

Avaliação do Processo de Subsidência de Solos Argilosos em Zona Urbana Costeira – Estudo de Caso

Pedro Henrique Da Rosa Marion

Bacharel em Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Frederico Westphalen, Brasil, phrmarion@gmail.com

Malva Andrea Mancuso

Doutora em Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, Brasil, malvamancuso@ufsm.br

Rodrigo André Klamt

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rodrigoklamt@outlook.com

Elisangela Aparecida Mazzutti

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, elisamazutti@hotmail.com

Luciéle Da Silva Knierim

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luh_knierim@hotmail.com

RESUMO: O solo é um material que serve como base para muitas obras civis. A presente pesquisa buscou avaliar o fenômeno de subsidência que ocorre no solo do bairro Pinheiro, da cidade de Maceió/AL, a partir da verificação do comportamento do mesmo sob um carregamento, verificando se a ocorrência do fenômeno estaria associada ao excesso de carga transferida ao solo. A metodologia consistiu em três etapas, na primeira, foi realizado um levantamento das condições geológicas e geotécnicas da região de ocorrência da subsidência. Na segunda, estimou-se a carga média transferida ao solo pelas fundações de uma edificação localizada no bairro Pinheiro, com base em trabalhos desenvolvidos sobre a cidade e a região afetada pela subsidência. Na terceira, foi avaliado o deslocamento do solo do bairro Pinheiro, utilizando a modelagem no software PLAXIS 2D. Constatou-se que o máximo deslocamento foi de -17,84 mm no plano vertical. A partir das verificações definiu-se, com auxílio da NBR 6122 (2019), que os deslocamentos gerados pelas fundações não seriam suficientes para defini-los como responsáveis pelo fenômeno de subsidência, sendo necessário estudos mais apurados para definir a ocorrência do fenômeno.

PALAVRAS-CHAVE: Palavras Deslocamento, modelagem, subsidência.

ABSTRACT: Soil is a material that serves as the basis for many civil works. This research sought to evaluate the phenomenon of subsidence that occurs in the soil of the Pinheiro neighborhood, in the city of Maceió/AL, by verifying its behavior under a load, checking whether the occurrence of the phenomenon would be associated with the excess load transferred to the ground. The methodology consisted of three stages, in the first, a survey of the geological and geotechnical conditions of the region where the subsidence occurred was carried out. In the second, the average load transferred to the ground by the foundations of a building located in the Pinheiro neighborhood was estimated, based on work carried out in the city and the region affected by subsidence. In the third, the soil displacement in the Pinheiro neighborhood was evaluated, using modeling in the PLAXIS 2D software. It was found that the maximum displacement was -17.84 mm in the vertical plane. From the verifications, it was defined, with the help of NBR 6122 (2019), that the displacements generated by the foundations would not be sufficient to define them as responsible for the subsidence phenomenon, requiring more detailed studies to define the occurrence of the phenomenon.

KEYWORDS: Displacement, shaping, subsidence.

1 INTRODUÇÃO

A relação existente entre as construções civis e o solo é de suma importância e necessita-se compreender as influências do mesmo nas estruturas visando o correto desenvolvimento de projetos civis, evitando gastos e desperdícios. Pressuposto a isto, conhecer os fenômenos relacionados ao solo e quais seus motivos de acontecimentos, tornam-se fundamentais. Dessa forma, nesta pesquisa, abordou-se a ocorrência do fenômeno de subsidência de solos em região urbana. Segundo Luna (2017), a subsidência é compreendida como o rebaixamento da superfície do terreno devido a ocorrência de alterações nas camadas subterrâneas, ou seja, diminuição do nível do terreno em consequência da remoção de suporte subterrâneo.

A ocorrência da subsidência em regiões urbanas, gera, frequentemente, alterações no meio físico com consequências de magnitudes variáveis. Segundo Maretti (2008), o processo de subsidência influencia no surgimento de diversos problemas que podem agravar e resultar na instabilidade e dano as edificações, as redes de esgoto e demais equipamentos instalados, assim como a infiltração de água contaminada proveniente de umidades mais superficiais. O fenômeno pode ocorrer de causas naturais, como dissolução de rochas, acomodação de camadas do substrato pelo seu próprio peso ou por movimentação segundo o plano de falhas. A ocorrência do processo influenciado por ações antrópicas é, frequente, em decorrência do bombeamento de águas subterrâneas e recalques por acréscimo de peso devido a obras e estruturas (ROMERO, 2007).

