

Artigo Técnico

Ensaio sísmico MASW como método de investigação complementar do solo: o caso do Edifício Copan em São Paulo.

MASW seismic tests as a complementary soil investigation method: the case of the Copan Building in São Paulo.

Daniel Farias da Silva Bernardo^a, Fabiana Lopes de Oliveira^a, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo^b, Gisleine Coelho de Campos^{c*}

^a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP).

^b Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental/ Cidades, Infraestrutura e Meio ambiente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (SIRGA/CIMA IPT).

^c Seção de Obras Cívicas/ Cidades, Infraestrutura e Meio ambiente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (SOC/CIMA IPT).

*e-mail: gisleine@ipt.br

Palavras-chave: ensaios sísmicos MASW; patrimônio histórico; Edifício Copan.

Keywords: seismic tests; MASW; historical heritage; Copan Building.

Resumo

No presente artigo, são apresentados os resultados dos ensaios sísmicos de *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) realizados no subsolo do Edifício Copan, ícone arquitetônico e marco referencial da arquitetura paulistana. O objetivo do ensaio foi avaliar a rigidez dos materiais em subsuperfície ao longo do terreno de embasamento do edifício, tentando identificar os locais onde estes apresentam maiores ou menores valores. Este método indireto e não destrutivo, por fornecer uma alta razão sinal/ruído, é adequado para ser usado em áreas urbanas, onde é comum a presença de pouco espaço livre, com diferentes pisos, pavimentos e elevado nível de ruídos ambientais, principalmente vibrações. Dos seis pontos investigados, cinco forneceram resultados que puderam ser interpretados. Dos dois pontos que apresentaram os melhores resultados, pôde ser estabelecida uma relação com o que se sabia, a partir de fontes primárias e bibliográficas, da área sob o edifício Copan.

Abstract

In this article, the results of the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) seismic tests carried out in the underground of the Copan Building, icon of architecture in the city of São Paulo, are presented. The objective of the test was to assess the stiffness of subsurface materials along the building's foundation ground, aiming to identify areas where they exhibit higher or lower values. This indirect method, as it provides a high signal/noise ratio, is suitable for working in urban areas, urban areas where limited space, different floors, pavements, and high levels of environmental noise, particularly vibrations, are common. Out of the six investigated points, five provided interpretable results. From the two points that yielded the best results, a relationship could be established with what was known from primary and bibliographic sources about the area beneath the Copan Building.

1 Introdução

Os trabalhos de conservação de uma Construção Histórica (CH) exigem determinados cuidados que estão primordialmente relacionados à compreensão exata da realidade destes bens, os quais costumam apresentar o comportamento estrutural de seus sistemas construtivos e as características de seus materiais pouco conhecidas. O diagnóstico das condições em que se encontram estas construções deve ser baseado em informações históricas e em abordagens qualitativas e quantitativas. Estas últimas estão apoiadas em ensaios específicos e modelos matemáticos, como aqueles utilizados na engenharia moderna. Costuma-se ser necessária a formação de equipes multidisciplinares para análise das condições destes bens, a variar de acordo com as ações incidentes. Dentre estas, de forma indireta, estão os deslocamentos do terreno de fundação que são as mais perigosas e exigem acompanhamento de seu desenvolvimento (ICOMOS, 2003).

Considerando que qualquer diagnóstico deve ser dirigido à raiz das causas que provocam as manifestações patológicas e partindo-se da necessidade de se evitar ensaios invasivos à materialidade das CH, os métodos geofísicos, não-destrutivos e não-invasivos, representam um suporte científico interessante na caracterização do subsolo de fundação de edificações antigas. O MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) - ensaio sísmico baseado na propagação de ondas de superfície - é um exemplo de ensaio geofísico com potencial de utilização nestas situações.

Uma das grandes vantagens dos métodos que utilizam ondas de superfície, como o MASW, é o fato destas ondas fornecerem um sinal de grande amplitude, possibilitando sua aplicação em locais onde outros métodos geofísicos não seriam eficientes, como em áreas urbanas onde é elevado o nível de ruídos que causam vibrações, prejudiciais à qualidade de diversos outros ensaios sísmicos, como o método da refração, por exemplo.

Este trabalho consistiu na realização do ensaio sísmico MASW, visando a determinação do perfil de velocidade da propagação da onda de cisalhamento (V_s) em função da profundidade, em pontos do piso do segundo subsolo, no interior da garagem do Edifício Copan. O intuito do ensaio foi avaliar a rigidez dos materiais em subsuperfície ao longo do terreno de embasamento do edifício, tentando identificar os locais onde estes apresentam maiores ou menores valores. A área de implantação do edifício é caracterizada por ser densamente edificada e populosa e, conseqüentemente com a presença de elevado nível de ruído (vibrações) devido ao intenso tráfego local existente (veículos e linha de Metrô).

2 O caso histórico dos recalques do Edifício Copan e sua correlação com a geotecnia local: o estudo de caso

O Edifício Copan, construído entre 1952 e 1972, está localizado na avenida Ipiranga, no centro da cidade de São Paulo, onde há algum tempo já se sabe da ocorrência das camadas de argilas variegadas, dispostas irregularmente, sobrepondo as chamadas “areias basais”. As características geológico-geotécnicas dessas areias foram amplamente estudadas ao longo de décadas, também pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, na ocasião da construção de edifícios altos na cidade de São Paulo no início do século XX e, posteriormente, nas investigações geotécnicas para execução da linha norte-sul do Metrô de São Paulo (VARGAS, 1980).

Segundo Feliciani (1989), as “areias basais” encontram-se naturalmente em estados de compacidade muito variados, dispostos erraticamente tanto na direção vertical como horizontal, apresentando-se, de forma geral, como fofas ou pouco compactas. Vargas, Pinto e Marinho (1998) também destacam a grande heterogeneidade destas areias, que podem ocorrer tanto no estado fofo (com NSPT baixos, entre de 2 a 6), como mais compacto (com NSPT de até 36). Teixeira (1970) afirma que essas areias argilosas do centro de São Paulo, apesar de possuírem um baixo teor de argila, apresentam características de deformação semelhantes àquelas de solos predominantemente argilosos. Segundo o autor, fundações profundas apoiadas nestas areias argilosas recalcam lentamente com o tempo e para tensões de 7 a 8 kg/cm² aplicadas ao solo, resultam em grandes recalques totais e diferenciais.

