

**Critérios de escolha e monitoramento de contenções de solo em edificações
de regiões urbanizadas**

Isaac Brugnera Stefanello

Mestre, Unochapecó, Brasil.
i.stefanello@unochapeco.edu.br

Eduardo Roberto Batiston

Professor Doutor, Unochapecó, Brasil.
erbatiston@unochapeco.edu.br

Marcelo Fabiano Costella

Professor Doutor, Unochapecó, Brasil.
costella@unochapeco.edu.br

RESUMO

Existe a necessidade de estabelecer critérios para a escolha e o monitoramento de contenções de solo em áreas urbanas, visando garantir a segurança no canteiro de obras e prevenir acidentes. O objetivo do trabalho é estabelecer critérios de escolha e monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas; não se discutem contenções de taludes a céu aberto ou barragens, visto que o enfoque principal é a contribuição para o gerenciamento de regiões urbanas. O método de pesquisa buscou identificar características e definir conceitos presentes na escolha e no monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas. Uma vez estabelecidos os critérios, foram executados dois estudos de caso, monitorando-se os deslocamentos horizontais e verticais de estruturas de contenção. Os resultados quantitativos da pesquisa foram os fluxogramas de etapas e critérios de escolha e monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas. Também foi possível observar a baixa magnitude dos deslocamentos, os quais variaram entre 0,01 mm e 0,20 mm, pois não foi possível medir o deslocamento total de acomodação da estrutura, visto que o objetivo era avaliar a segurança dos trabalhadores e das edificações vizinhas durante a etapa de escavação. Conclui-se que o estudo serve de base para a aplicação dos critérios em regiões diversas, contribuindo para o gerenciamento de construções em regiões urbanizadas, incluindo desde a variabilidade de parâmetros de solo e práticas locais de estruturas de contenção de solo até a escolha de soluções adequadas no monitoramento e na coleta de dados.

PALAVRAS-CHAVE: contenções de solo, monitoramento geotécnico, critérios de escolha, segurança, critérios de monitoramento.

1 INTRODUÇÃO

A civilização tem como tendência inevitável a urbanização, reflexo do nível de industrialização da sociedade (LIU *et al.*, 2019). Com o avançar dos anos e a difusão de novas tecnologias, os limites construtivos e as altitudes máximas das edificações foram gradualmente ultrapassados. Isso possibilitou um aumento na densidade de ocupação de áreas urbanas e no crescimento vertical das construções (YU *et al.*, 2010). O crescimento da verticalização urbana é ponto de debate mundial: explora a ideia de que o aumento populacional traz consigo a demanda de uma melhor utilização do solo em relação à eficiência e à densidade, tornando-se uma questão de interesse acadêmico e profissional ao redor do mundo. Ora, construções acentuadamente verticais são consideradas viáveis do ponto de vista econômico e permitem o melhor uso da localização (PALME; RAMÍREZ, 2013), entretanto nem todas as cidades são preparadas para a expansão vertical oriunda desse novo sistema, especialmente se não levarem em conta possíveis impactos ambiental e funcional produtos da proliferação indiscriminada de prédios altos (AL-KODMANY, 2020). Nesse contexto, durante a análise de riscos e planejamento em construções de infraestrutura urbana, existe uma insuficiência na abordagem adequada dos riscos possíveis, comprometendo a tomada de decisão e a prevenção de acidentes urbanos (WOLFF; SANTOS FILHO, 2016). Quando se trata de obras de escavações, o planejamento se torna fundamental na construção e no desenvolvimento em regiões urbanizadas (AL-JAWADI; AL-DABBAGH; DAWLAT, 2021).

As obras de contenções de solo são contempladas por diversas normas técnicas, como NBR 9061 (ABNT, 1985), NBR 11682 (ABNT, 2009), NBR 8044 (ABNT, 2018) e NBR 6122 (ABNT, 2019), as quais abordam com objetividade critérios em relação a procedimentos utilizados na escavação, porém sem a função específica de determinar diretrizes na escolha e no monitoramento de contenções, o que leva os profissionais envolvidos a uma busca pautada por

variabilidade e risco. Independentemente de uma investigação geológica-geotécnica ser realizada previamente ao início das concepções de projeto, a incerteza causada pela variabilidade é algo inevitável em projetos com solos e rochas, fazendo com que o profissional defina algumas características pré-projeto que raramente condizem com as condições atuais do terreno (DUNNICLIFF; MARR; STANDING, 2012).

No que tange à escolha de contenções, existem alguns métodos e critérios já avaliados na literatura científica em diversos países: Reino Unido (GARCÍA ADROGUER *et al.*, 2015), Malásia (BALASBANEH; MARSONO, 2020) e Espanha (MUÑOZ-MEDINA, 2021), por exemplo. Os métodos avaliam indicadores de impacto ambiental, ciclo de custos, impacto social e populacional, que, por vezes, são medidas pertinentes apenas ao próprio contexto da pesquisa em que são aplicados e avaliados somente após o término da obra, porém não consideram fatores incluídos em premissas adotadas na fase de concepção do projeto geotécnico. É de suma relevância estabelecer que a escolha de contenções deve levar em conta, durante sua concepção, inúmeros fatores cruciais; além dos citados, inclusive geometria da escavação, condições do solo, presença da água, estruturas já alocadas da vizinhança, canteiro e equipamentos disponíveis, durabilidade da solução, presença de contaminantes e agressividade do meio, velocidade construtiva e de serviços necessária para a implantação, entre outros (MILITITSKY, 2016).

É importante salientar que trabalhos geotécnicos, tanto no projeto quanto na construção em si, devem: ser uma solução final que cumpra os requisitos de segurança adequada contra falhas; ter deslocamentos aceitáveis ao longo da gama de cargas aplicadas; ser duráveis durante a vida útil estabelecida permanente (CORKE; SUCKLING, 2012). Esses pontos são esperados em contenções de solo em subsolos de uma edificação, apesar de que nem toda contenção possui a função de ser permanente. Nesse caso, o monitoramento surge como um item imprescindível no quesito segurança da escavação, da estrutura e da vizinhança, além de confirmar as condições do projeto elaborado e permitir o acompanhamento do comportamento da solução ao longo do tempo (MILITITSKY, 2016; MILITITSKY *et al.*, 2019). Esses dados podem contribuir na verificação das previsões de projeto e do comportamento da estrutura (DRUSA, 2016), fato que reforça a importância do monitoramento das estruturas de contenção, assegurando não só a qualidade da solução, como também a segurança dos trabalhadores envolvidos e a manutenção preventiva da estrutura (LIENHART *et al.*, 2018). Entretanto, critérios bem definidos que relacionam a gama de soluções de monitoramento com as estruturas disponíveis ainda são material escasso na literatura científica.