Conforme Maretti (2008), encontram-se registros da subsidência em países da Ásia, Europa e nas Américas, geralmente, em grandes centros urbanos industrializados, como no caso da Cidade do México, onde a origem do processo associa-se a exploração da água do subsolo para uso da população. No Brasil, os casos com maior repercussão foram os de Mairinque/SP, Cajamar/SP e Sete Lagoas/MG, ocorridos em 1981, 1986 e 1988, respectivamente. O acontecimento do fenômeno em Sete Lagoas e Cajamar, ocorridos em área urbana, ocasionaram o colapso do solo na região afetada, sendo aberta uma cratera com 20 m de diâmetro por 5 m de profundidade em Sete Lagoas e uma cratera de 31 m de diâmetro por 13 m de profundidade em Cajamar (LUNA, 2017).

Em função das situações expostas, este estudo tem como tema o recente caso de subsidência brasileira, localizada na região Nordeste do Brasil, na cidade de Maceió/AL, onde o processo intensificou-se nos primeiros meses de 2018 após ocorrência de fortes chuvas na região, segundo reportagem realizada pelo G1 (2018). Aproximadamente, no início de 2010 surgiram algumas fissuras nas vias urbanas e residências do bairro Pinheiro, apresentando intensificação nos primeiros meses de 2018 e culminando com um tremor de terra de 2,5 graus na escala Richter, causando apreensão na população da região (CAMPOS; SOARES; 2019).

Com propósito de compreender a ocorrência da subsidência, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio de um estudo de caso, a variação do deslocamento do solo presente na região afetada pelo fenômeno no bairro Pinheiro, Maceió/AL.

2 METODOLOGIA

Baseando-se nos relatórios técnicos elaborados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia com atribuição do Serviço Geológico do Brasil, destinada a investigar a subsidência em Maceió/AL, definiu-se o local da implantação da referida pesquisa, sendo a região afetada pelo fenômeno, que engloba três bairros da capital alagoana, com foco principal para o bairro Pinheiro. A pesquisa foi limitada apenas a este bairro, devido à grande quantidade necessária de conteúdo para analisar e detalhar sobre os demais bairros de ocorrência do fenômeno.

A elaboração da pesquisa foi feita em três etapas, onde na primeira foi realizado um levantamento das condições geológicas e geotécnicas da região de ocorrência da subsidência. Na segunda etapa, estimou-se a carga média transferida ao solo pelas fundações de uma edificação localizada no bairro Pinheiro. A estimativa ocorreu baseando-se em trabalhos desenvolvidos sobre a cidade e a região afetada pela subsidência. E a terceira foi destinada para avaliar o deslocamento do solo do bairro Pinheiro, a partir da modelagem no *software* PLAXIS 2D. Esta verificação foi realizada com base nas condições geológicas presentes na região, demonstradas por pesquisas e relatórios desenvolvidos pela Embrapa, CPRM e demais autores, conforme a necessidade de conteúdo.

Ressalta-se que para a modelagem realizada no software citado acima, considerou-se as características presentes no solo, levando em conta a variação das camadas do mesmo e principalmente a variação do lençol freático.

2.1 Informações geológico-geotécnicas

Pesquisas realizadas pela CPRM (2019) descreveram que o bairro Pinheiro foi construído sobre sedimentos pouco consolidados formados principalmente de areia, silte e argila de cor variada, apresentando concentrações de ferro e conglomeráticos, com disposição de camadas de forma irregular, sendo em diversas vezes lenticulares. A partir da presença de alguns poços de exploração de minérios do solo de uma empresa, localizados no bairro em destaque, foi definida a estratigrafia do solo presente na região até a profundidade de 1.250 m. Sendo assim, considerando as análises superficiais como mais importantes para esta pesquisa, foi encontrado pela CPRM (2019), a uma profundidade de 80 a 180 m, materiais pertencentes à sub-bacia de Alagoas, como argilitos de cor cinza clara e arenitos friáveis com granulometria variável de fina a grossa.

Conforme a CPRM (2019), foram realizados quatro ensaios SPT na etapa de conhecimento do solo do Edifício Barcelos, onde todos os ensaios apresentaram variações semelhantes, com valores aproximados de 30 golpes na superfície e reduzindo até, aproximadamente, 05 golpes, entre as profundidades de 1,00 a 6,00 m. A partir dos 12 metros de profundidade, a quantidade de golpes necessários para a perfuração tornou a aumentar, ultrapassando a 25 golpes. Além, são fornecidas demais características pela CPRM (2019), como o posicionamento das fundações do Edifício Barcelos a uma profundidade de 18,00 m.