Pelos projetos das fundações do Copan, nota-se que a lâmina do edifício foi executada em fundações profundas do tipo caixões cravados a ar comprimido, os quais foram assentados entre 5 e 7 m abaixo do nível do segundo subsolo, sobre as tais “areias basais”. Ensaios de simples reconhecimento mostraram um solo que foi considerado fofo para suportar as tensões em torno de 8 kg/cm² aplicadas pelos caixões e, desta forma, decidiu-se pelo melhoramento da camada mais superficial da areia pela cravação de um reticulado de estacas de compactação no nível da base dos caixões, previamente à sua execução. Estas estacas são de concreto armado, têm 8 metros de comprimento e estão espaçadas de um metro. Não se sabe ao certo a localização destas estacas, mas acredita-se, por meio de indícios dos projetos e bibliografia sobre o assunto, que estejam, aproximadamente, sob a projeção da lâmina do edifício (com o formato sinuoso característico em “S”).

Durante as fases iniciais da construção do Copan, o IPT foi contratado com o objetivo de monitorar o comportamento das fundações especiais do edifício, incumbência esta que se estende até os dias atuais, uma vez que o edifício apresenta recalques de longo prazo, identificados por meio destas medições. No entanto, os atuais deslocamentos, embora não tenham atingido total estabilização, reduziram-se de maneira drástica em termos de intensidade. Os mais expressivos recalques ocorreram durante a construção da lâmina e ocupação inicial do edifício - comportamento esperado durante essa etapa, considerando o incremento de carga sobre as fundações. Entretanto, a magnitude de tais deslocamentos apresentou-se excessivamente elevada, de tal forma que no ano de 1962, diante da constatação de recalques diferenciais e deformações angulares críticas, foi tomada a decisão de reforçar uma parte das fundações do edifício (**FIGURA 1**), priorizando a área com maiores recalques (BERNARDO; OLIVEIRA; CAMPOS, 2022).

Figura 1 – Reforços de fundação do Edifício Copan.

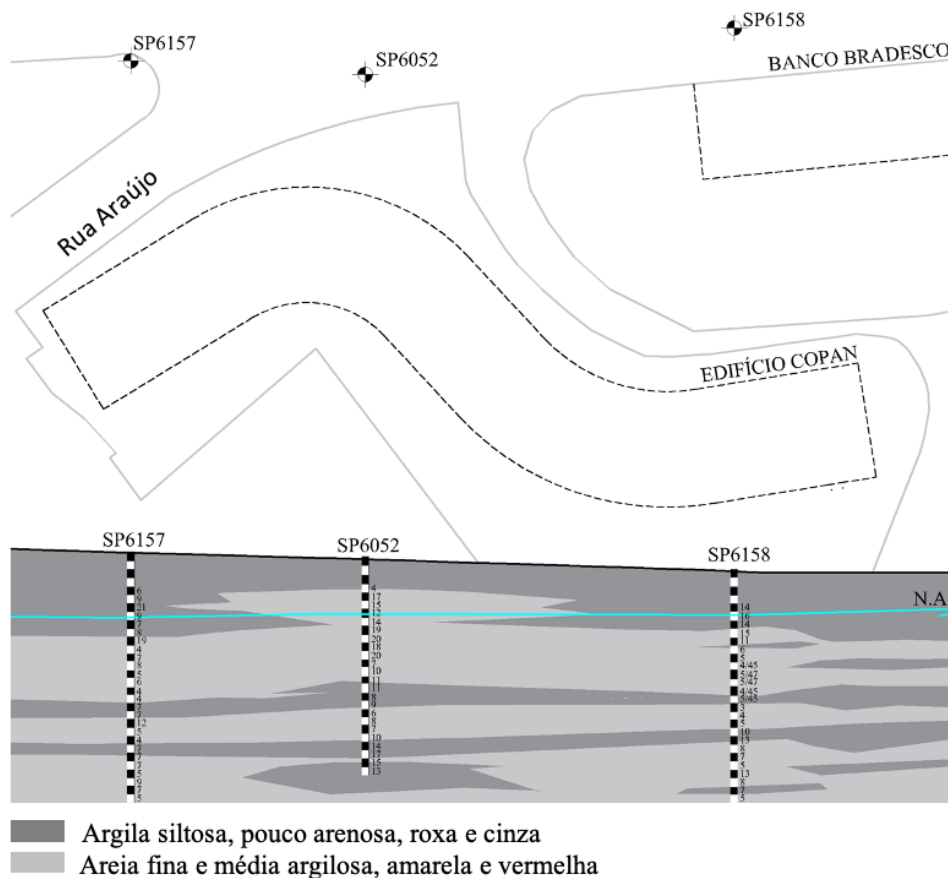


Foto: Daniel Bernardo (2021)

Os deslocamentos diferenciais das fundações do Edifício Copan ao longo dos anos levantam questões sobre suas prováveis causas: estariam eles relacionados à conhecida heterogeneidade destas areias basais, à ineficiência da execução das estacas de melhoramento de solo ou ao sistema solo-fundações como um todo? Sondagens de simples reconhecimento foram executadas pela Geotécnica S.A. no início da construção do edifício, em 1952, por todo o terreno do edifício e pelo IPT em 1954, apenas na porção superior, próximo à Rua Araújo. Infelizmente os resultados das sondagens executadas pela Geotécnica não foram encontrados para uso nesta pesquisa, sobrando apenas os resultados das sondagens do IPT, insuficientes para traçar o perfil geotécnico do terreno e atestar, por exemplo, sobre as diferentes compacidade do solo em cada uma das extremidades do edifício.

Por outro lado, têm-se notícias da existência de relatórios de *Standard Penetration Test* (SPT) realizados na Avenida Ipiranga em frente ao Edifício Copan, por conta da construção da linha amarela da Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô em 2008, sendo possível conhecer, aproximadamente, o perfil das camadas do solo que ocorrem na área (FIGURA 2).

Figura 2 - Seção geológico-geotécnica relativa às sondagens realizadas pelo Metrô.



Autor: Daniel Bernardo (2023).

3 Princípios do método sísmico MASW

Os métodos que utilizam as ondas de superfície se baseiam fundamentalmente nas propriedades da dispersão (velocidade variando em função da frequência). O fenômeno da dispersão ocorre em um meio estratificado, verticalmente heterogêneo, que apresente diferentes valores de velocidades de propagação das ondas sísmicas com a profundidade, situação bastante comum em ambientes de investigação rasa. Devido às mudanças das propriedades elásticas com a profundidade em um meio não homogêneo, comprimentos de ondas longos dependerão das propriedades das maiores profundidades, se comparados aos comprimentos de ondas curtos e, assim sendo, diferentes comprimentos de onda propagam-se com diferentes valores de velocidades.

