

DESAFIOS PARA OCUPAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO URBANO

CHALLENGES ON THE OCCUPATION OF THE UNDERGROUND URBAN SPACE

GISLEINE COELHO DE CAMPOS

Engenheira Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, gisleine@ipt.br

WILSON SHOJI IYOMASA

Geólogo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, wsi@ipt.br

DANIEL SEABRA NOGUEIRA ALVES ALBARELLI

Geólogo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, dseabra@ipt.br

PAULA SAYURI TANABE NISHIJIMA

Geóloga, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, ptanabe@ipt.br

FELIPE SCHAEFER SANTOS

Geólogo, Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, felipess@ipt.br

RESUMO ABSTRACT

O uso e ocupação do subsolo da metrópole paulista apresenta um crescimento indisciplinado em face à intensa utilização do espaço superficial ao longo dos anos. Ocorrências deletérias envolvendo as obras no subsolo podem resultar em impactos negativos na superfície, tanto sob o ponto de vista econômico quanto de segurança. O cadastro das interferências existentes no subsolo paulistano ainda é incipiente, e leis como a Lei Nº 16.255/2015 tentam dirimir este problema por meio da criação de bancos de dados georreferenciados, contendo detalhes dos projetos da infraestrutura urbana. Como orientação do *Emerald Book*, destaca-se a importância do compartilhamento de informações entre Empreiteiros, Contratantes e Projetistas de diferentes empreendimentos. Em contrapartida, apesar da evolução dos métodos investigativos, não é visto no país um conjunto de diretrizes que possa orientar, de forma quantitativa, a elaboração de Planos de Investigação para a elaboração de projetos de empreendimentos em subsuperfície. Este artigo não almeja estabelecer novos parâmetros quantitativos, mas apontar a necessidade de flexibilidade quanto à programação das investigações correlacionadas à cada fase de projeto. A existência de um GBR (*Geotechnical Baseline Report*), atrelado ao contrato, estimula o contratante a dedicar parte dos custos de construção (de 3 a 10%, em geral) às investigações mais completas acerca das condições do maciço

The use and occupation of the subsoil in São Paulo city present an unorganized growth in face of the intense occupation of surface space over the years. Deleterious occurrences involving underground works can result in negative impacts on the surface, both from an economic and safety point of view. The registration of existing interferences in the São Paulo underground is still incipient, and laws such as Law No. 16,255/2015 try to solve this problem by creating a georeferenced database, containing details of urban infrastructure projects. As a guideline from Emerald Book, the importance of sharing information between Contractors and Designers of different projects is highlighted. On the other hand (despite the evolution of investigative methods), there isn't a set of guidelines that can guide, in a quantitative way, the elaboration of Investigation Plans for projects in the subsurface. This article does not aim to establish new quantitative parameters but to point out the need for flexibility regarding the scheduling of investigations correlated to each project phase. The existence of a GBR (*Geotechnical Baseline Report*), linked to the Contract, encourages the Contractor to dedicate part of the construction costs (from 3 to 10%, in general) to more complete field investigations site of the construction and its surroundings. In order to predict and avoid possible negative impacts arising

do sítio de instalação do empreendimento e de suas imediações. Para prever e evitar possíveis impactos negativos decorrentes da construção de empreendimentos no subsolo, a instalação de uma campanha de instrumentação geotécnica também se faz necessária. No entanto, no Brasil, a definição de níveis de referência destes instrumentos e a metodologia de leitura carecem de uma atenção especial, principalmente em relação às tendências de deformações do maciço, levando-se em consideração todas as etapas da obra, inclusive antes do início das escavações. Ressalta-se que se faz premente a evolução nos conceitos de Investigações do Subsolo e Instrumentações Geotécnicas, relacionando-as a um banco de dados de interferências georreferenciado e consistente, de fácil acesso e que possa ser consultado pelos responsáveis dos empreendimentos estabelecidos no subsolo.

Palavras-chave: Investigação do Subsolo; Espaço Subterrâneo; Túnel; Instrumentação

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios- PNAD, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), a maior parte da população brasileira, aproximadamente 85%, vive em áreas urbanas. Quando se analisam os dados apenas da região sudeste do país, esse percentual supera 93%. Esse intenso processo de urbanização no Brasil gerou o fenômeno da metropolização (ocupação urbana que ultrapassa os limites das cidades) e, consequentemente, o desenvolvimento de grandes centros metropolitanos, como o de São Paulo.