Dessa forma, baseando-se no relatório das sondagens efetuadas para o mesmo edifício, conclui-se que suas fundações estariam apoiadas em uma camada com N_{SPT} acima de 30/35 golpes ou no impenetrável. Entretanto, mesmo estando em uma camada resistente, foi possível observar rachaduras no piso da garagem, paredes e pilares, com aberturas relevantes e de grande persistência, segundo a CPRM (2019).

A CPRM (2019) realizou nove sondagens no Conjunto Jardim Acácia, onde está localizado o Edifício Barcelos, para verificar a presença de fissuras em outras construções locais e entender o solo ao redor delas. O solo foi descrito como argilas siltosas, com pouca areia, aumentando em consistência com a profundidade, variando de muito mole a dura. Após estudos, a empresa descartou que as ocorrências patológicas nos edifícios do conjunto estivessem relacionadas às camadas superficiais do solo ou a solos expansíveis ou colapsíveis.

A CPRM (2019) realizou algumas investigações geotécnicas em demais localidades situadas no bairro Pinheiro, com intuito de compreender se a ocorrência do processo de subsidência estaria associada as camadas mais superficiais do solo. Com isso, a empresa em destaque realizou oito sondagens percussivas em pontos específicos do bairro, onde as mesmas foram denominadas de SP-01 a SP-08.

Com as localidades determinadas e início dos ensaios, a CPRM (2019) realizou algumas coletas de amostras em cada sondagem executada para ensaios de caracterização. A partir da análise tátil-visual efetuada nas amostras, foi possível identificar que as mesmas eram sedimentos detríticos siliciclásticos, pouco a medianamente consolidados, com coloração variegada, de partículas com granulometria variando de argila a areia grossa.

Por fim, a CPRM (2019) relatou que mesmo com as sondagens programadas para serem efetuadas até uma profundidade de 20,00 m, foi atingido o impenetrável das perfurações em cotas que variam de 8,21 a 18,24 m. Devido a informação mencionada e aos resultados de todos os ensaios e análises efetuadas nas amostras, a empresa em destaque concluiu que a ocorrência do processo de subsidência não estava relacionada com a presença de solos expansíveis e colapsíveis como fatores desestabilizadores das edificações, pois, de modo geral, os solos verificados foram classificados como sedimentos medianamente compactos até cerca de 6,50 m, onde tornam-se compactos a partir deste nível. Entretanto, a CPRM (2019) ressaltou que as características analisadas são baseadas na interpolação de resultados obtidos de apenas oito pontos no bairro Pinheiro, sendo possível que existam variações geotécnicas do terreno que não foram identificadas durante a realização das investigações.

Adotou-se para as condições de contorno do modelo finito para a modelagem, uma área base contendo dimensões de 50,00 m de comprimento, no plano horizontal, e 18,00 m de profundidade, no plano vertical.

A escolha das características do solo atribuídas para a avaliação, associa-se as pesquisas realizadas pela CPRM (2019) no bairro Pinheiro, onde as mesmas foram descritas ao decorrer deste trabalho. Para o estudo de caso, adotou-se as características disponibilizadas pela empresa supracitada, de uma sondagem SPT executada por Rocha Júnior (2002).

Da profundidade 1 a 3 m, o solo se caracterizou como argila pouco arenosa amarelada média a mole; de 4 a 10 m, argila pouco arenosa avermelhada média a rija; de 11 a 13 m, argila arenosa avermelhada rija a dura. Já o número de golpes dos últimos 30 cm da profundidade de 1 a 13 m foi 4, 7, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 15, 13, 16, 27, 29, respectivamente. Já o nível de água não foi encontrado (ROCHA JÚNIOR, 2002).

Ressalta-se, que para atribuir as características citadas por Rocha Júnior (2002) para a modelagem, necessitou-se a adoção de alguns parâmetros com base em estudos realizados por outros autores com solos semelhantes, devido a carência desses dados atualizados do local específico. Com isso, para os parâmetros do solo relativo à resistência e deformabilidade em função do SPT, adotou-se os valores disponibilizados por Marangon (2018a) para argilas e solos argilosos.