O monitoramento geotécnico desempenha um papel crucial na avaliação da segurança e do desempenho de taludes. Além da investigação do solo, é essencial acompanhar as movimentações horizontais, verticais e o nível piezométrico (GERSCOVICH, 2016). A falta de informações e o desconhecimento do processo podem resultar em atrasos, aumento de custos, impacto na vizinhança e litígios prolongados. O monitoramento fornece dados quantitativos sobre o solo e estruturas adjacentes, permitindo a comparação com o desempenho esperado e a previsão de problemas futuros (GHORBANI *et al.*, 2012). Entre os benefícios técnicos do monitoramento, destacam-se a minimização de danos, a implementação do método observacional, a identificação de condições desconhecidas e a garantia de métodos construtivos (DUNNICLIFF; MARR; STANDING, 2012).

Os fatores citados reforçam a necessidade de uma abordagem objetiva de critérios fundamentais quanto à escolha e ao monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas. Tais critérios podem ser responsáveis pela confirmação de parâmetros de projetos e garantia de maior segurança no canteiro de obras, evitando acidentes – como, por exemplo, o rompimento do muro de contenção no Morro do Gavazza em Salvador (CODESAL, 2023). Além disso, as normas regulamentadoras, que apresentam deveres dos empregadores no cumprimento de garantia de segurança dos trabalhadores, possuem um papel direto na etapa de escavações de edificações; a Norma Regulamentadora NR-18 – Condições de segurança e saúde no trabalho na indústria e construção – aborda, no item 18.7.2.9: “as escavações do canteiro de obras próximas de edificações devem ser monitoradas e o resultado documentado” (BRASIL, 2020, p. 8).

Assim, o objetivo deste trabalho é estabelecer critérios de escolha e monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas no Brasil, com aplicação em estudo de caso. É importante pontuar que, mesmo discutindo a categoria “contenções”, o trabalho não possui o foco em contenções de taludes a céu aberto ou barragens, visto que nesses casos materiais científicos e procedimentos técnicos são mais presentes e fundamentados, haja vista tratar-se de obras de grande impacto.

2 MÉTODO DE PESQUISA

As etapas do método da pesquisa foram subdivididas a fim de estabelecer-se o fluxo de trabalho de pesquisa. Foram executadas duas grandes etapas: a primeira foi a elaboração dos *frameworks* com os critérios de escolha e monitoramento de contenções de solo, que contaram com revisão de literatura, experiência laboral e contato com profissionais da área; a segunda foi de aplicação e validação dos *frameworks* em um estudo de caso prático.

2.1 Proposta de critérios para escolha e monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas

2.1.1 Critérios de escolha de contenções

Os critérios de escolha de contenções de solo foram baseados, primeiramente, em pesquisa bibliográfica para identificação das soluções de contenção mais utilizadas em regiões urbanizadas adensadas em que há necessidade de contenção de solo, como subsolos e cortes acentuados de terrenos vizinhos. Nesse sentido, foram consideradas apenas contenções como soluções permanentes e sem necessidades estéticas (Quadro 1).

Quadro 1 – Revisão da literatura científica internacional e nacional sobre escoramentos e tipos de contenções

| Contenção | Escoramento | Fonte |
|----------------------------------|-------------|---|
| Cortina de concreto armado | Atirantada | BARREIRA <i>et al.</i> (2019) |
| Parede diafragma | Estroncada | CHENG <i>et al.</i> (2021) |
| | | MAŠÍN; BOHÁČ; TŮMA (2011) |
| | Atirantada | CASTELLI; LENTINI (2016); ZHUSSUPBEKOV; OMAROV; TANYRBERGENOVA (2019) |
| Cortina de estacas secantes | Atirantada | KARATAG; AKBAS; GEL (2013) |
| | Livre | ALTUNTAS; PERSAUD; POEPPEL (2009); MOHAMAD <i>et al.</i> (2011) |
| | Estroncada | MALAJ (2019) |
| Cortina de estacas intermitentes | Atirantada | CARVALHO; PINTO (2018) |
| Solo-cimento | Atirantada | KIM; CHO (2010) |

Fonte: elaborado pelo autor.

Além do material base (Quadro 1), a pesquisa por soluções documentadas permitiu a visualização de fatores comumente observados, os quais foram elencados em uma sequência, de forma a estabelecerem-se fluxo de atividades e parâmetros que deveriam ser considerados, conforme Clayton *et al.* (2014), Milititsky (2016), Milititsky *et al.* (2019).

Outro fator presente na elaboração dos critérios foi a experiência laboral dos autores em relação à área de geotecnia, especialmente fundações e contenções de solo, além do contato com profissionais mais experientes na área, o que acelerou o processo de aprendizagem respectivo ao assunto e facilitou a resolução de algumas divergências práticas e teóricas. Como resultado, os critérios são apresentados em um *framework*.

2.1.2 Critérios de monitoramento de contenções

Foram desenvolvidos critérios de monitoramento de contenções com base em referências e experiências locais, dada a falta de difusão desse assunto no Brasil, especialmente em empresas que executam esse tipo de solução. Durante o processo, o conhecimento foi adquirido por meio da pesquisa e da prática diária, resultando em uma proposta que une teoria e aplicação prática.

Autores como Dunncliff *et al.* (2012), Eberhardt e Stead (2011), e Mazzanti (2017) serviram como base para a seleção de parâmetros importantes no monitoramento geotécnico. Além disso, o Eurocode, Partes 1 (BSI, 2004) e 2 (BSI, 2007), foi fundamental para entender a importância do monitoramento em obras de terra. Fornecedores de sistemas e sensores como HBM (2022), Megatron (2022) e Slope Indicator (2004) contribuíram para a melhoria das práticas de obra. O resultado desse processo é um conjunto de critérios de monitoramento apresentados em um *framework*.