O adensamento urbano requer investimentos em infraestrutura, que envolvem desde a construção de redes de água, esgoto, energia elétrica, meios de transporte e até vias públicas com capacidade de absorver o tráfego de veículos de carga e de passeio. Em face da intensa ocupação do espaço superficial e da necessidade cada dia maior de soluções sustentáveis e integradas ao meio ambiente, cresce o uso e ocupação dos espaços subterrâneos. Adutora de água tratada, interceptores de esgotos, túneis de linhas metroviárias, estacionamentos, galerias de águas pluviais, entre diversas outras estruturas, passam a disputar o espaço subterrâneo de grandes centros urbanos.

from the construction of underground projects, the installation of a geotechnical instrumentation program is also necessary. However, in Brazil, the definition of reference levels for these instruments and the reading procedures require special attention, mainly in relation to the deformation trends of the soil, taking into account all stages of the work, including the phase before the excavations works. It should be noted that there is an urgent need for evolution in the concepts of Subsoil Investigations and Geotechnical Instrumentation, through a georeferenced and consistent interference database, easily accessible and that can be consulted by those responsible for undertakings established underground.

Keywords: *Subsurface Investigation; Underground Space; Tunnel; Instrumentation*

Em termos de regulamentações, tem-se o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo, de 31 de julho de 2014 (PMSP, 2014), que orienta o desenvolvimento e o crescimento da cidade de forma planejada. O Plano Diretor se destaca no sentido de orientar a política de ordenamento e expansão das cidades, visando atender às necessidades coletivas de toda a população, e garantir uma cidade mais equilibrada, inclusiva, ambientalmente responsável e com qualidade de vida. As leis, associadas às restrições e necessidades construtivas, acabam moldando muito a arquitetura das cidades e das edificações, tanto em forma estética, quanto em função.

Além do Plano Diretor, destaca-se o Estatuto das Cidades (última atualização em fev/2008), o qual especifica, em seu artigo 21, que o “*direito de superfície abrange o direito de utilizar o solo, o subsolo ou o espaço aéreo relativo ao terreno, na forma estabelecida no contrato respectivo, atendida a legislação urbanística*”. No entanto, nesses documentos não constam diretrizes e orientações para o uso do subsolo, diferentemente do que ocorre para os espaços em superfície (Bitar et al. 2000). Esse problema já fora reportado por alguns autores; Campos et al. (2006) destacaram que, para enfrentar a crescente demanda de infraestrutura, seria necessário que

“[...] o Poder Público promova as regulamentações legais e um plano diretor, fundamentados nas características geológico-geotécnicas locais e no desenvolvimento de pesquisas geotecnológicas nas universidades e institutos de pesquisa, sob o conceito da sustentabilidade.”

Passados mais de 16 anos da publicação supracitada, verifica-se que poucos foram os avanços no sentido de disciplinar o uso do espaço subterrâneo e, como resultado, verifica-se o crescente número de ocorrências deletérias envolvendo obras subterrâneas, com consequentes impactos na vida em superfície. Campos & Iyomasa (2014) destacam algumas das lições aprendidas com as ocorrências em meio urbano, destacando o importante papel da investigação das características geológico-geotécnicas do subsolo.

Como exemplos de impactos negativos de problemas com obras subterrâneas na cidade de

São Paulo, pode-se citar o recente colapso parcial das obras da Linha 6 do metrô (**Figura 1**), que interrompeu o tráfego em uma das vias mais movimentadas da cidade por alguns dias e, também, uma cavidade aberta em via pública em decorrência do rompimento de uma adutora (**Figura 2**). Outros casos podem ser encontrados em bibliografia técnica, destacando-se Campos et al. (2000, 2008 e 2014), com relatos de casos na cidade de São Paulo e suas principais lições para o meio técnico.

Faz-se, portanto, premente que haja um disciplinamento do uso do subsolo e em particular, diretrizes para investigação e análise do comportamento dos maciços de solos e rochas, temas esses discutidos no presente artigo para obras de túneis rodoviários e metroferroviários.



Figura 1 – Vista aérea da região do colapso das obras da Linha 6 do metrô de São Paulo. Fonte: Portal G1 (2022).
Data de publicação da matéria: 09/02/2022.



Figura 2 – Vista de cavidade aberta em via pública. Fonte: Portal G1 (2020). Data de publicação da matéria: 07/12/2020.