Para determinar o Coeficiente de Permeabilidade (K) empregado nos solos, considerou-se as estimativas desenvolvidas por Marangon (2018b), onde o autor recomenda a adoção de valores para infiltração variando entre $8,64 \times 10^{-7}$ a $8,64 \times 10^{-5}$ m/dia para argilas não alteradas, impermeáveis. Para o Módulo de Elasticidade (E') de argilas arenosas, empregou-se o valor intermediário de 36.250 kN/m^2 , apoiando-se nas recomendações de Marangon (2018c). Por fim, para finalizar a inserção de parâmetros referentes aos solos na modelagem, adotou-se como valor para o Peso Específico do Solo Saturado (γ_{sat}) a estimativa de 20 kN/m^3 para todos os solos em estudo. Essa adoção teve como base as orientações de Pinto (2006).

2.2 PLAXIS 2D: Desenvolvimento da modelagem do estudo de caso

Com os parâmetros dos solos definidos, foi possível adotar para o estudo de caso uma edificação presente na região em análise e estimar uma carga média transmitida ao solo pela mesma. Para definir a edificação, considerou-se a mesma como sendo a pior situação de transmissão de cargas ao solo. Amparando-se nas considerações mencionadas, optou-se por realizar a estimativa de cargas transmitidas ao solo pelas fundações de um edifício, tendo como base o modelo do Edifício Barcelos.

A partir das informações divulgadas pela construtora do Edifício Barcelos – Construart (2021) - verificou-se que o mesmo é composto por 18 pavimentos, onde o pavimento subsolo é destinado exclusivamente para garagem e o pavimento térreo, em pilotis, é destinado para garagem e uso comum dos residentes. Verificou-se também que o edifício possui 15 pavimentos tipo, que contém 12 apartamentos cada, sendo 08 apartamentos com área de $48,00 \text{ m}^2$ e 04 apartamentos com área de $61,00 \text{ m}^2$. O pavimento cobertura, é constituído de 08 apartamentos, onde 04 possuem área de $61,00 \text{ m}^2$ e os outros 04 apartamentos possuem área de $48,00 \text{ m}^2$.

Para realizar a estimativa das cargas transmitidas ao solo pelas fundações, efetuou-se uma análise com base nas áreas de influência de cada pilar, a partir da verificação do posicionamento dos mesmos com auxílio do software AutoCAD. Inicialmente, considerou-se que a edificação foi projetada em concreto armado e possui lajes maciças e paredes compostas de tijolos cerâmicos. Para definir o carregamento médio dos pavimentos tipo, considerando as cargas permanentes e variáveis, utilizou-se a carga recomendada por Alva (2007) de $12,00 \text{ kN/m}^2$. Para estimar o carregamento dos pavimentos subsolo, térreo e cobertura, atribui-se as mesmas condições de análise aplicadas ao pavimento tipo, adotando a mesma carga supracitada. Já para o carregamento da laje do pavimento cobertura, considerou-se 70% do carregamento do pavimento tipo, conforme recomendado por Alva (2007).

Adotou-se como modelo de fundação um radier de concreto armado, com dimensões de $37,50 \text{ m}$ de comprimento, $20,00 \text{ m}$ de largura e $1,00 \text{ m}$ de altura, estaqueado, sendo representada na modelagem as dimensões de largura, altura e algumas estacas.

Para modelar a estrutura citada, necessitou-se adotar alguns parâmetros, como o valor de 0,2 para o Coeficiente de Poisson (ν) e $28 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ para o Módulo de Elasticidade (E) do concreto armado, considerando-o como da classe C25. Ambos os parâmetros foram definidos com auxílio da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para complementar os dados referentes ao concreto, empregou-se o valor de 25 kN/m^3 para o Peso Específico (γ) do mesmo, determinado a partir da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Para a determinação das estacas a serem inseridas sob o radier para a modelagem, considerou-se as definições desenvolvidas por Cintra e Aoki (2010) para escolha do modelo empregado, a partir do valor do N_{SPT} da cota de assentamento para a estaca. Sendo assim, para a cota de assentamento das estacas – $18,00 \text{ m}$ – considerou-se o mesmo valor de $N_{\text{SPT}} = 29$ golpes, sendo este o mesmo valor encontrado na última cota – $13,00 \text{ m}$ – da verificação realizada durante a sondagem SPT executada no lote do Edifício Barcelos.