A energia (ou amplitude) das ondas de superfície decai exponencialmente com o aumento da profundidade. Grandes comprimentos de onda (longos períodos/baixas frequências) propagam-se em maiores profundidades e fornecem informações das velocidades das camadas mais profundas. De maneira contrária, pequenos comprimentos de onda (curtos períodos/altas frequências) propagam-se mais próximas à superfície e são influenciadas pelas velocidades das camadas mais rasas. A relação entre velocidade de fase e a frequência (ou comprimento de onda) é denominada de curva de dispersão.

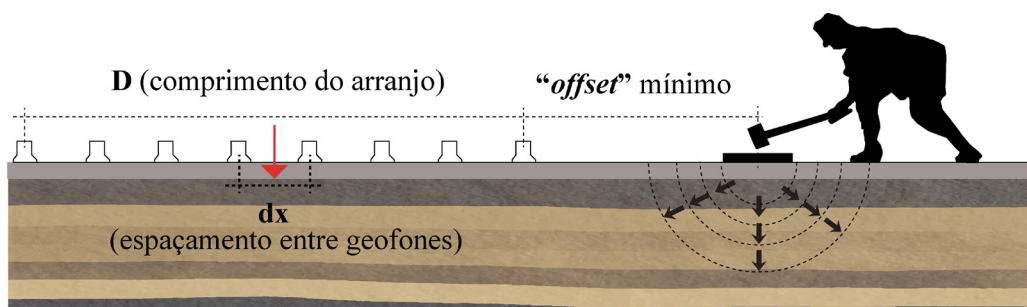
O método utiliza principalmente as ondas do tipo *Rayleigh* – “ondas de superfície” que se propagam ao longo da interface entre duas camadas de diferentes propriedades elásticas, neste caso, a superfície do terreno e as camadas subsuperficiais. Nos ensaios de campo de MASW é feito o registro da onda *Rayleigh* e, por processamento dos dados, podem ser obtidas informações sobre a velocidade da onda cisalhante (V_s).

Em geotecnia, o conhecimento de V_s é importante devido a algumas de suas características, tais como a sua relação direta com o módulo de cisalhamento dinâmico ($G_{\max} = \rho V_s^2$) e a sua insensibilidade à presença de fluídos no maciço terroso.

As ondas de superfície podem ser geradas por uma fonte do tipo “ativa”. As mais utilizadas são as fontes impulsivas (marretas ou queda de pesos) que têm a vantagem de criar com o impacto uma ampla faixa de frequências. O impacto de uma marreta contra uma base posicionada sobre a superfície do terreno constitui uma boa fonte de ondas de superfície, a um razoável custo/benefício e com geração de energia suficiente para investigações rasas.

Os ensaios são concebidos para se detectar este tipo de onda e, após o processamento e a inversão dos dados, obter-se um perfil da variação de V_s com a profundidade em um determinado ponto. Dentre alguns ensaios, destaca-se o MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). O método MASW (PARK *et al.*, 1999; XIA *et al.*, 1999), assim como qualquer método que utilize ondas de superfície, está fundamentado no caráter dispersivo das ondas *Rayleigh* em meios estratificados. É realizado utilizando um arranjo de geofones alinhados e pequeno espaçamento entre eles ($dx \cong 1$ m). O local de geração de energia é externo ao arranjo e a distância deste ponto ao primeiro geofone é denominada “*offset*” mínimo (FIGURA 3).

Figura 3- Arranjo de campo de um ensaio MASW

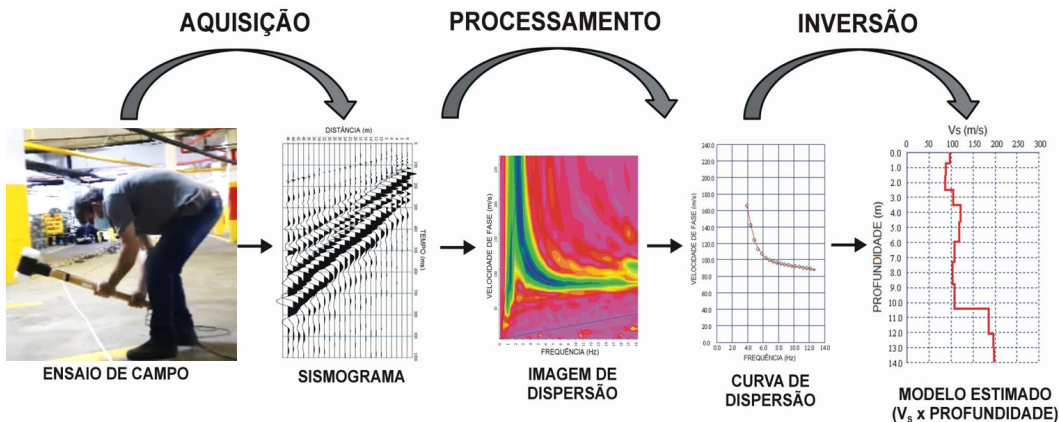


Fonte: elaborado pelos autores.

Como regra prática, a máxima profundidade investigada equivale à metade do comprimento do arranjo ($1/2D$). Para o registro dos dados é utilizado um sismógrafo, sendo aconselhável que este tenha pelo menos 24 canais. Os geofones são de componente vertical e, em geral, de baixa frequência (4,5 Hz). Na obtenção de cada registro, três impactos de marreta, em geral, são suficientes para aquisição de um dado com boa qualidade em termos de razão sinal/ruído.

Os sismogramas adquiridos em campo, um registro apresentado no domínio tempo-distância, são posteriormente transformados para o domínio frequência-número de onda (f - K), por meio da aplicação sucessiva de duas transformadas de Fourier. O domínio f - K , que mostra as propriedades dispersivas das ondas de *Rayleigh*, apresenta uma imagem de dispersão da qual pode ser obtida uma curva de dispersão (velocidade de fase em função da frequência), identificando-se os máximos de energia para cada frequência. Por meio de processos matemáticos de inversão da curva de dispersão, finalmente pode ser obtido um perfil 1D da variação de velocidade da onda cisalhante (V_s) com a profundidade, informação atribuída ao centro do arranjo de geofones. A FIGURA 4 ilustra as etapas de um levantamento de MASW, desde a aquisição dos dados de campo até o resultado final fornecido.