2. SÃO PAULO EM NÚMEROS

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2015) indicam que a cidade de São Paulo ocupa uma área territorial superior a 1,5 mil km², abrigando uma população que supera 12 milhões de habitantes. Com Índice de Desenvolvimento Humano – IDH da ordem de 0,8, São Paulo ocupava o 28º lugar no ranking das cidades brasileiras no ano de 2010.

Para atender esta imensa população, milhares de quilômetros de redes e diversas estruturas subterrâneas são encontrados no município. Como exemplo, dados do IBGE (2022) indicam

que mais de 93% da população conta com sistema de esgotamento sanitário, o que exige a presença de milhares de quilômetros de coletores, emissários e interceptores.

A **Tabela 1** apresenta alguns dados numéricos de consumo e de redes de infraestrutura da cidade, evidenciando o quão importante se faz o uso e ocupação do espaço subterrâneo para a ampliação dos diferentes sistemas e, também, para maior conforto ambiental e segurança aos moradores. Já a **Tabela 2** sumariza os dados das redes do metrô, no ano de 2022, sob operação da Companhia do Metropolitano de São Paulo.

Tabela 1 – Redes de infraestrutura (água, gás e energia) em São Paulo.

Água	
Adutoras	1,6 mil quilômetros
Redes de distribuição de água	44,8 mil quilômetros
Esgoto	
Redes coletoras de esgotos	31,1 mil quilômetros
Coletores, emissários e interceptores	583,1 mil quilômetros
Energia*	
Energia Elétrica	25,28 TWh
Gás Natural	1.122x10 ⁶ m ³
Etanol Hidratado	1.807 milhões de litros
Emissão de CO ₂	11.970x10 ³ toneladas/ano
(*) Dados da Região Metropolitana de São Paulo	

Fonte: SABESP (2022) e SIMA (2022).

Tabela 2 – Números da rede metroviária operada pelo Metrô de São Paulo.

Características	Linha 1 Azul	Linha 2 Verde	Linha 3 Vermelha	Linha 15 Prata	Rede
Início da Operação Comercial	1974	1991	1979	2015	
Número de Estações	23	14	18	11	63
Extensão atual das linhas (km)	20,2	14,7	22,0	14,5	71,4

Fonte: Metrô (2022).

Os números acima apontados mostram o crescimento da ocupação do subsolo sob a metrópole de São Paulo ao longo do tempo, que resulta no cruzamento de diferentes redes e estruturas ao longo da profundidade; nessa situação, eventuais acidentes na fase de construção ou de operação de novas estruturas subterrâneas representam riscos elevados e que precisam ser mitigados ainda na fase de concepção dos projetos, por meio de investigações detalhadas que permitam caracterizar e estimar as resistências e deformabilidades dos maciços de solo.

Considerando-se obras de maior porte, geralmente associadas aos sistemas rodoviários e metroferroviários, que atingem profundidades mais elevadas do que às das redes de serviços de água, esgotos, gás, energia e internet, esse artigo foca nos critérios de investigação do subsolo e seus impactos no gerenciamento dos riscos das obras.

3. IDENTIFICAÇÃO E CADASTRO DE INTERFERÊNCIAS

Num contexto em que há uma elevada densidade de estruturas e redes enterradas, a existência de um sistema único de cadastro das interferências se faz necessária. Alguns órgãos e instituições ligadas à construção de obras de infraestrutura dispõem de diretrizes próprias que orientam a execução do cadastro. A Instrução de Projeto IP-DE100/001 do DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT 2005) define e padroniza os procedimentos para o cadastramento de interferências, como redes de infraestrutura e abastecimento, em áreas de interesse à execução de rodovias e obras afins. As interferências podem apresentar-se de diversas formas, devendo-se cadastrar todas aquelas que influenciam

o projeto que será implantado, como, por exemplo, galerias, dutos, caixas, cabos etc.

Para o caso de obras no sistema de água e esgoto, a Sabesp apresenta uma norma técnica própria para identificação de possíveis interferências: a Norma Técnica Sabesp 112 – Cadastro de Interferências Subterrâneas – de agosto de 2016. A norma tem como objetivo disciplinar “o levantamento das instalações subterrâneas da Sabesp e de concessionárias de serviços públicos para definir a posição, ocupação e profundidade das mesmas, a fim de permitir o desenvolvimento de projetos ou execução de obras lineares em sistemas de água e esgoto”.