Devido a isso, adotou-se o modelo de estaca Franki para solos argilosos, onde, segundo os autores mencionados, o mesmo pode ser empregado em solos que apresentem N_{SPT} superior a 20 golpes e inferior ou igual a 40 golpes ($20 < N_{\text{SPT}} \leq 40$). Com auxílio das recomendações dos mesmos autores – Cintra e Aoki (2010)

– determinou-se o emprego de estacas de modelo Franki com diâmetro de 60 cm, onde essas possuem a capacidade de suportar até 1.700 kN.

Após a escolha do diâmetro das estacas adotadas, determinou-se a quantidade de estruturas necessárias para suportar o carregamento da edificação em análise. Considerando a carga total estimada para o Edifício Barcelos e a capacidade de suporte do modelo de fundação adotado, definiu-se a quantidade necessária de 93 estacas a serem inseridas sob o radier. Porém, adotou-se o emprego de 99 estacas, distribuídas em 11 filas com 09 estacas em cada uma, distanciadas a 2,06 m entre estacas da mesma fila e a 3,18 m entre cada fila.

Considerou-se o emprego do lençol freático na cota de 13,00 m de profundidade. A consideração do mesmo até a cota citada, baseia-se no fato da possibilidade da presença de água na região de assentamento das estacas do Edifício Barcelos, sendo essa a profundidade de 18,00 m.

Com a estimativa do carregamento total efetuada, avaliou-se o comportamento do solo sob as fundações do Edifício Barcelos a partir da modelagem do *software* geotécnico PLAXIS 2D. O Quadro 1 traz as propriedades consideradas para a modelagem.

Quadro 1. Valores adotados para os parâmetros de resistência e deformabilidade em função do SPT e permeabilidade.

Parâmetros adotados para a modelagem dos solos								
Característica do material	Consistência	γ	γ_{sat}	C	ϕ	E'	v	K
Argila pouco arenosa, amarelada	Mole a média	16	20	25	0	36.250	0,25	8,64x10 ⁻⁶
Argila pouco arenosa, avermelhada	Média a rija	18	20	50	0	36.250		
Argila arenosa, avermelhada	Rija a dura	19	20	150	0	32.250		

* γ : Peso Específico Natural do Solo (kN/m³); γ_{sat} : Peso Específico do Solo Saturado (kN/m³); C: Coesão (kN/m²); ϕ : Ângulo de Atrito Interno (°); E': Módulo de Elasticidade (drenado); v: Coeficiente de Poisson; K: Coeficiente de Permeabilidade (m/dia).

Com a definição do diâmetro das estacas Franki adotadas para a modelagem, foi determinado a quantidade do emprego e a carga suportada pelas mesmas. Inicialmente, durante o desenvolvimento da metodologia desta pesquisa, foi determinada a necessidade de 93 estacas para suportar o carregamento total de 157.793,59 kN estimado para o Edifício Barcelos, considerando que cada estrutura suportaria a carga máxima de 1.700 kN.

Entretanto, devido o emprego de 99 estacas, recalculou-se o carregamento suportado considerando a utilização de 06 estacas a mais. Com isso, foi definido que cada estaca adotada suportaria, aproximadamente, 1.593,9 kN, distribuídos sobre o diâmetro das mesmas. Após a determinação de todos os parâmetros referentes ao solo e definição do modelo de estrutura e do carregamento estimado para a mesma, foi avaliado o deslocamento do solo obtido através da modelagem. Porém, destaca-se que para executar a análise, empregou-se apenas 09 estacas no modelo finito desenvolvido. O emprego da quantidade de estacas supracitada, associa-se as limitações de representação de estruturas pela dimensão de análise do PLAXIS 2D.

É importante destacar que os parâmetros adotados ao longo desta metodologia foram utilizados frente a ser um estudo preliminar e todas as simplificações e hipóteses adotadas alteram efetivamente a modelagem. Os resultados obtidos são função das condições impostas e parâmetros utilizados, o que efetivamente pode não representar a realidade.

3 RESULTADOS

3.1 Carregamentos da edificação

Inicialmente, foi verificado, a variação das dimensões dos pilares do Edifício Barcelos, constatando três variações de seção, sendo 20 x 95 cm, 20 x 110 cm e 20 x 220 cm, aproximadamente. Além das variações citadas, foi possível identificar um suposto reforço estrutural em um dos poços de elevadores e na escadaria, com dimensões aproximadas de 20 x 676 cm e 20 x 474 cm, respectivamente. A partir da verificação das seções dos pilares foi estabelecida a área de influência de cada estrutura com intuito de estimar o carregamento total dos pavimentos.