2.2 Caracterização do estudo de caso

O estudo foi conduzido em parceria com uma empresa de uma cidade localizada na região Sul do Brasil com experiência de mais de 20 anos na execução de fundações, contenções e obras de terra. A região é urbana e possui divisas com edificações próximas.

A edificação do estudo de caso totaliza 16 andares, sendo que os três primeiros pavimentos necessitam de contenção do montante de terra dos terrenos vizinhos associados a edificações lindeiras muito próximas. Devido ao desnível acentuado da localidade, a contenção também possui características de níveis diferentes conforme o comprimento do terreno.

Em relação ao reconhecimento do solo do local, foi executado conforme os métodos de sondagem e de ensaio SPT, com base nos procedimentos da NBR 6484 (ABNT, 2020), Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio.

No projeto do estudo de caso, foram 120 estacas escavadas hélice contínua presentes nos fundos e nas laterais do terreno; já os grampos estão localizados, em sua maioria, ao fundo, visto que há necessidade de conter uma edificação vizinha, e na lateral direita, em que existe um montante de terra hoje usado como canteiro de obras. A variação de fuste das estacas se dá pelo desnível do terreno, tanto no sentido Norte-Sul quanto no sentido Leste-Oeste.

O comportamento objetivo do monitoramento foi a acomodação das estruturas de contenção durante as etapas de grandes escavações. Para isso, os dados de deslocamentos horizontais e verticais das vigas de ligação das estacas foram coletados. O monitoramento foi executado nos fundos do terreno, e os dados foram coletados de deslocamentos de uma mesma viga de ligação das estacas, em dois pontos diferentes. Foram montadas duas estações: a primeira contou com os canais 1 e 2, localizados a 1,60 metros de distância horizontal do local já escavado; a segunda, com os canais 5 e 6, localizados a 3,50 metros da ponta escavada – os canais serão detalhados posteriormente, nos resultados.

Na instrumentação, foram utilizados o transdutor de deslocamento WI e o aquisitor de dados QuantumX MX840B da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) GmbH. Como havia uma dificuldade de acesso para instalação de pontos de fixos de referência, nas duas medições, os sensores horizontais foram apoiados nas esperas de aço da viga, e os verticais, em uma placa de aço instalado na parte superior da respectiva viga de ligação.

Os dados foram coletados de forma manual, sem conexão com a internet, com a conexão local entre sensor, aquisitor de dados e *software* via notebook. A coleta e o processamento dos dados em tempo real foram realizados com auxílio do *software* catman®, também produzido pela HBM GmbH. Observou-se uma quantidade de dados de difícil manipulação com auxílio do Excel, portanto foram feitos *scripts* na linguagem de programação Python para limpeza e visualização dos dados de deslocamento. Foi também construída uma relação baseada no Coeficiente de Pearson (LY; MARSMAN; WAGENMAKERS, 2009) para medir a relação estatística entre os resultados de deslocamento, considerando-se -1 (variáveis inversamente correlacionadas), 0 (não possuem relação) e +1 (variáveis diretamente correlacionadas).

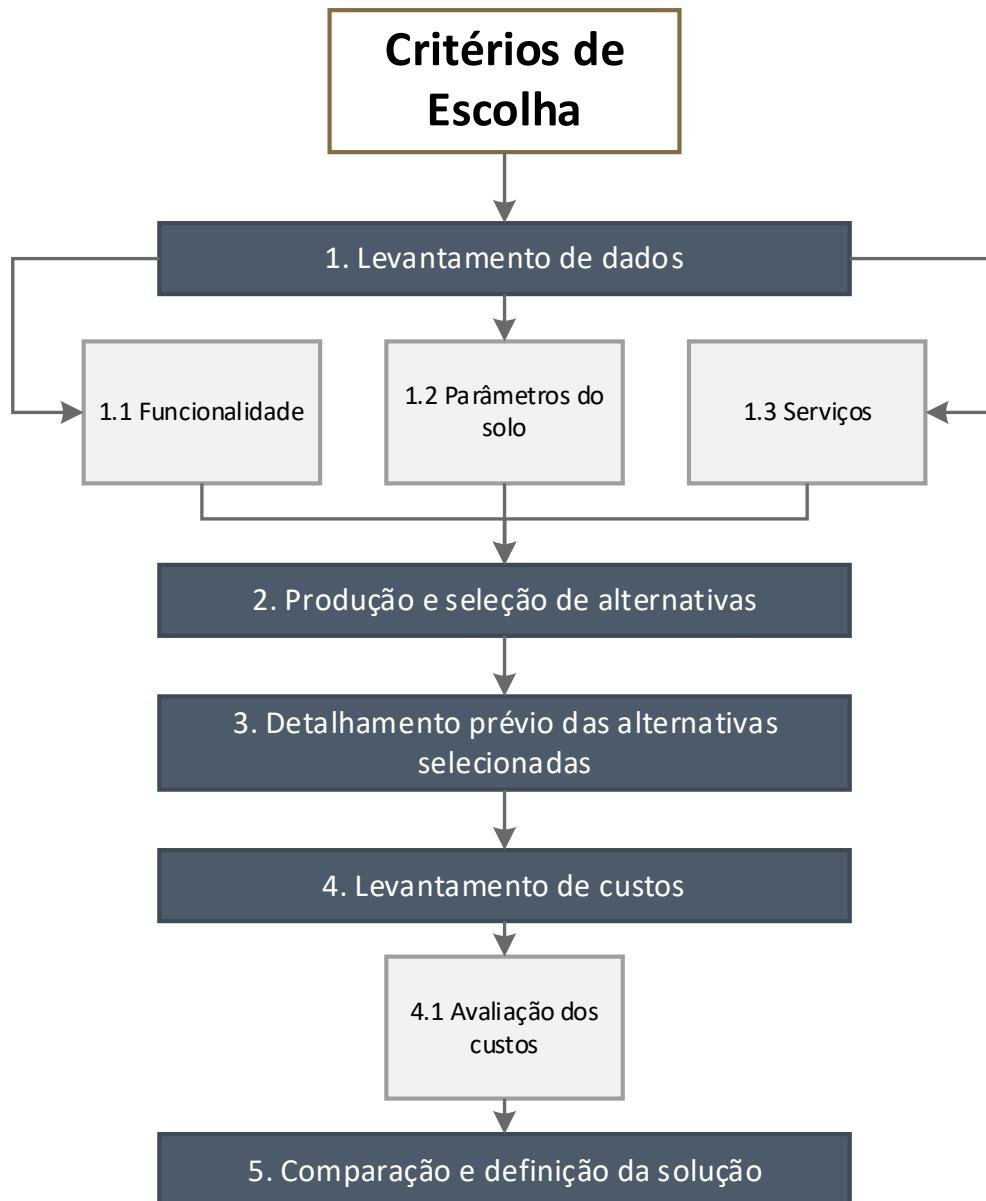
3 PROPOSTA DE CRITÉRIOS PARA ESCOLHA E MONITORAMENTO DE CONTENÇÕES DE SOLO EM REGIÕES URBANIZADAS