No município de São Paulo, até o ano de 2015 o cadastro de obras públicas era realizado junto ao Departamento do Controle e Cadastro de Infraestrutura Urbana (CONVIAS), que dentre suas atribuições, realizava a verificação de interferência dos projetos submetidos com a rede existente, bem como com os demais projetos que estavam em processo de planejamento ou aprovação. Ressalta-se que nesse período, os documentos fornecidos, em geral, eram em formato físico, o que dificultava e onerava a catalogação das obras.

Nessa conjuntura, o município de São Paulo instalou a lei N° 16.255, de 10 de setembro de 2015, que altera a Lei n° 13.614, de 2 de julho de 2003, e tem como uma das diretrizes o armazenamento de informações georreferenciadas de redes de infraestrutura urbana de qualquer natureza existente e suas interferências em um cadastro único e disponível em página eletrônica da Prefeitura.

Em 26 de novembro de 2019 foi criada a plataforma GeoInfra, administrada pela CONVIAS, na qual são consolidadas as informações das redes de infraestrutura no município, tornando possível a análise das principais interferências que todas as obras dentro do município podem ocasionar. No entanto, essa plataforma depende da adesão

e adequação das concessionárias para tornar possível a análise e disponibilização dos documentos pertinentes às obras.

4. DIRETRIZES PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

O design e a construção de túneis estão intrinsecamente ligados à geologia do site de instalação, uma vez que o maciço age não só nos mecanismos de carregamento de tensões, como também como suporte primário do túnel. Nesse sentido, o solo ou rocha componente do maciço funcionam como parte do material de construção para os túneis e estacionamentos subterrâneos, refletindo na viabilidade de construção e performance da estrutura (Bickel et al. 1996).

Assim, as investigações geológico-geotécnicas da área de instalação têm por objetivo fornecer respaldo para: i) avaliar a alternativa de projeto mais adequada sob o viés técnico-econômico; ii) selecionar os métodos construtivos mais apropriados e com riscos inerentes baixos, iii) identificar os riscos associados à construção e suas medidas de mitigação, iv) além de fornecer subsídios para prever a produtividade e elaborar uma programação ou ajustar o cronograma de obra e de custo.

Segundo o documento “Diretrizes para Investigações de Campo em Projeto de Túneis” da *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA 2021), para que uma investigação de campo seja eficaz, sugere-se a realização do trabalho em etapas, com o intuito de complementar e aprimorar o conhecimento local, além de corrigir ou confirmar as previsões de etapas anteriores. Assim, um programa de prospecção do terreno não deve ser inflexível, pois o escopo, abrangência, período de investigações, quantidade e tipos de estudos geológico-geotécnicos a serem realizados, dependem do nível de incerteza e da com-

plexidade do maciço (solo e/ou rocha). Cada empreendimento exigirá uma adaptação na relação fase de projeto e fase de investigação.

As investigações de campo abrangem desde as fases de atividades prévias em escritório até as investigações diretas (como sondagens rotativas e poços de inspeção) ou indiretas (como métodos geofísicos e levantamentos aéreos), além de levantamentos topográficos, mapeamentos geológico-geotécnicos e hidrológicos e ensaios laboratoriais. As fases de projeto podem se subdividir em Estudos de Viabilidade, Projeto Preliminar/Básico e Projeto Detalhado/Final (ITA 2021). Durante a construção do empreendimento também é possível que haja algum tipo de investigação complementar, em geral para validar o modelo geológico e hidrológico, ou para prever o comportamento do maciço e das águas subterrâneas a fim de se ajustar o método construtivo, caso necessário.

Durante o início de um projeto, sua viabilidade é avaliada pelos levantamentos de dados e informações em escritório e em campo (mapeamentos geológicos/hidrológicos), que são relativamente baratos e fornecem informações de grande relevância. Por este motivo, a curva do Conhecimento vs. Custo é acentuada nesta fase (Figura 3), demonstrando a relevância da fase de investigação de campo durante os estudos de viabilidade.

Nas fases de Projeto Preliminar e Projeto Detalhado, ainda há a necessidade de adquirir informações essenciais, por meio de sondagens rotativas, ensaios de campo e laboratoriais, para a composição ou correção do projeto e sua gestão de risco. Nessa fase, o custo para adquirir o conhecimento é mais elevado do que na fase de estudos de viabilidade, mas quando bem executado contribui de forma significativa na confiabilidade do conhecimento do maciço transposto (Figura 3).

