusões

Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Os resultados do sistema de instrumentação instalado para acompanhamento do comportamento do maciço e da estrutura do túnel de via existente sob o empreendimento construído, corroboraram as análises preliminares e modelagens numéricas desenvolvidas para avaliação do problema. A implantação do empreendimento ocorreu sem implicar danos ou impactos significativos nas estruturas metroviárias existentes, conforme esperado. O trabalho mostra a importância da realização de avaliação e análise rigorosas prévias em casos críticos como o apresentado, em que novas construções são implantadas nas proximidades de estruturas metroviárias subterrâneas.

AGRADECIMENTO

A elaboração do presente trabalho contou com a colaboração da Mitre Reality Empreendimentos e Participações, e das empresas Themag Engenharia e Reconverte Planejamento e Projetos, responsáveis pela elaboração do parecer de avaliação da influência da implantação do empreendimento imobiliário sobre o túnel de via da Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo e pelo monitoramento do sistema de instrumentação geotécnica instalada, respectivamente. Para o desenvolvimento dos trabalhos de avaliação e acompanhamento foi necessário o apoio direto do Metrô de São Paulo, no fornecimento das informações técnicas necessárias a respeito dos projetos de suas estruturas, e do Consórcio Via Quatro, responsável pela operação da Linha 4 - Amarela, na viabilização dos acessos para vistorias e acompanhamento da instrumentação instalada no interior do túnel de via.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, U. R. Estacas hélice contínua com monitoramento eletrônico: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3., 1996, São Paulo. Anais. São Paulo: ABMS, 1996b. v. 2, p.141-151
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. Fundações, volumes 1 e 2. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2010.
- Falconi, F.; Corrêa, C.; Orlando, C.; Schimidt, C.; Antunes, W.; Albuquerque, P.; Hachich, W.; Niyama, S. Fundações – Teoria e Prática. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 1998.
- SCODELER, B. M. G.; MAFFEI, C. E.; STUCHI, F. R. Implantação de um edifício acima de um túnel em solo. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. São Paulo, 2017.
- SCODELER, B. M. G. Os efeitos de escavações acima de túneis já existentes. 215 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- Oliveira, K. G.; Rocha, H. C.; Scodeler, B. M. G.; Robbe, G. B.; Maffei, C. E. M.; Neto, F. V. Implantação de edifício e sua interface com as estruturas metroviárias: Edifício Evaristo Comolatti - Avenida Paulista x Rua da Consolação.
- OLIVEIRA, K. G.; ROBBE, G. B.; AVESANI, P. M. R.; ROCHA, H. C. Gestão para execução de empreendimentos lindeiros às estruturas metroviárias em operação. Estudo de caso: Edifício Grande Ufficiale Evaristo Comolatti - Avenida Paulista x Rua da Consolação. 23º Semana de Tecnologia Metroviária. São Paulo, 2017.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