Figura 4 - Etapas de um levantamento de MASW



Fonte: os autores (2022).

4 Aquisição de dados

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Sismógrafo *Geode* marca *Geometrics* de 24 canais;
- 24 geofones de componente vertical com frequência natural de 4,5 Hz;
- Marreta de 5 kg para geração das ondas sísmicas.

Foi utilizado um espaçamento de 1 m entre geofones e o "offset" - distância entre o ponto de impacto da fonte de ondas sísmicas (marreta) e a posição do primeiro geofone no arranjo linear - foi definido em cada um dos pontos ensaiados, avaliando-se a qualidade do sinal obtido nos diferentes locais. A **FIGURA 5** mostra a execução do ensaio MASW no segundo subsolo do Edifício Copan.

Figura 5 - Ensaio MASW sendo executado no Copan

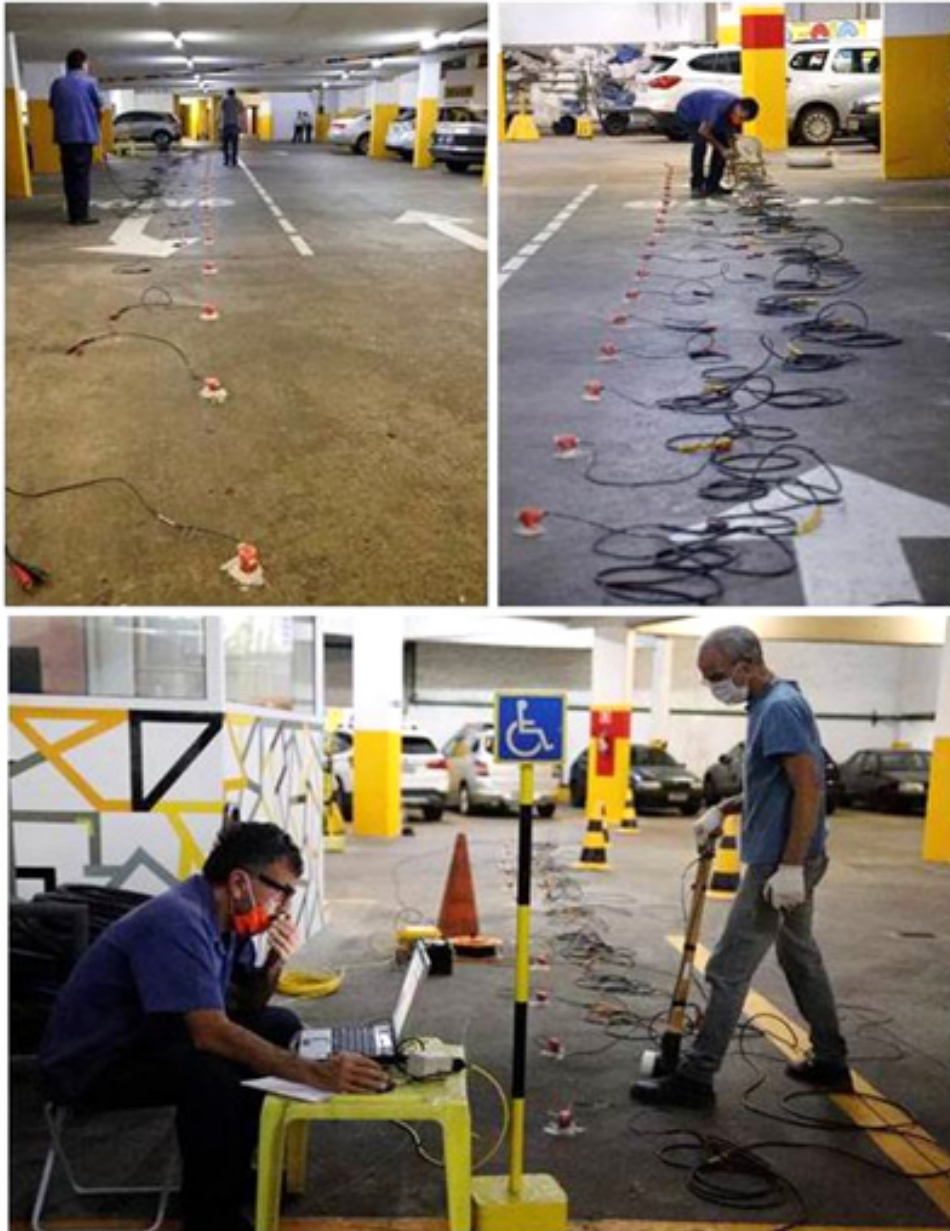
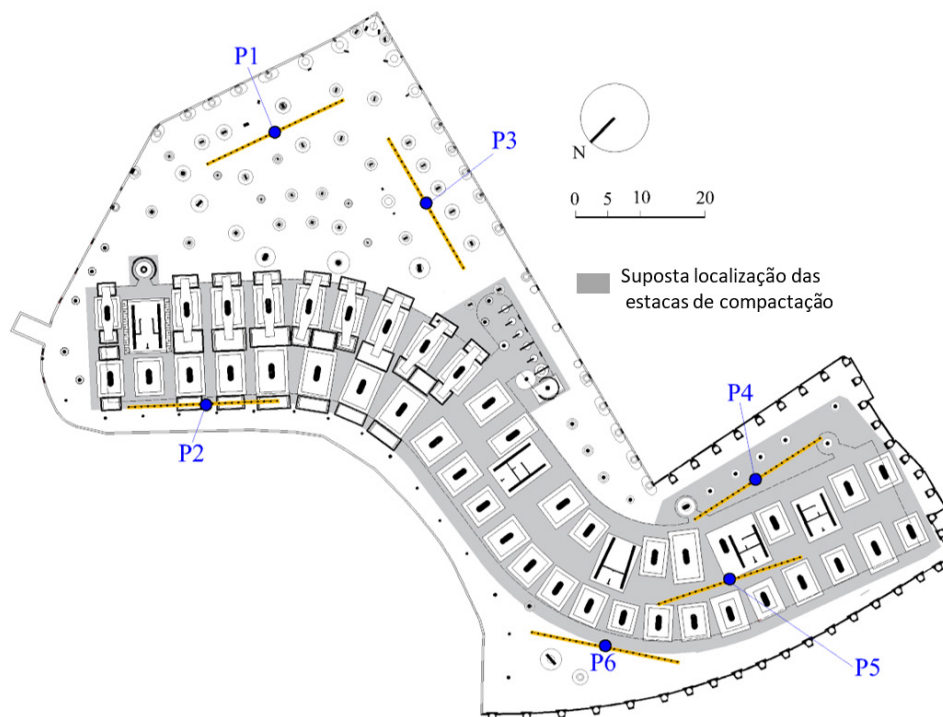


Foto: Daniel Bernardo (2022).