3.1 Critérios de escolha de contenções

O *framework* proposto de critérios de escolha de contenções (Figura 1) foi subdividido em cinco principais itens, indicando um fluxo de atividades para a seleção final da estrutura.

Cada item possui a finalidade de aquisição dos dados pertinentes à obra e são divididos da forma que segue.

Figura 1 – Framework de critérios de escolha de contenções de solo



Fonte: elaborado pelo autor.

1. Levantamento de dados

A primeira etapa consiste na aquisição de dados fundamentais que visam segurança, desempenho técnico e possibilidade de execução da solução de contenção. Os dados são subdivididos em funcionalidade, parâmetros do solo e serviços, e possuem importância de mesma magnitude na proposição de uma alternativa de contenção.

1.1 Dados de funcionalidade: geometria e profundidade da escavação, afastamento entre os limites de implantação, canteiro disponível, infraestrutura pública e edificações adjacentes, normas e códigos aplicáveis.

1.2 Parâmetros do solo: condições do solo, presença de água e contaminantes (agressividade do meio), tipo de solo retido e de fundação, parâmetros de água subterrânea e topografia.

1.3 Serviços: equipamentos, serviços e técnicas disponíveis, acesso ao local da obra, velocidade de execução (prazos), volume de execução (dimensão da obra), experiência e prática local.

2. Produção e seleção de alternativas

Após a aquisição inicial dos dados, existe a necessidade da elaboração de uma primeira fase de análise por meio da tabulação de vantagens e desvantagens das alternativas iniciais. A principal atividade dessa etapa é a comparação qualitativa das ideias e exclusão de algumas.

3. Detalhamento prévio das alternativas selecionadas

Deve-se realizar o mínimo detalhamento das soluções previamente definidas, a fim de permitir uma decisão; somente para casos extremos deve-se elaborar um projeto básico. A proposta é avaliar possíveis facilidades e dificuldades de cada uma das soluções restantes.

4. Levantamento de custos

Esta etapa consiste no levantamento dos itens mais significativos, não são necessários orçamentos completos. Também é importante a análise de fatores como quantidade de aço e concreto para cada tipo de solução, gastos com perfuração, montagem, custo por metro quadrado de contenção.

5. Comparação e definição da solução

Pelos dados adquiridos ao longo das etapas e da eliminação gradativa de soluções, a seleção final depende da avaliação de alguns itens imponderáveis: atrasos, prazos, limites executivos, impactos na vizinhança, etc.

A seleção da melhor alternativa considera que ela deve garantir desempenho, segurança e economia da contenção de solo como um todo.

3.2 Critérios de monitoramento de contenções

A elaboração do *framework* aborda itens específicos visando à seleção de instrumentação e à coleta de dados da aplicação, subdivididos nas cinco etapas seguintes (Figura 2).

1. Fatores monitorados

Cada demanda de contenção de solo é única e visa sanar um problema específico; os fatores críticos foram selecionados após a investigação das características do solo e do local da obra, bem como possíveis limitações construtivas do tipo de contenção escolhida e projetada.

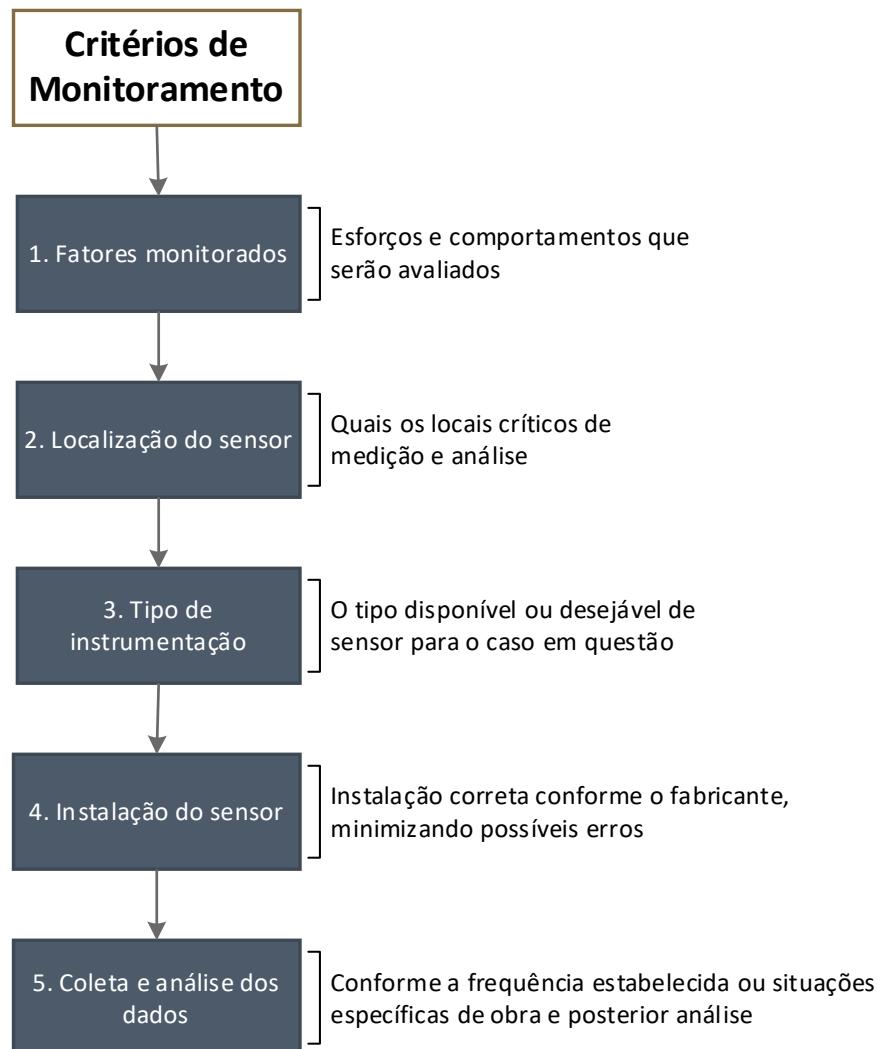
Entre os fatores presentes e importantes no monitoramento, existem as deformações, tanto do solo quanto da estrutura, a poropressão da água, cargas e tensões na interação solo-estrutura.

2. Localização do sensor

Uma vez definidos os fatores e conhecida a estrutura de contenção, a localização do sensor visa à coleta de dados importantes do comportamento da estrutura. O ponto de medição pode variar conforme o fator crítico a ser observado: um monitoramento contínuo de cargas,

um monitoramento de assentamento da estrutura em dias críticos de grandes retiradas de solo, etc.

Figura 2 – *Framework* de critérios de monitoramento de contenções de solo



Fonte: elaborado pelo autor.

3. *Tipo de instrumentação*

A seleção do tipo de instrumentação depende da capacidade de responder às questões geotécnicas necessárias para cada caso. Em alguns casos, também depende da disponibilidade de sensores e sistemas de monitoramento, entretanto os fatores monitorados devem ser prioridade na seleção dos materiais.

O material inclui o sensor responsável pela aquisição e transformação física dos dados em sinais captados pelo aquisitor de dados e posterior processamento no *software* do sistema de monitoramento.

4. *Instalação do sensor*

Conforme a seleção do material de monitoramento e a definição dos parâmetros observados, a instalação no local desejado deve seguir os manuais das fornecedoras dos sensores, minimizando possíveis falhas na coleta de dados.

5. Coleta e análise de dados

A coleta pode ser definida de forma contínua, com intervalos determinados, observando-se o comportamento ao longo do tempo ou também em dias críticos de etapas da construção em medições mais pontuais.

Essa atividade geralmente é feita a partir do aquisitor de dados definido em momento anterior, com os dados sendo captados pelo *software* e transformados em planilhas. Para melhor visualização dos dados, são construídos gráficos comparativos conforme a análise desejada, seja ela comparativa entre dois ou mais pontos de medição, comportamento ao longo do tempo ou avaliação de tensões e deslocamentos em momentos específicos.

4 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

4.1 Aplicação dos critérios de escolha no estudo de caso

1. Levantamento de dados

A obra prevê escavações de até 3 metros no subsolo e 4,40 metros no duto do elevador, com foco na contenção do solo nas laterais e na parte traseira, devido ao desnível do terreno. Os relatórios de sondagem indicam variações no tipo de solo, mas sem presença de água. A empresa usa principalmente perfuratrizes para fundações e contenção do solo.

2. Produção e seleção das alternativas

Levando em conta a aplicabilidade de cada solução, o maquinário e a experiência local disponível, o quadro 2 apresenta a produção e a seleção das alternativas do estudo de caso.

Quadro 2 – Seleção preliminar de contenções

| Escolha prévia | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------------|--|--|
| Cortina de concreto armado | Bom desempenho estrutural e eficiência em grandes escavações | Necessita de prática operacional e não possui execução tão ágil |
| Cortina de estacas justapostas | Baixo custo e facilidade de execução | Não desempenha bem em terrenos alagados e necessita de um bom acesso ao local da escavação |
| Cortina de estacas secantes | Baixo custo e eficiência na proteção contra água lideira | Necessita de prática operacional para execução; na própria execução, pode comprometer as estacas primárias |
| Parede diafragma | Agilidade de execução e proteção contra água lideira | Disponibilidade de maquinário e técnicas executivas específicas |
| Parede pré-moldada cravada | Agilidade de execução e baixo custo | Geralmente tem seu uso em contenções temporárias |

Fonte: elaborado pelo autor.

A empresa responsável não possui os equipamentos necessários para a execução de paredes diafragma, portanto essa alternativa foi descartada.

As paredes pré-moldadas cravadas foram descartadas por se tratar de uma contenção permanente de subsolo, em um edifício com construções vizinhas próximas. A solução de cortinas de estacas secantes foi descartada pela falta de prática operacional da empresa e do operador nesse tipo de contenção de solo.

Como alternativas, restaram a cortina de concreto armado e a cortina de estacas justapostas, duas soluções usuais no Brasil em regiões urbanizadas.

3. Detalhamento prévio das alternativas selecionadas

A cortina de concreto armado é executada pela escavação em etapas, de cima para baixo, do terreno. Possui a necessidade de concretagem com formas com colocação de armadura, bloco a bloco, até atingir o nível final. É comumente encontrada como solução aliada de tirantes e ancorados na própria parede.

A cortina de estacas justapostas possui execução e projeto muito semelhantes à escavação de estacas para fundação. Em geral, a perfuratriz opera ainda com o solo em um nível superior ao final, executando os furos seguidos de colocação de armadura e concretagem. O diâmetro para essa solução é de, usualmente, 40 cm de diâmetro e espaçamento máximo entre estacas de 5 cm. Por vezes, a solução utiliza vigas ligantes entre as estacas, para maior estabilidade.

4. Levantamento de custos

Como os custos variam entre diferentes empresas e locais de execução, pela própria prática e cultura da empresa, os valores de referência utilizados para o levantamento foram os da tabela SINAPI referente ao mês de execução e local da obra (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022).

A solução de cortina de estacas justapostas apresenta uma composição integrando todas as etapas de execução, incluindo fornecimento de material. Já a contenção em cortina de concreto armado foi definida por uma composição própria, seguindo os Cadernos Técnicos de Composições disponibilizados pela Caixa Econômica Federal (2019).

Os custos totais associados à construção da cortina de concreto armado e das estacas justapostas, conforme especificados no Código SINAPI, são de R\$ 178,64 por metro quadrado para a cortina de concreto armado e de R\$ 139,08 por metro quadrado para as estacas justapostas. Esses valores representam o custo global para a realização desses tipos de contenção.