Com base no resultado dos cálculos realizados para os pilares, foi calculada a estimativa de carregamento do pavimento tipo, onde este foi executado a partir dos valores obtidos para os pilares. Por fim, determinou-se como carregamento total para o edifício em destaque o valor de 157.793,59 kN, sendo esta estimativa gerada através dos cálculos efetuados inicialmente. Destaca-se, que o alto valor estimado de carregamento pode ser atribuído as condições descritas sobre o Edifício Barcelos, principalmente pelo fato do mesmo possuir uma quantidade considerável de apartamentos por pavimento tipo e pelas condições de análise de carregamento adotadas pelos autores desta pesquisa.

Ressalta-se, que para obter valores mais confiáveis de carregamentos transferidos por pavimento para as fundações, necessita-se de estudos mais aprofundados, com a utilização de *softwares* estruturais, indicados para tal função. Referindo-se a esta pesquisa, a busca por valores mais confiáveis de carregamento foge do foco principal da mesma, sendo aceitável um valor estimado para avaliar o solo da região de estudo. Após, foi avaliado o solo situado abaixo do edifício, a partir da modelagem no *software* PLAXIS 2D.

3.2 Avaliação do solo do bairro Pinheiro a partir do PLAXIS 2D

3.2.1 Deslocamentos verticais e horizontais estimados da área em análise

Após a realização dos cálculos pelo software, verificou-se, uma variação de deslocamento vertical entre 0,000 mm a -17,84 mm. Com os dados de cálculos fornecidos pela análise do deslocamento vertical, constatou-se que o elemento 813 do nó 56, situado no terceiro horizonte de solo, aproximadamente, na cota de assentamento das estacas, apresentava uma estimativa de deslocamento vertical muito baixa, podendo ser considerada como inexistente. Já, o elemento 14 do nó 11.083, localizado no primeiro horizonte de solo, próximo a superfície, demonstrou o valor estimado de -17,84 mm para o deslocamento no mesmo sentido em análise.

Notou-se a partir da análise que a ocorrência dos maiores valores de deslocamento situam-se próximos a superfície, aos arredores da estrutura inserida sobre o solo, demonstrando a influência causada pela peça. Verifica-se também, o baixo valor de deslocamento na região onde encontram-se as estacas, representando que o mesmo diminui ao decorrer da profundidade.

Com intuito de representar a variação dos deslocamentos de forma mais clara e objetiva, selecionou-se 10 nós, a partir do nó inicial da malha de modelagem, para demonstrar seus deslocamentos. Para a determinação dos nós selecionados, optou-se por verificar uma das extremidades dos horizontes do solo a cada 2,00 m de profundidade, supondo a ocorrência dos maiores deslocamentos na seção referenciada.

Após analisar a variação do deslocamento vertical ocorrido no solo, a partir das condições impostas ao mesmo, verificou-se as estimativas de deslocamento horizontal geradas na modelagem, considerando as mesmas condições de análise. A Figura 1 demonstra as estimativas dos deslocamentos (a) verticais e (b) horizontais.

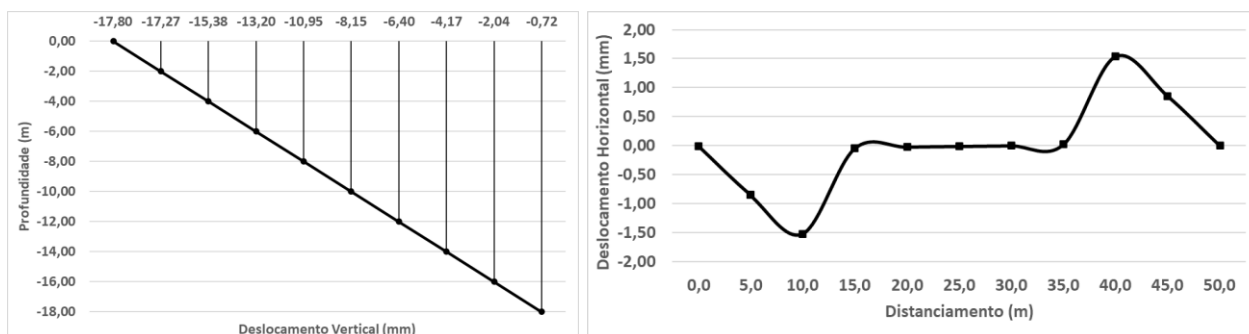


Figura 1. (a) Variação das cotas x deslocamento vertical do solo; (b) Distanciamento x deslocamento horizontal.