Com o intuito de facilitar a compreensão do ensaio realizado, a **FIGURA 6** exibe uma planta das fundações do Edifício Copan (referente ao pavimento 2º subsolo) e destaca a localização dos pontos em que os ensaios foram conduzidos.

Figura 6- Pontos onde foram realizados os ensaios MASW

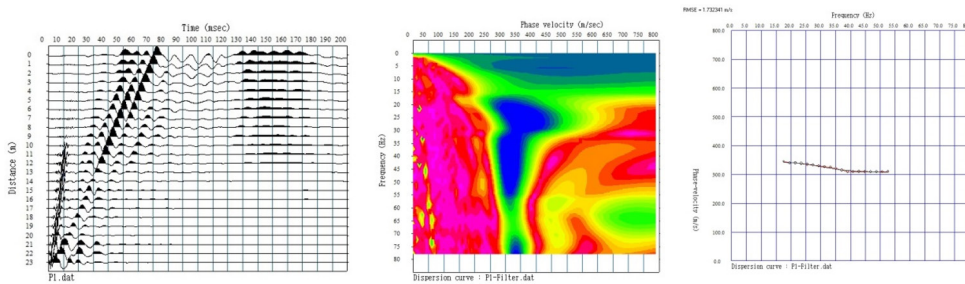


Fonte: modificado de Bernardo (2023), Bernardo; Oliveira (2023) e Bernardo (2024).

5 Processamento e inversão

No processamento dos dados, foi utilizado o *software SeisImager/SW*. Os dados obtidos nos ensaios de campo são apresentados da seguinte forma: sismograma; imagem de dispersão; e curva de dispersão obtida da imagem de dispersão. Os perfis de V_s versus profundidade obtidos pela inversão da curva de dispersão são apresentados posteriormente. As **Figuras 7, 8, 9, 10 e 11** apresentam os resultados obtidos, respectivamente, nos pontos P1, P3, P4, P5 e P6.

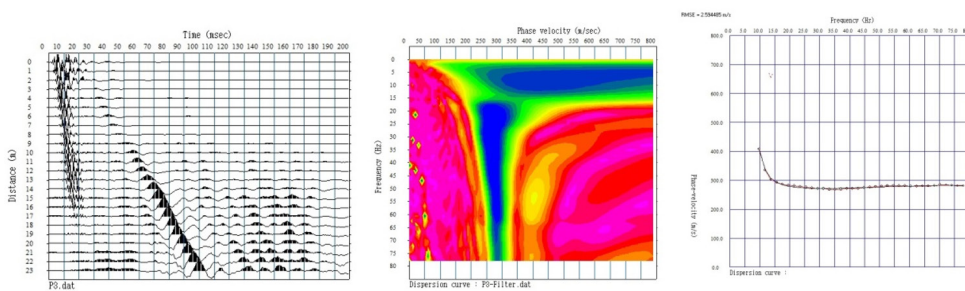
Figura 7 - Sismograma (esquerda), imagem de dispersão (centro) e curva de dispersão (direita) obtida no ponto P1.



Fonte: elaborado pelos autores.

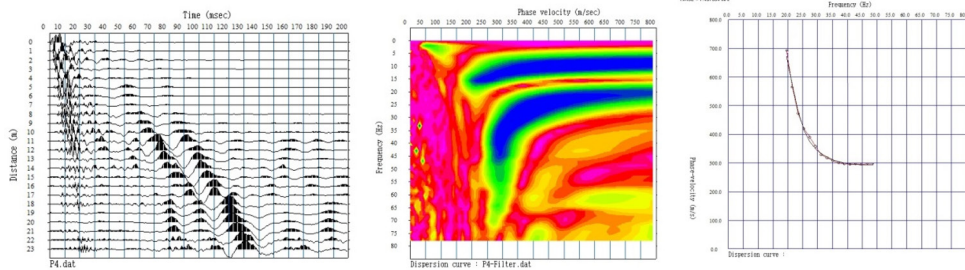
O dado adquirido no ponto P2 apresentou uma qualidade insatisfatória e não permitiu a obtenção da curva de dispersão necessária para a determinação do perfil de velocidade, devido ao aspecto ruim da imagem de dispersão. Conseqüentemente, nenhuma informação pode ser obtida neste local.

Figura 8 - Sismograma (esquerda), imagem de dispersão (centro) e curva de dispersão (direita) obtida no ponto P3.



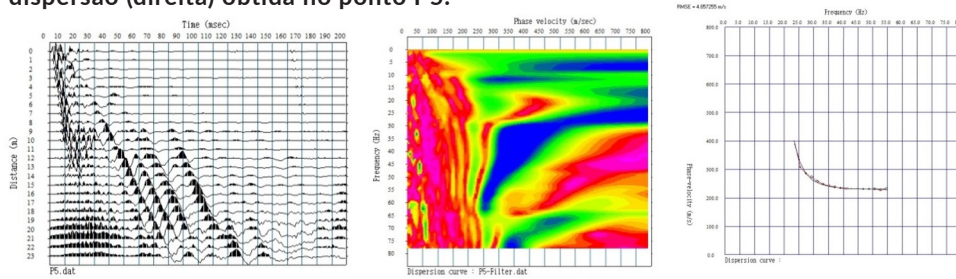
Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 9 - Sismograma (esquerda), imagem de dispersão (centro) e curva de dispersão (direita) obtida no ponto P4.



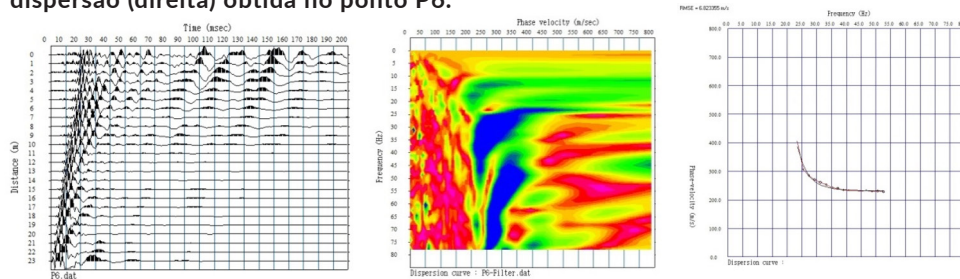
Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 10 - Sismograma (esquerda), imagem de dispersão (centro) e curva de dispersão (direita) obtida no ponto P5.



Fonte: elaborado pelos autores.

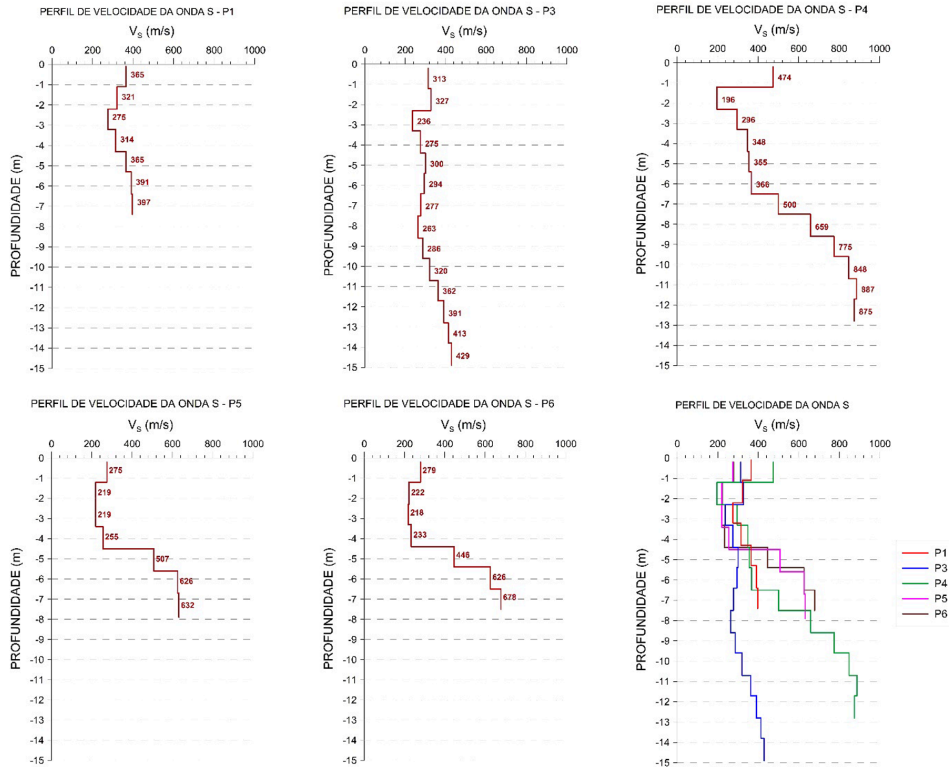
Figura 11 - Sismograma (esquerda), imagem de dispersão (centro) e curva de dispersão (direita) obtida no ponto P6.



Fonte: elaborado pelos autores.

A inversão das curvas de dispersão produziu os modelos de velocidades da onda de cisalhamento (V_s) em função da profundidade, apresentados na **FIGURA 12**.

Figura 12 - Modelos de V_s versus profundidade, obtidos nos pontos dos ensaios MASW.



Fonte: elaborado pelos autores.

6 Discussão

Os ensaios realizados nos pontos P1, P5 e P6 atingiram menores profundidades de investigação do que os ensaios realizados nos pontos P3 e P4. Esse resultado se deve às características da área analisada do terreno, como possivelmente a proximidade com os elementos da infraestrutura do edifício, tais como blocos de fundação e vigas de travamento em concreto armado, e não às questões na aquisição de dados e/ou ao desempenho dos equipamentos.

Nos quatro primeiros metros, os valores de V_s variaram de 200 m/s a 360 m/s em todos os perfis. Nos pontos P4, P5 e P6 observa-se um aumento pronunciado de velocidades a partir das profundidades entre 4 e 7 m. Devido à perda de resolução

com a profundidade, os valores de velocidade dos modelos nestes pontos podem estar superestimados, embora este aumento de V_s em relação à porção superior esteja evidente nos dados obtidos. Não se observou um aumento acentuado de V_s nos pontos P1 e P3 a partir das profundidades entre 4 e 7 m. Essa característica observada está de acordo com o previsto, uma vez que nesta área, de acordo com relatos e indícios documentais históricos, não foi realizado o estaqueamento para melhoramento da compacidade das areias sob as fundações.

Uma interpretação mais assertiva foi feita com base nos resultados dos pontos onde o dado de MASW apresentou uma imagem de dispersão de melhor qualidade – pontos P3 e P4. Nestes locais, o perfil de V_s forneceu informações até profundidades maiores, se comparado aos outros pontos dos ensaios. Os pontos P3 e P4 estão localizados em extremidades opostas do edifício e representam áreas distintas do terreno do Copan. O ponto P3 está localizado próximo à região do edifício onde, historicamente, o monitoramento da estrutura mostrou os maiores recalques e onde os reforços das fundações foram executados. O ponto P4 situa-se em uma área do edifício que o monitoramento mostrou menores recalques.

Para fins comparativos, foi calculado um valor médio de V_s para cada um dos pontos, dado pela seguinte equação:

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde,
 V_{si} = velocidade da onda S na i-ésima camada (m/s)
 d_i = espessura da i-ésima camada (m)
 i = índice que representa uma camada do modelo entre 1 e n

No ponto P3, V_s médio resultou em um valor de 311 m/s e no ponto P4, o valor de 440 m/s.