5. Comparação e definição da solução

No cômputo global, as duas soluções apresentam custos de magnitudes semelhantes, tendo em vista que as estacas justapostas necessitam de uma profundidade maior que as cortinas, as quais também consomem muito mais aço. O tempo de execução das estacas justapostas é menor, pois essa solução demanda menor número de colaboradores.

Como tecnicamente as duas opções são aplicáveis para o talude do projeto, a empresa e o proprietário optaram pela solução de cortina de estacas justapostas.

4.2 Aplicação dos critérios de monitoramento no estudo de caso

1. Fatores monitorados

Devido às grandes escavações após a conclusão das cortinas de estacas e edificações próximas, monitoraram-se os deslocamentos verticais e horizontais da contenção para avaliar o assentamento da estrutura.

2. Localização do sensor

Os sensores foram colocados na viga de coroamento das estacas e nas esperas, devido à acessibilidade e à rigidez. A escolha considerou a facilidade de acesso, a capacidade de ajuste e o uso das estruturas existentes no local da obra.

3. *Tipo de instrumentação*

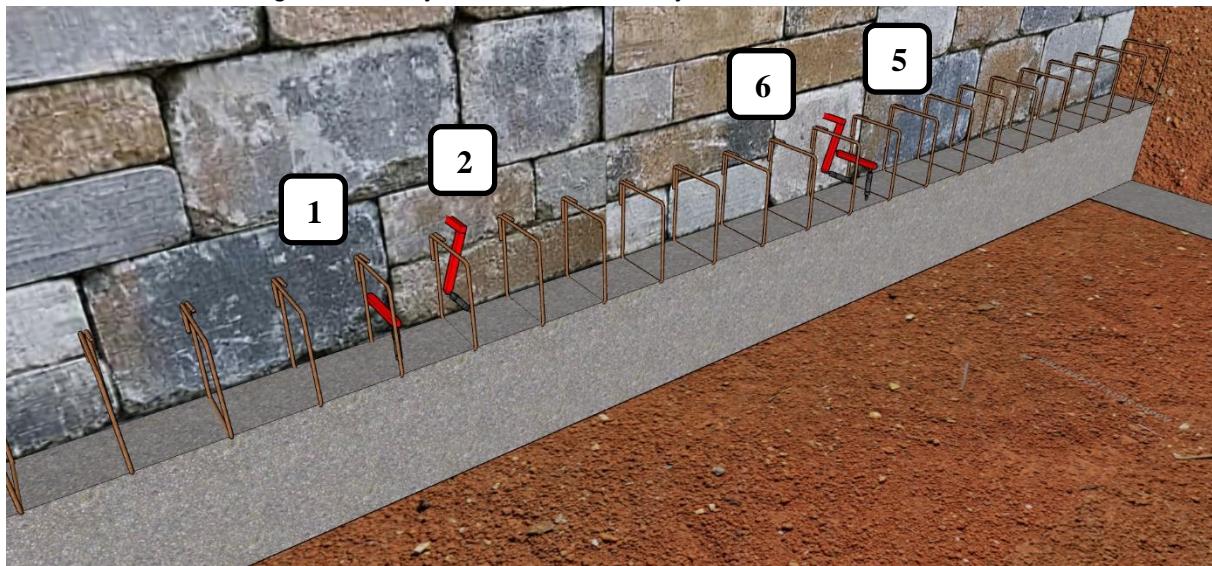
Foram selecionados quatro sensores LVDT e um aquisitor de dados Quantum para o monitoramento de deslocamentos no estudo de caso. Os sensores foram avaliados antes da instalação e acompanhados continuamente, verificando-se possíveis irregularidades nos gráficos gerados pelo software catman®.

4. *Instalação do sensor*

Na instalação do sensor, o acesso ao local mais uma vez foi aspecto importante. Os sensores foram instalados nas estruturas presentes na obra, vigas para medição de deslocamentos verticais e armaduras para deslocamentos horizontais, nas duas etapas. Como os sensores não possuem estrutura de fixação, foram coladas chapas metálicas nas vigas, fixadas com bases magnéticas, evitando-se ao máximo possíveis trepidações durante o período das escavações e que os LVDT saíssem do ponto de localização.

No estudo de caso, durante a medição, os sensores foram instalados na mesma viga no fundo do terreno (Figura 3).

Figura 3 – Instalação dos sensores da medição do estudo de caso



Fonte: elaborado pelo autor.

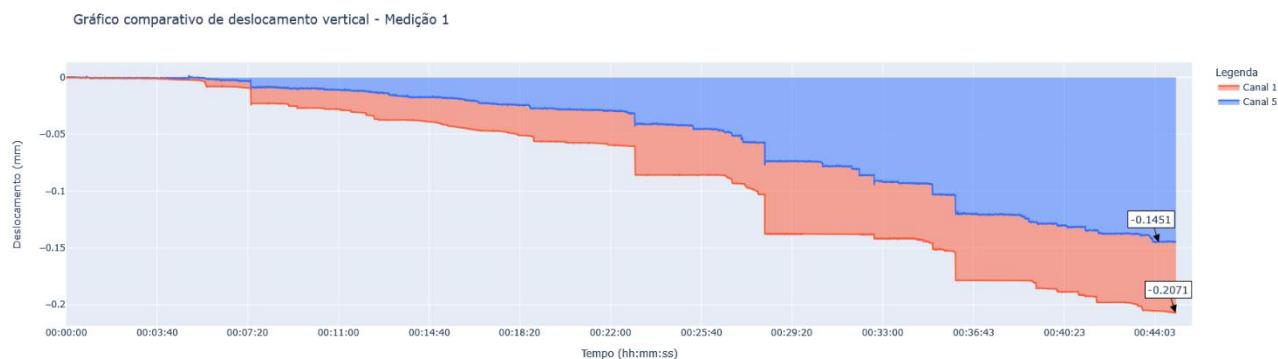
5. *Coleta e análise dos dados*

Após a coleta e a análise de dados usando *scripts* específicos, os deslocamentos foram representados em gráficos comparativos para sensores verticais e horizontais. O monitoramento durou 45 minutos. A análise dos canais 1 e 5 indicou um comportamento de deslocamento uniforme durante o período de assentamento da estrutura, registrando 0,20 mm no canal 1 e 0,14 mm no canal 5 (Figura 4).

Ao se compararem os sensores horizontais, observou-se um comportamento não linear. O canal 2 teve um deslocamento inicial maior, atingindo um máximo de 0,18 mm durante a escavação, possivelmente devido à proximidade da escavação em relação à localização do sensor. Em contraste, o canal 6 teve um deslocamento mais constante, atingindo um valor máximo de 0,10 mm.

Aplicando-se a correlação de Pearson nos sensores, foi possível ainda observar uma correlação muito forte entre os sensores verticais, chegando-se a 0,99. Os canais horizontais apresentam forte correlação (0,79), principalmente devido ao deslocamento inicial do sensor do canal 2.

Figura 4 – Comparativo de deslocamento vertical dos canais 1 e 5



Fonte: elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa propôs a definição de critérios de escolha e monitoramento de contenções em regiões urbanizadas a fim de utilizar esses critérios em aplicações semelhantes considerando os critérios de parâmetros de solo, geometria e profundidade da escavação, variabilidade de custos materiais e tempo em cada etapa dos *frameworks* elaborados nos itens 3.1 e 3.2.

A utilização de *frameworks* especializados para escolha e monitoramento de contenções de solo em regiões urbanizadas desempenha um papel crucial no aprimoramento do planejamento urbano. Em meio ao crescimento acelerado das áreas urbanas, torna-se imperativo adotar abordagens inovadoras para lidar com desafios geotécnicos associados à estabilidade do solo. Os *frameworks* propostos permitem a análise sistemática das características do solo, identificando características e fornecendo informações valiosas para a seleção adequada de estratégias de contenção. Além disso, o monitoramento dessas contenções possibilita uma resposta proativa a possíveis mudanças nas condições do solo. Ao integrar esses dados ao processo de planejamento urbano, é possível mitigar riscos associados à instabilidade do solo, promovendo o desenvolvimento sustentável de áreas urbanas e garantindo a segurança no longo prazo das infraestruturas e comunidades.

As contenções de solo desempenham um papel fundamental em regiões urbanizadas, prevenindo acidentes e assegurando a integridade de colaboradores e estruturas. No entanto, o monitoramento é crucial na garantia de estabilidade e na aferição de parâmetros de projeto, além de que, se feito de forma contínua, pode auxiliar no refinamento do projeto e na identificação do comprometimento da estrutura. Os dados de monitoramento devem ser documentados e utilizados continuamente durante a execução das etapas, além de considerar-se a importância bibliográfica da captação de dados de diferentes estruturas e parâmetros do solo.

Também, os critérios de monitoramento foram aplicados nas contenções do estudo de caso e os resultados demonstraram uma baixa magnitude de deslocamentos horizontais e verticais, com os valores mais críticos chegando a 0,18 mm e 0,20 mm, respectivamente. Os valores também devem ser considerados baseados na magnitude do tempo de monitoramento, sendo o máximo de 56 minutos. A análise dos deslocamentos e dos projetos da estrutura de contenção converge para uma estrutura robusta em relação ao tamanho da escavação, com excesso de rigidez e fator de segurança.

Os critérios de escolha dependem de fatores locais: tipo de solo, práticas regionais, experiência da empresa, regulamentações governamentais e restrições orçamentárias. A natureza do solo e o lençol freático afetam as decisões de projeto, assim como a experiência local, a disponibilidade de materiais e de mão de obra. Considerações financeiras também desempenham um papel significativo, em conjunto com a finalidade do projeto e as cargas a serem suportadas. Em resumo, a escolha da estrutura de contenção requer uma abordagem que considere todas essas variáveis, conforme apresentado nos *frameworks*.

O monitoramento estrutural é uma necessidade imperativa para garantir a segurança e a integridade das estruturas ao longo do tempo. Contudo, é crucial reconhecer as limitações relacionadas aos pontos de referência, que muitas vezes são fixos e não adaptáveis às mudanças. Embora a localização ideal desses pontos possa ser fora da obra, essa solução nem sempre é viável, dependendo do contexto e dos materiais envolvidos.

O estudo serviu de base para a aplicação dos critérios em regiões diversas, com variabilidade de parâmetros de solo e práticas locais de estruturas de contenção de solo, tanto na escolha de soluções adequadas quanto no monitoramento e na coleta de dados. Além disso, para a possibilidade da confecção de um sistema de monitoramento incluindo monitoramento em tempo real e especificidades para contenções de solo, visando refinamento de projetos em andamento.

A partir do conhecimento obtido durante a execução da pesquisa, sugere-se que trabalhos futuros foquem no desenvolvimento de sensores precisos e formulados a partir de materiais acessíveis, capazes de fornecer dados em tempo real sobre a integridade e a estabilidade da estrutura, na aplicação de técnicas de inteligência artificial e no aprendizado de máquina, visando análises preditivas de comportamento, permitindo a identificação antecipada de possíveis problemas e a aplicação dos critérios de escolha e monitoramento de contenções em obras de dimensões e locais distintos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8044**: Projeto geotécnico – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9061**: Segurança de escavação a céu aberto. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682:** Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AL-JAWADI, Azealdeen S.; AL-DABBAGH, Thanoon H.; DAWLAT, Mohsen S. Slope Assessment and Suggested Slope Design of the Bekhme Residential Complex in North Iraq. **Indian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 4, p. 694-704, 2021.

AL-KODMANY, Kheir. Rethinking urban density through the Chicago experience: a socio-ecological practice approach. **Socio-Ecological Practice Research**, v. 2, p. 131-147, 2020.

ALTUNTAS, Cem; PERSAUD, Deo; POEPPEL, Alan R. Secant pile wall design and construction in Manhattan, New York. In: CONTEMPORARY TOPICS IN GROUND MODIFICATION, PROBLEM SOILS, AND GEO-SUPPORT. **Proceedings...** 2009. p. 105-112.

BALASBANEH, Ali Tighnavard; MARSONO, Abdul Kadir Bin. Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earth-retaining walls: LCA, LCC, and S-LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 11, p. 2140-2153, 2020.

BARREIRA, Renato Hoppe et al. Contenções na Serra do Mar: Modelo da Interação entre Construtor, Executor e Projetista na Superação dos Desafios. In: 9º SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA – SEFE 9. **Anais eletrônicos...**, São Paulo, 2019.

BRASIL. **NR 18 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2020.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Eurocode 7**. Geotechnical design – Part 1: General Rules. London: BSI, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Eurocode 7**. Geotechnical Design Part 2: Ground investigation and testing. London: BSI, 2007.