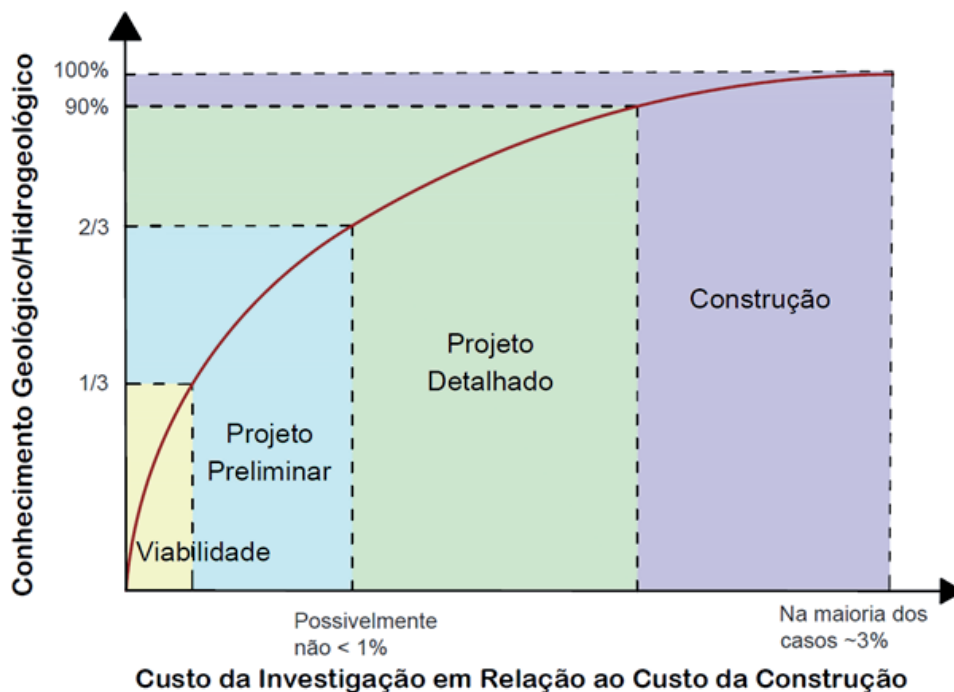


Figura 3: Curva esquemática da relação Conhecimento vs. Custo. Fonte: ITA (2021). Editado.

Em alguns estudos de caso, como citado em ITA (2021), o orçamento para uma investigação de campo em obras de grande porte corresponde, aproximadamente, a 3% do custo total da obra, podendo aumentar de 8% a 10%, a depender da complexidade da obra, do maciço e da função do empreendimento (uso nuclear, por exemplo).

Apesar da relevância das investigações de campo nas fases de projeto supracitadas, um quantitativo mínimo não é estabelecido em norma ou diretriz nacional. Apesar das diretrizes elaboradas pela ITA (2021), também não existem normas que indiquem a profundidade mínima, o espaçamento entre as investigações ou as particularidades do método de escavação e o melhor método de investigação a que deve estar associado. Nos Estados Unidos, o Conselho Nacional de Pesquisa (*National Research Council* 1984), determina, por exemplo, que para melhores resultados gerais, as sondagens deveriam aumentar seu espaçamento linear (profundidade) para entorno de 0,45 m de sondagem para cada 0,30 m de eixo do túnel. Este exemplo, no entanto, se aplica para túneis urbanos, e pode não ser válido para casos de

túneis cuja cobertura superior seja muito grande; em túneis profundos e de pouca extensão, as sondagens, se seguida a diretriz supracitada, podem não ter profundidade suficiente para investigar o maciço circundante ou interceptar o túnel.

Ainda neste sentido, cabe destacar que problemas com o maciço representam de 17 a 20% dos casos de atrasos no cronograma construtivo (Chapman 2012, Santos et al. 2021), tornando-se dispendiosos para o projeto. Os problemas relatados estão relacionados à incerteza quanto às condições geológicas e geotécnicas e ao comportamento do terreno durante a construção. Assim, a fim de se evitar disputas jurídicas e onerosas entorno dos questionamentos e distribuição de responsabilidades acerca dos riscos e incertezas inerentes ao maciço, foi desenvolvido nos Estados Unidos o GBR (*Geotechnical Baseline Report*), um documento contratual que estabelece pressupostos realistas em relação às condições antecipadas do subsolo. Num mesmo maciço, para cada método construtivo projetado, um novo GBR deve ser produzido, pois cada método, devido às suas peculiaridades, requer, por vezes, novas investigações focadas em determinados aspectos do maciço.

De acordo com o *Emerald Book (Conditions of Contract for Underground Works – FIDIC 2019)*, o GBR é considerado como a única fonte contratual de alocação de risco relacionada às condições físicas do subsolo para as partes envolvidas na construção, e todas as condições físicas de subsuperfície não abordadas nele devem ser consideradas imprevisíveis (além da fronteira do conhecimento técnico), e os riscos associados à imprevisibilidade do maciço são imputados ao Contratante. A orientação do *Emerald Book* é de que o GBR deve incluir “uma gama suficiente de informações proporcionais ao tamanho, natureza e complexidades do projeto e interpretações baseadas na experiência e outras fontes de informação”, sendo importante o compartilhamento de informações entre Empreiteiros, Contratantes e Projetista de diferentes empreendimentos numa mesma localidade.

Embora algumas diretrizes gerais tenham sido abordadas, de forma resumida, é visível a incipiência em relação às normas nacionais relacionadas a concepção e execução de planos de investigação de campo eficientes para um projeto específico.

5. O PAPEL DA INSTRUMENTAÇÃO

As escavações em obras subterrâneas comumente promovem alteração no estado de tensões *in-situ* no solo e relaxação em trechos específicos, a depender das técnicas construtivas empregadas e das características geotécnicas dos materiais constituintes do subsolo. Essas alterações e relaxação se traduzem em recalques no terreno, tanto em superfície quanto subsuperfície, com ordem de grandeza geralmente milimétrica, bem como na redução da resistência desses materiais.

Com o intuito de prever e minimizar os reflexos negativos destas relaxações e respectivos recalques diferenciais associados, seja nas obras subterrâneas em construção ou nas demais infraestruturas já construídas nas proximidades (edificações e vias, por exemplo), é comum e de boa prática da engenharia, projetar modelos teóricos com diferentes ferramentas e recursos. Nesses modelos são consideradas as características físico-mecânicas do terreno (solo e/ ou rocha) e das estruturas locais, de modo a se prever as deformabi-

lidades do terreno durante as diversas etapas de escavações intrínsecas ao processo construtivo.

Em complemento às previsões de projeto, são instalados instrumentos geotécnicos *in-situ* que possibilitam medir os deslocamentos “reais” do maciço e das estruturas lindeiras e, com isso, garantir que as premissas do projeto de instrumentação estejam sendo atendidas. Há uma diversidade de modelos de instrumentos, que podem ser categorizados em instrumentação externa e interna às obras de escavação. Dentre aqueles comumente usados para instrumentação externa e suas funções, pode-se citar brevemente:

- Marcos superficiais: deslocamentos lineares verticais na superfície do terreno.
- Tassômetros: deslocamento lineares verticais na subsuperfície do terreno.
- Pinos de recalques: deslocamentos verticais em estruturas lindeiras.
- Inclinômetros: deslocamentos horizontais em diferentes cotas na subsuperfície do terreno.

Dentre aqueles comumente usados para instrumentação interna e suas funções, pode-se citar brevemente:

- Extensômetros elétricos (*strain gauges*): deformação em estruturas em construção.
- Pinos de convergência: deslocamentos lineares internos às estruturas de formato circular/radial em construção.

Os projetistas de obras subterrâneas definem o arranjo espacial e localização onde os instrumentos serão instalados, o procedimento de instalação e a periodicidade de leitura para cada instrumento. Também são atribuídos valores de deslocamentos crescentes em termos de risco de instabilidade e ruptura do maciço, denominados de níveis de referência, atenção e de criticidade. Estes níveis estabelecem uma faixa de deformações que visa assegurar uma construção segura e minimizar os efeitos e impactos indesejados em outras estruturas lindeiras, seja em subsuperfície ou superfície do terreno. Caso estes limites máximos sejam ultrapassados, o modelo teórico pode ser revisitado, com a inserção ou ajuste dos parâmetros originalmente concebidos, reavaliação dos índices de deformabilidade aceitáveis (sob o ponto de vista de desempenho e segurança das estruturas impactadas) e respectivas ações de manutenção ou alteração dos processos construtivos. Em último estágio, pode-se proceder

com a suspensão das atividades construtivas até que o cenário de avanço das obras seja reavaliado como seguro.

Apesar dos avanços tecnológicos nas últimas décadas, nota-se que a instrumentação geotécnica no Brasil ainda carece de atenção especial na definição dos níveis de referência e, sobretudo, na interpretação dos resultados. Os limites de deslocamento no terreno usados para cada nível são usualmente estabelecidos de forma empírica como uma porcentagem dos deslocamentos previstos nos modelos teóricos na etapa do projeto executivo. Em casos onde o solo é constituído de material rígido com comportamento frágil, ou seja, com rupturas repentinas e com deslocamentos menores quando comparado a outros solos, estes valores deveriam ser mais conservadores (menores). Quanto à interpretação dos resultados da instrumentação, as pequenas deformações devem ser analisadas com cuidado, mesmo que estejam dentro de limites estabelecidos em projeto. É necessário observar a alteração do comportamento das leituras ao longo do tempo, sobretudo de sua aceleração, em especial em áreas intrincadas com obras subterrâneas e em solos com comportamento de ruptura frágil. Sozio et al. (1998) já alertavam que *“em solos rígidos e que apresentam comportamento frágil, a simples medição pontual dos deslocamentos não permite controle suficiente para garantir a segurança das escavações.”*

Adicionalmente, ressalta-se que em obras complexas e de longa duração, faz-se premente um programa de instrumentação que considere a integralidade dos efeitos das escavações e construções, e que permita a identificação de eventuais fragilizações do maciço. A análise dos deslocamentos acumulados ao longo do tempo pode ainda ser usada para retroalimentar o projeto do próprio empreendimento em questão e, também, contribuir com outros projetos na mesma região ou no mesmo tipo de ambiente geológico-geotécnico.

6. CONCLUSÕES

A crescente ocupação do espaço subterrâneo, com seus eventuais impactos no meio ambiente e suas implicações na qualidade de vida da população, ainda constituem desafios a serem enfrenta-

dos. O crescente uso e ocupação do espaço subterrâneo das metrópoles impõe aos profissionais de engenharia o desafio de construir novas infraestruturas sem comprometer o desempenho das já existentes, tanto em superfície como em subsuperfície. Em paralelo ao cadastramento das obras, contendo a geometria dos projetos *as built*, faz-se premente uma maior interação entre as empresas projetistas e executoras das obras, em particular no que tange ao compartilhamento de dados de investigações geológico-geotécnicas e monitoramento por meio de instrumentação específica.

As normas e diretrizes aplicadas às investigações de campo necessitam de especificidades, tanto em termos qualitativos como quantitativos. A adoção de um sistema contratual sugerido pelo Emerald Book, com utilização de um GBR consistente e direcionado para o empreendimento e seu método construtivo pode diminuir riscos e problemas, sobretudo associados às obras subterrâneas em área urbanizada, relacionados à ausência de investigação. No entanto, não supre a demanda de normas específicas para o território brasileiro e suas complexidades geotécnicas. Destaca-se ainda a importância de visitar os projetos e as memórias de cálculo sempre que houver qualquer tipo de alteração ao longo da etapa de implantação das obras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. pelo apoio às pesquisas e ao desenvolvimento de artigos técnico-científicos.

REFERÊNCIAS

- Bickel, J.O., Kuesel, T.R., King, E.H. (Eds.). 1996. Tunnel Engineering Handbook. 2. ed. Chapman & Hall, New York, 528 pp. Disponível em: <https://link-springer-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/book/10.1007/978-1-4613-0449-4#bibliographic-information>. Acesso em: 19 dez. 2022
- Bitar, O.Y., Iyomasa, W.S., Cabral Júnior, M. 2000. Geotecnologia: Tendências e Desafios. São Paulo em Perspectiva (Impresso), São Paulo, v. 14, n. 3, p. 78-90.