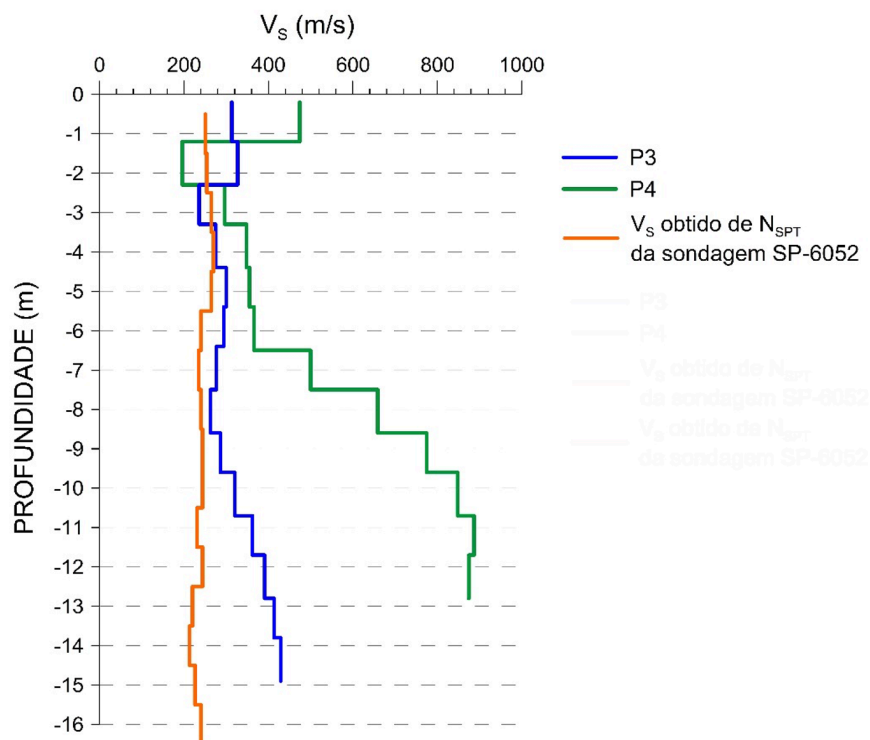
Outra análise que pode ser feita é com base em informações disponíveis de sondagens com ensaio SPT. Há uma notável e comprovada correspondência, respaldada por inúmeras correlações empíricas extraídas da literatura, entre o parâmetro V_s (velocidade da onda de cisalhamento, obtida pelos ensaios sísmicos) e o N_{SPT} (obtido dos ensaios de SPT nas sondagens a percussão).

Para a análise utilizando estes dois parâmetros, foi considerada a informação da sondagem SP6052 realizada pelo Metrô no entorno do Copan (FIGURA 2, apresentada anteriormente). Supondo-se que o piso do segundo subsolo do edifício esteja a 5 m abaixo do topo da SP6052, foram considerados os valores dos N_{SPT} abaixo de 5 m desta sondagem. Foi utilizada uma relação empírica obtida para areias siltosas (Pitikilas *et al.*, 1992 apud. Pedrini, 2012) (equação 2):

$$V_s = 162,0 \cdot N_{SPT}^{0,17} \quad \text{equação (2)}$$

O gráfico da FIGURA 13 mostra os perfis de V_s versus profundidade, obtidos nos pontos P3 e P4, e o perfil teórico de V_s calculado a partir do NSPT da sondagem SP 6052, utilizando a equação 2. Como resultado, verifica-se que o perfil de V_s calculado a partir do N_{SPT} apresenta uma boa correlação com o perfil de V_s do ponto P3 até aproximadamente 9 m de profundidade.

Figura 13 - Perfis de V_s versus profundidade.

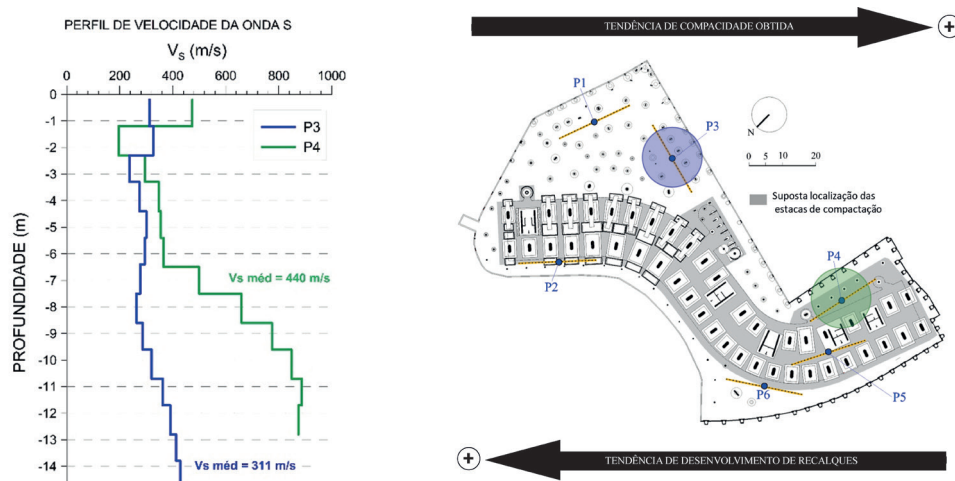


Fonte: elaborado pelos autores.

Os perfis de V_s versus profundidade podem levar, no mínimo, a duas linhas de análise:

- i. O perfil de velocidade do ponto P4 apresenta um valor de V_s médio maior (440 m/s) e camada subjacente com aumento acentuado de velocidades, sendo que ponto P4 está posicionado na porção do edifício apoiado em areia de maior compactação e que menos recalçou ao longo do tempo. Já o ponto P3, com menor valor de V_s médio (311 m/s), corresponde ao local onde foram observados os maiores recalques e onde o edifício está apoiado, supostamente, em material arenoso de compactação menor (**FIGURA 14**).

Figura 14 - Correlação dos resultados do ensaio sísmico de MASW (pontos P3 e P4) e a variação da compactação das areias no subsolo do terreno do Edifício Copan



Fonte: elaborado pelos autores.

- ii. O ponto P4 está, possivelmente, posicionado na porção do edifício apoiado sobre estaca de compactação, o que explicaria o aumento de velocidade V_s a partir da profundidade de 6 m. Já o ponto P3 está localizado conhecidamente onde não foram cravadas estacas de compactação abaixo das fundações.

7 Conclusões

No Edifício Copan foram realizados ensaios de MASW em seis pontos, sendo que em um deles a qualidade do dado não permitiu a obtenção de nenhuma informação, possivelmente por estar localizado sobre densas e profundas estruturas de fundação de concreto armado. Nos outros cinco pontos, a interpretação pode ser realizada em apenas dois destes (pontos P3 e P4), que apresentaram melhor qualidade e permitiram resultados mais assertivos e confiáveis.

A análise destes dois pontos mostrou resultados bem distintos do modelo de velocidade da onda de cisalhamento versus a profundidade, sendo verificado no ponto P4 um valor médio de V_s superior ao observado no ponto P3 (respectivamente, 440 m/s e 311 m/s). No ponto P4 foi ainda verificado um aumento acentuado de V_s a partir de 6 m de profundidade, aproximadamente, o que não foi verificado no ponto P3.

O número de pontos que geraram resultados com boa qualidade pode ser considerado pequeno para uma conclusão mais precisa. Os resultados obtidos, contudo, estão em conformidade com algumas das características esperadas para o terreno de fundação do Edifício Copan. Eles indicam que a compacidade do material superficial predominantemente arenoso, que ocorre no subsolo do edifício, é menor no ponto P3 e maior no ponto P4, o que condiz com o sentido de desenvolvimento de recalques do edifício. Além disso, aparentemente, o aumento das velocidades por volta de 6 metros de profundidade pode estar relacionado à existência das estacas de concreto armado utilizadas no adensamento do terreno abaixo da cota das fundações.

Não se observou um aumento acentuado de V_s nos pontos P1 e P3 a partir das profundidades entre 4 e 7 m, o que está de acordo com as hipóteses do estudo, uma vez que nesta área, de acordo com relatos e indícios documentais históricos, não foi realizado o estaqueamento para melhoria da compacidade das areias sob as fundações.

8 Considerações finais

Ensaio sísmico realizados em áreas urbanas, caracterizadas por ocorrência de um elevado nível de ruído (vibrações), limitação de espaço físico e presença de pisos de concreto e/ou pavimentos, que dificultam a instalação de sensores dos equipamentos, comumente utilizados para operar em terrenos constituídos por solos, são um grande desafio. Estas características foram verificadas no local onde os ensaios foram realizados, no segundo subsolo do Edifício Copan, no centro da cidade de São Paulo. Entretanto, o método sísmico MASW, que utiliza as ondas de superfície para a investigação do subsolo, pôde ser utilizado neste tipo de ambiente pelo fato de ser alta a razão sinal/ruído que ele proporciona.

No âmbito do estudo de construções históricas, a aquisição de informações sobre a infraestrutura e a superestrutura requer o uso de métodos não invasivos e não destrutivos à materialidade destas edificações. A partir desta premissa fundamental, explorar as ferramentas e métodos disponíveis nas áreas das engenharias e da física aplicada pode ser uma solução para suprir as lacunas de informações técnicas relacionadas a esses bens patrimoniais, resultando em efeitos positivos para as atividades de investigação, monitoramento e manutenção. O método MASW possui o potencial de contribuir com a investigação das características do solo superficial do terreno de embasamento de uma edificação histórica, antes de se recorrer a métodos mais invasivos, como as sondagens a percussão. Isso possibilita, por exemplo, uma melhor compreensão de situações de ocorrência de recalques diferenciais, principalmente em casos de fundações mais superficiais.

No caso apresentado, a utilização do MASW auxiliou na compreensão de algumas hipóteses levantadas anteriormente, como a existência de elementos de fundação superficial em determinados locais, diferença de compactação das areias superficiais entre as extremidades do edifício e a existência das estacas de compactação em regiões abaixo da cota das fundações em caixões. Os indícios obtidos, porém, não foram suficientes para confirmações destas hipóteses, muito devido à amostragem escolhida, limitando-se à função de dados auxiliares.

É evidente, portanto, que a utilização desse método exige um planejamento adequado, garantindo uma amostragem de tamanho e localização adequados para obtenção de resultados de qualidade que possam comprovar as informações desejadas. Nesse sentido, é recomendável a execução de contraprovas, de forma a se validar os resultados obtidos e isentar-se de qualquer falha executiva e/ou possíveis interferências físicas ocul-

tas presentes no local. Além disso, antes de conduzir os ensaios sísmicos MASW, uma opção interessante é a utilização simultânea de outros métodos geofísicos de varredura superficial, como o *Ground Penetrating Radar* - GPR, de forma a investigar possíveis obstáculos ocultos sob o piso e obter uma compreensão mais abrangente do local.

9 Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudos concedida – processo: 88887.512030/2020-00.

Ao condomínio do Edifício Copan, na figura do síndico Sr. Affonso Celso Prazeres de Oliveira, por permitir o desenvolvimento da pesquisa e por toda a ajuda despendida.

Ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) pelo financiamento dos ensaios.

10 Referências

BERNARDO, D. F. S.; OLIVEIRA, F. L.; CAMPOS, G. C. Monitoramento dos recalques do edifício Copan. In: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2022, Gramado. **Anais...** ALCONPAT Brasil: Gramado, 2022. p. 825-834.

_____. **Documentação e monitoramento estrutural do patrimônio arquitetônico moderno: os recalques do Edifício Copan.** Relatório das atividades realizadas no ano de 2023. Orientação: Profa. Fabiana Lopes de Oliveira (FAUUSP) e Profa. Dra. Gisleine Coelho de Campos (IPT). Bolsa de mestrado concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

_____. **Documentação e monitoramento do patrimônio arquitetônico moderno: os recalques do Edifício Copan.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

_____; OLIVEIRA, F. L. A tecnologia de 3D scanning em apoio à documentação técnica do edifício Copan. In: 4º WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE SISTEMAS E PROCESSOS CONSTRUTIVOS, agosto 2023, Porto Alegre. **Anais...** ANTAC, 2023.

FELICIANI, M, R. **Resistência e compressibilidade das areias basais do terciário de São Paulo.** 199. 193 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ICOMOS. Icomos Charter- Principles for the analysis, conservation, and structural restoration of architectural heritage. In: INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES. **Proceedings...** Thessalonik, 2003.

PARK, C. B., MILLER, R. D., XIA, J. Multichannel analysis of surface waves. **Geophysics**, v. 64, n.3, p. 800-808, 1999.

PEDRINI, R. A. A. **Desenvolvimento de sistema para sísmica up-hole em conjunto com o Ensaio SPT.** 2012. 127 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil e ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

TEIXEIRA, A. H. Alguns aspectos do comportamento de areias argilosas de baixa compacidade como apoio de fundações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1970, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1970. Vol.I, Tomo, p. 29-36.

VARGAS, M. Geotecnia do terciário de São Paulo. In: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, 1980, São Paulo, Mesa Redonda. **Anais...** São Paulo: Publicação Especial da ABGE e SBG: 1980. p. 37-45.

_____; PINTO, C. S.; MARINHO, F. A. M. As areias basais de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS, 1998. Vol. II, p. 721-728.

XIA, J.; Xia, J.; MILLER, R.D.; PARK, C.B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of *Rayleigh* waves. **Geophysics**, v.64, n.3, p.691-700, 1999.

10.29327/2202814.7.25-3