CARVALHO, Cláudia; PINTO, Alexandre. Case Study: Moxy Hotel Bored Piles Wall. In: PROCEEDINGS OF CHINA-EUROPE CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING. Springer, p. 906-909. **Proceedings...**, Cham, 2018.

CASTELLI, Francesco; LENTINI, Valentina. Monitoring of full scale diaphragm wall for a deep excavation. In: PROC. OF 1ST IMEKO TC-4 INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR GEOTECHNICS. **Proceedings...**, Benevento, 2016. p. 103-108.

CHENG, Kang et al. Observed performance of a 30.2 m deep-large basement excavation in Hangzhou soft clay. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 111, p. 103872, 2021.

CLAYTON, Chris RI; WOODS, Rick I.; MILITITSKY, Jarbas. **Earth pressure and earth-retaining structures**. Boca Ratón: CRC Press, 2014.

CODESAL. **Histórico de Acidentes**. 2023. Disponível em: <http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/index.php/historico-de-acidentes/195--sp-1223391337>. Acesso em: 4 jul. 2023.

CORKE, David; SUCKLING, Tony P. Chapter 93 Quality assurance. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. **ICE Manual of Geotechnical Engineering**. London: Thomas Telford Ltd, 2012. p. 1355-1361.

DRUSA, Marian; VLCEK, J. Importance of Results Obtained from Geotechnical Monitoring for Evaluation of Reinforced Soil Structure—Case Study. **Journal of Applied Engineering Sciences**, v. 6, n. 1, p. 23-27, 2016.

DUNNICLIFF, John; MARR, W. Allen; STANDING, Jamie. Chapter 94 Principles of geotechnical monitoring. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. **ICE manual of geotechnical engineering**. London: Thomas Telford Ltd, 2012. p. 1363-1377.

EBERHARDT, Erik; STEAD, Doug. Geotechnical instrumentation. **SME Mining Engineering Handbook**, v. 1, n. 8.5, p. 551-572, 2011.

GARCÍA ADROGUER, Eduard et al. Sustainability assessment of earth retaining wall structures: preliminary model and simplified application. In: PROCEEDINGS OF THE XVI ECSMGE GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR INFRASTRUCTURE AND DEVELOPMENT. **Proceedings...**, Edinburg, 2015. p. 2463-2468.

GERSCOVICH, Denise MS. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GHORBANI, Masoud et al. Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas—The case of Niayesh road tunnel project. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 31, p. 1-8, 2012.

HBM. **Strain gauges, células de carga e sensores**. 2022.

Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/5501/sensores/>. Acesso em: 7 ago. 2022.

KARATAG, Huseyin; AKBAS, Sami O.; GEL, A. C. Comparison of the Computed and Observed Behavior of an Anchored Wall under Limited Geotechnical Characterization. In: 3RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL GEOMECHANICS (COMGEO III). **Proceedings...**, Krakow, 2013.

KIM, YoungSeok; CHO, YongSang. A case study of retaining wall with soil-cement mixing reinforcement for Korean Urban site. In: PROCEEDINGS OF THE GEOSHANGHAI 2010. **Proceedings...**, Shanghai, 2010. Session: Deep and Underground Excavations. p. 70-75.

LIENHART, Werner et al. High-resolution monitoring of retaining walls with distributed fibre optic sensors and mobile mapping systems. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH ASIA-PACIFIC WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING. **Proceedings...**, Hong Kong, 2018. p. 12-15.

LIU, Xixi et al. Ground subsidence characteristics associated with urbanization in East China analyzed with a Sentinel-1A-based InSAR time series approach. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 78, n. 6, p. 4003-4015, 2019.

LY, Alexander; MARSMAN, Maarten; WAGENMAKERS, Eric-Jan. Analytic posteriors for Pearson's correlation coefficient. **Statistica Neerlandica**, v. 72, n. 1, p. 4-13, 2018.

MALAJ, Ardita. Deep excavation and slope stabilization in Tirana, Albania. In: PROCEEDINGS OF THE XVII ECSMGE. **Proceedings...**, Reykjavik, 2019.

MAŠÍN, David; BOHÁČ, J.; TŮMA, P. Modelling of a deep excavation in a silty clay. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING. **Proceedings...**, Athens, 2011. p. 1509-1514.

MAZZANTI, Paolo. Toward transportation asset management: what is the role of geotechnical monitoring? **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 7, n. 5, p. 645-656, 2017.

MEGATRON. **Megatron Sensors**. 2022.

Disponível em: <https://www.megatronsensors.com/pt/>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MILITITSKY, Jarbas et al. Obras de contenção. In: FALCONI, Frederico et al. **Fundações: Teoria e Prática**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. Cap. 13, p. 499-528.

MILITITSKY, Jarbas. **Grandes escavações em perímetro urbano**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MOHAMAD, Hisham et al. Performance monitoring of a secant-piled wall using distributed fiber optic strain sensing. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 12, p. 1236-1243, 2011.

MUÑOZ-MEDINA, Belén et al. Typology Selection of Retaining Walls Based on Multicriteria Decision-Making Methods. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1457, 2021.

PALME, Massimo; RAMÍREZ, José Guerra. A critical assessment and projection of urban vertical growth in Antofagasta, Chile. **Sustainability**, v. 5, n. 7, p. 2840-2855, 2013.

SLOPE INDICATOR. **Guide to geotechnical instrumentation**. Washington: Durham Geo Slope Indicator, 2004.

WOLFF, Erich; SANTOS FILHO, Manoel Messias Ribeiro. Risk Management in Urban Transport Systems for Logistics Planning in Brasília, Brazil. In: 2016 SCALE LATIN AMERICAN CONFERENCE. **Proceedings...**, MIT Center for Transportation and Logistics, Boston, USA, 2016.

YU, Bailang *et al.* Automated derivation of urban building density information using airborne LiDAR data and object-based method. **Landscape and Urban Planning**, v. 98, n. 3-4, p. 210-219, 2010.

ZHUSUPBEKOV, Askar; OMAROV, Abdulla; TANYRBERGENOVA, Gulzhanat. Design of anchored diaphragm wall for deep excavation. **International Journal of Geomate**, v. 16, n. 58, p. 139-144, 2019.