A partir da análise dos resultados obtidos – Figura 1 – durante modelagem, analisou-se o deslocamento horizontal sobre a área base, onde constatou-se a variação de 5,81 mm a - 6,19 mm, sendo estas, as estimativas máximas e mínimas para os deslocamentos do plano em análise, respectivamente. Também observou-se que os deslocamentos horizontais máximos e mínimos ocorrem próximos a superfície, especificamente, no

horizonte de solo de inserção do radier. O deslocamento horizontal máximo, conforme análise dos resultados, situa-se no elemento 21 do nó 10.027 e, o deslocamento horizontal mínimo, está localizado no elemento 12 do nó 1.416.

Para representar a variação do deslocamento horizontal, realizou-se a análise do mesmo no horizonte de assentamento do radier. Nesta verificação, selecionou-se 10 nós, a partir do nó inicial, distanciados a cada 5,00 m, da malha de elementos finitos desenvolvida na modelagem.

Com o detalhamento das estimativas de deslocamentos analisadas em determinados trechos da modelagem, nota-se, que os maiores deslocamentos estão situados próximos a superfície do solo, sendo o máximo valor estimado de -17,78 mm, visualizado durante a análise vertical da modelagem.

Ressalta-se, que os resultados obtidos de deslocamento podem estar influenciados diretamente pelas condições impostas ao solo, como determinação de parâmetros, e as estruturas definidas como modelo de fundação da edificação escolhida para a modelagem. Com isso, torna-se essencial a verificação dos deslocamentos ocorridos na cota de assentamento das fundações, para verificar, a partir de bibliografias, se os mesmos se encontram dentro dos limites toleráveis.

3.2.2 Deslocamentos estimados na cota de assentamento das estacas

A análise dos deslocamentos ocorridos no contato entre o solo e o modelo de fundação determinado para uma edificação é de suma importância, pois, a partir dos resultados obtidos, pode-se estimar o recalque desenvolvido entre a interação solo – estrutura e atribuir, com base na estimativa, possíveis patologias originadas na edificação ao mesmo. Com a modelagem realizada na análise do solo situado sob o Edifício Barcelos, verificou-se a variação dos deslocamentos ocorridos na interação entre as estacas de modelo Franki, empregadas como estruturas responsáveis pela transferência do carregamento total estimado, e o solo. Para a verificação, utilizou-se apenas as 09 estacas.

Após a identificação das estacas, definiu-se os deslocamentos estimados para cada uma. Para a definição dos valores referentes aos deslocamentos escolhidos, optou-se por selecionar as estimativas geradas no ponto central de cada estrutura, localizado na cota de assentamento de 18,00 m de profundidade. A estimativa do deslocamento das estacas em análise de 01 a 09 foi $0,2160 \cdot 10^{-6}$, $0,2546 \cdot 10^{-6}$, $0,2551 \cdot 10^{-6}$, $0,2530 \cdot 10^{-6}$, $0,2256 \cdot 10^{-6}$, $0,2405 \cdot 10^{-6}$, $0,2561 \cdot 10^{-6}$, $0,2153 \cdot 10^{-6}$ e $0,2341 \cdot 10^{-6}$ m, respectivamente.

Observa-se que os baixos valores gerados para as estimativas dos deslocamentos das estacas. Tais valores, associam-se ao fato de o autor desta pesquisa supor que o assentamento das estacas esteja no impenetrável ou em uma camada de solo com NSPT superior ao da cota de assentamento das mesmas. Sendo assim, ressalta-se que possíveis variações nos valores de deslocamento das estruturas inseridas ao solo podem ser encontradas, a partir da variação da cota de assentamento das estacas.

Para analisar os deslocamentos e verificar se os valores obtidos são aceitáveis, baseou-se nas informações dispostas pela NBR 6122 (ABNT, 2019). Levando em conta os critérios de verificação dos valores limites para os deslocamentos das fundações, da norma supracitada, considera-se os valores de deslocamentos verificados na cota de assentamento das estacas como aceitáveis para a edificação em análise. Tal fato, baseia-se nas condições atribuídas ao solo, como a rigidez das camadas e as características de composição. Além disso, considera-se o modelo de fundação empregado para a transferência do carregamento ao solo, sendo que para a modelagem, optou-se pelo emprego de uma estrutura com alta capacidade de suporte de carga.