- Campos, G.C. & Iyomasa, W.S. 2014. Acidentes em obras Subterrâneas: principais lições aprendidas. *Rev. Fundações & Obras Geotécnicas*, v. 4, p. 54-57.
- Campos, G.C., Iyomasa, W.S., Santos, A.J.G., Martins, J.R.S., Menezes, M. 2006. O invisível espaço subterrâneo urbano. *Rev. São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, v. 20, n.1, p. 147-157.
- Campos, G.C., Iyomasa, W. S., Galli, V.L. 2014. Learning lessons from accidents on underground constructions in São Paulo city, Brazil. In: *World Tunnel Congress, 2014, Foz do Iguaçu, Proceedings...* p. 1-5.
- Campos, G.C., Iyomasa, W.S., Gramani, M.F. 2008. Uso do espaço subterrâneo urbano: o caso da cidade de São Paulo. In: *2º Congresso Brasileiro de Túneis, 2008, São Paulo*, v. 1, p. 71-74.
- Campos, G.C., Iyomasa, W.S., Hamassaki, L.T. 2000. Ruptura da frente de escavação de um túnel urbano. In: *IV Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, São Paulo*, v. 2. p. 496-50.
- Chapman, T. 2012. Geotechnical risks and their context for the whole Project. In: *Institution of Civil Engineers (ICE) Manual of Geotechnical Engineering - Volume I Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation*, p. 59-72.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 2005. Instruções de Projeto. IP-DE-100/001.
- FIDIC - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES INGÉNIEURS-CONSEILS (org.). 2019. *Conditions of Contract for Underground Works: (EMERALD BOOK)*. Nápole, Italia: Fidic, 2019. 272 pp. Em colaboração com ITA (International Tunnelling and Underground Space Association) e AITES (Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain).
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2015. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=destaques>. Acesso em 16/11/22.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. Cidades e Estados - São Paulo. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html>. Acesso em 16/11/22.
- ITA - INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION. 2021. Diretrizes para Investigações de Campo em Projetos de Túneis: Working Group 2 - Research. Avignon, França: Shoot The Moon, 2021, v. 15, 32 p. Tradução de Dra. Daniela Garroux G. de Oliveira e revisão de André Pacheco de Assis, PhD e Eloi Angelo Palma Filho, M. Eng. Publicado em parceria como Comitê Brasileiro de Túneis (CBT). Disponível em: <https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/2038/diretrizes-para-investigacoes-de-campo-em-projetos-de-tuneis>. Acesso em: 14/11/22.
- Metrô de São Paulo. 2022. Disponível em <https://www.metro.sp.gov.br/>. Acesso em 07/12/2022.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1984. *Geotechnical Site Investigations for Underground Projects: Volume 1*. Washington, DC: The National Academies Press, p. 182.
- PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. 2014. Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento. Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo. Disponível em <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/marco-regulatorio/plano-diretor/>. Acesso em 16/11/22.
- Portal G1. 2020. Rompimento de adutora provoca cratera em avenida de São Paulo. Disponível em <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/12/07/rompimento-de-adutora-provoca-cratera-em-avenida-na-zona-sul-de-sp.ghtml>. Acesso em 26.01.2023.
- Portal G1. 2022. Responsáveis por obra do Metrô têm até sexta para entregar relatório preliminar ao MP sobre abertura de cratera na Marginal.

Disponível em <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/02/09/responsaveis-por-obra-do-metro-tem-ate-sexta-para-entregar-relatorio-preliminar-ao-mp-sobre-abertura-de-cratera-na-marginal.ghtml>

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2022. Dados gerais do atendimento Sabesp na RMSP. Disponível em <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=169>>. Acesso em 17/11/22.

Santos, F.S., Iyomasa, W.S., Pereira, J.P.S. 2021. Escavação de dois túneis rodoviários em corpo único de dique de rocha básica com mais de 80 m de espessura. In: 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, São Paulo, Proceedings... p.183-192.

SÃO PAULO. Lei Nº 16.255, de 10 de setembro de 2015, que altera a Lei nº 13.614, de 2 de julho de 2003. Diário Oficial da Cidade, p. 1.

SENADO FEDERAL SECRETARIA ESPECIAL DE EDITORAÇÃO E PUBLICAÇÕES SUBSECRETARIA DE EDIÇÕES TÉCNICAS. 2008. Estatuto das Cidades. Brasília, 3ª Edição. Disponível em <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/70317/000070317.pdf>>. Acesso em 18/11/22.

SIMA - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE - GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2022. Anuário de energéticos por município no Estado de São Paulo - 2022. Ano base 2021. Disponível em https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br//portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario_energetico_municipio.pdf. Acesso em 17/11/22.

Sozio, L.E., Ferreira, A.A., Negro, A. 1998. Lições da ruptura de um túnel sob pequenos deslocamentos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Brasília: ABMS, Proceedings... p.1623-1630.