Verificou-se, a partir dos resultados desta pesquisa, que os deslocamentos verticais e horizontais máximos estão situados próximos a superfície, sendo que aquele apresenta variações ao decorrer da profundidade, com os valores mínimos de deslocamento vertical juntos da cota de inserção das fundações, e este, com a variação do deslocamento horizontal na extensão da área base determinada para análise, com deslocamento negativo nos trechos iniciais e positivos nos trechos finais da mesma.

Os resultados obtidos dos deslocamentos estimados estão associados diretamente nas condições impostas ao solo, como a adoção de parâmetros e, principalmente, com a inserção de estruturas e carregamentos sobre o mesmo, como a determinação do modelo de fundação adotado para a edificação em análise. Devido a isso, destaca-se que para a obtenção de resultados mais confiáveis, necessita-se de estudos mais aprofundados, como a aplicação de ensaios in situ, coleta de solo para análise, melhor acurácia dos carregamentos transferidos ao solo e verificação da variação do lençol freático.

4 CONCLUSÕES

Após as verificações iniciais, destinou-se o foco do estudo para o bairro Pinheiro, local onde iniciou-se há alguns anos o processo de subsidência. Com relatórios disponibilizados pela CPRM, pôde-se analisar alguns estudos realizados pela mesma e conteúdos obtidos através de terceiros, referentes ao solo do bairro em análise. A partir do resultado de uma sondagem a percussão realizada em um lote situado no bairro Pinheiro para a construção do edifício Barcelos – mesmo edifício aplicado ao estudo - pôde-se analisar as camadas encontradas na sondagem através de modelagem em software.

Portanto, no estudo de caso realizado, com auxílio do software geotécnico PLAXIS 2D, a partir das estimativas obtidas pela modelagem, conclui-se que o carregamento transferido ao solo, com base nos parâmetros adotados e na estrutura de fundação determinada, não seria responsável pela ocorrência do processo de subsidência no bairro Pinheiro, pois os deslocamentos estimados e analisados apresentam baixos valores, impossibilitando que os mesmos sejam as principais causas da ocorrência do processo supracitado. Sendo assim, a partir da revisão de literatura estudada, estima-se que o fenômeno poderia ser influenciado por ações antrópicas, como a exploração das águas subterrâneas para consumo da população ou extração de minérios do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, G. M. S. (2007). *Concepção Estrutural de Edifícios em Concreto Armado*. Santa Maria: Ufsm. 24 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt. 238 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt. 60 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt. 108 p.
- Campos, C. K. S., Soares, D. S. (2019). *Análise Setorial da Extração de Água Subterrânea: Estudo de caso no bairro Pinheiro / Maceió - AL*. 2019. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N. (2010). *Fundações Por Estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos. 96 p.
- Construart (2012). *Obras Realizadas: edifício barcelos*. Edifício Barcelos.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Estudos Sobre a Instabilidade do Terreno nos Bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): caracterização geológico-geotécnica. Rio de Janeiro: CPRM, 2019.
- Luna, R. M. R. D. (2017). *Investigação da Ocorrência de Subsidência do Solo em Região de Exploração de Aquíferos na Planície Costeira da Cidade do Recife em Pernambuco*. 2017. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Marangon, M. (2018a). *Geotecnia de Fundações*. Juiz de Fora: Ufjf. 168 p.
- Marangon, M. (2018b). *Mecânica dos Solos: hidráulica dos solos*. 2. ed. Juiz de Fora: Ufjf. 7 v.
- Marangon, M. (2018c). *Mecânica dos Solos: capacidade de carga dos solos*. 2. ed. Juiz de Fora: Ufjf. 7 p.
- Maretti, E. P. (2008). *Subsidência de Solo Deflagrada por Intervenções Antrópicas: Estudo de Caso em Área Situada na Porção Nordeste da Cidade Universitária, Butantã, São Paulo - S.P.* 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo.
- Pinto, C. D. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 354 p
- Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. *Solos do Município de Maceió - AL*. Rio de Janeiro: Embrapa, 2008. 195 p.
- Rocha Júnior (2002). *Relatório de Sondagem SPT n. 173/02*. Maceió: Rocha Júnior Sondagens.
- Romero, C. M. (2007). *Riscos e qualidade ambiental urbana no caso de Cajamar (SP)*. 2007. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Geografia, Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro.