

**Modelagem de Superfícies para Análise de Estabilização de Recalques na
Perspectiva da Interação Solo Estrutura****Surface Modeling for Discharge Stabilization Analysis from a Soil****Interaction Perspective Structure**

DOI:10.34117/bjdv6n1-111

Recebimento dos originais: 30/11/2019

Aceitação para publicação: 13/01/2020

Pedro Henrique Abem-Athar Frias

Engenheiro Civil pelo Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Instituição: BMS Engenharia Ltda

Endereço: SCN Quadra 1 – Bloco F – Sala 52 – Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

E-mail: pedrohfrias@gmail.com

Gabriela de Athayde Duboc Bahia

Mestre em Geotecnia pela Universidade de Brasília - UnB

Instituição: Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Endereço: SEPN 707/907 Campus Universitário – Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

E-mail: gabriela.bahia@ceub.edu.br

Neusa Maria Bezerra Mota

Doutora em Geotecnia pela Universidade de Brasília - UnB

Instituição: Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Endereço: SEPN 707/907 Campus Universitário – Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

E-mail: neusa.mota@ceub.edu.br

Tiago Merllo Pereira

Engenheiro Civil pelo Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Instituição: Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

Endereço: SEPN 707/907 Campus Universitário – Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

E-mail: merllotiago@gmail.com

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise da interação solo-estrutura através da deformada de recalques. Para tanto, elaborou-se um código de programação para geração das deformadas, utilizando um modelo de dispersão de dados junto à interpolação espacial de malha triangular. Em seguida, realizou-se uma comparação entre consecutivas análises de monitoramento de recalques realizados em um edifício localizado em Ceilândia/DF. Por meio das análises determinaram-se as possíveis causas de variação de recalque repentina de determinados pilares, além de detectar o alcance do estado de adensamento secundário. Por

meio do estudo foi possível verificar que os indicadores de desempenho mostraram-se satisfatórios.

Palavras-Chave: Monitoramento, Adensamento, Recalque.

ABSTARCT

This paper aims to present an analysis of the soil-structure interaction through the deformation of repression. To this end, a programming code was elaborated for the deformed generation, using a data dispersion model next to the triangular mesh spatial interpolation. Then, a comparison was made between consecutive analyzes of repression monitoring carried out in a building located in Ceilândia / DF. Through the analyzes, the possible causes of sudden repression variation of certain pillars were determined, besides detecting the reach of the secondary densification state. Through the study it was possible to verify that the performance indicators were satisfactory.

Keywords: Monitoring, Density, Repression.

1 INTRODUÇÃO

Um maciço de solo é uma estrutura natural formada por múltiplas extratificações, geralmente, não homogêneas, que apresentam comportamentos distintos. Logo, o solo é um sistema extremamente complexo que necessita de estudo e amostragem para determinação do seu comportamento.

O recalque é um fenômeno comum a todas as estruturas apoiadas no solo. Ocorre, principalmente, devido ao carregamento imposto ao maciço e ao conseqüente rearranjo da estrutura do solo. Ao longo do tempo, provoca deformações que, modificam a distribuição de carregamentos na estrutura, podendo fazer com que estes fiquem fora dos padrões definidos em projetos.

A referida modificação de carregamentos na edificação pode corroborar com o aparecimento de manifestações patológicas, podendo causar desde um desconforto visual até danos severos que colocam em risco a integridade da estrutura.

Tal constatação implica na tratativa de elaborar projetos estruturais e geotécnicos de maneira integrada a fim de obter análises mais condizentes com a realidade. Além disso, se faz necessário o acompanhamento do desempenho da edificação por meio de monitoramentos de recalque, iniciados desde a fase construtiva até a vida útil da edificação.

Vale destacar, que a importância de se iniciar o monitoramento de recalques na fase construtiva se dá tanto para ter um entendimento global do comportamento da edificação quanto para detecção prévia de anomalias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECALQUE

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2010), recalque pode ser definido como o movimento vertical descendente de um elemento estrutural. Para Alonso (1991, 14p.) “O recalque absoluto é definido pelo deslocamento vertical de um elemento de fundação. A diferença entre os recalques absolutos de dois quaisquer elementos da fundação é o recalque diferencial”.

Rebello (2011) caracteriza o recalque como a deformação sofrida pelo solo por meio do carregamento que lhe é imposto. Esta deformação faz com que as fundações se movimentem, e a depender da intensidade é possível que comprometa a estrutura de um edifício. Para ele, as deformações podem ocorrer de três formas: deformação elástica do solo, escoamento lateral e deformação por adensamento.

2.1.1 Tipos de Recalque

Recalque elástico é o que pode ser verificado imediatamente após a aplicação de carregamento no maciço. Sua ocorrência e intensidade estão associadas ao tipo de solo, ocorrendo com maior intensidade em solos não coesivos e menor em solos argilosos.

As deformações por adensamento ocorrem devido à diminuição do volume, causada pela expulsão de água dos vazios. O fenômeno de adensamento divide-se em primário e secundário.

Melo (2003) afirma que o adensamento primário ocorre devido à drenagem do solo a partir de uma tensão aplicada, esta resposta é imediata ao esforço exercido no solo. Conforme Simons e Menzies (1977), os recalques instantâneos se diferem dos recalques por adensamento primário por estes serem resultantes da dissipação de poropressão, enquanto aqueles serem resultantes das deformações das massa do solo, a volume constante no momento que são carregados.

Por fim, o adensamento secundário (também chamado de fluência, “creep”) ocorre devido às tensões efetivas. A parcela do solo que está exposta a um carregamento mais intenso tende a migrar para locais onde as solicitações são menores, causando um fluxo de material a partir do epicentro da região de carregamento. Pode ser observado em solos coesivos

saturados, sendo o resultado do ajuste plástico das partículas do solo (BRAJA, 2012).

2.1.2 Monitoramento de Recalque

O monitoramento de recalque é um procedimento que ocorre repetidas vezes com espaçamento entre as medições. Esta técnica fornece dados de quanto uma estrutura recalcou desde o seu nivelamento. O monitoramento fornece informações sobre o desempenho das fundações, por intermédio da magnitude dos recalques, presença de recalque diferencial, velocidade de recalque e recalque distorcional.

Milititsky et al. (2015) recomendam que para uma análise mais rigorosa acerca dos deslocamentos dos elementos de fundações verifique-se junto ao recalque absoluto a velocidade de recalque. Os autores também apresentam valores de referência que podem ser utilizados para determinar a eficácia dos elementos de fundação:

- Prédios com mais de cinco anos de construção, velocidade menor que 10 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Entre um e cinco anos de construção, entre 10 e 20 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Prédios em fundações diretas em fase construtiva, até 200 $\mu\text{m}/\text{dia}$
- Prédio em fundações profundas em fase construtiva, máximo 80 $\mu\text{m}/\text{dia}$.

O recalque diferencial (figura 1) ocorre quando não existe uniformidade nos deslocamentos das fundações, o que pode provocar uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais.

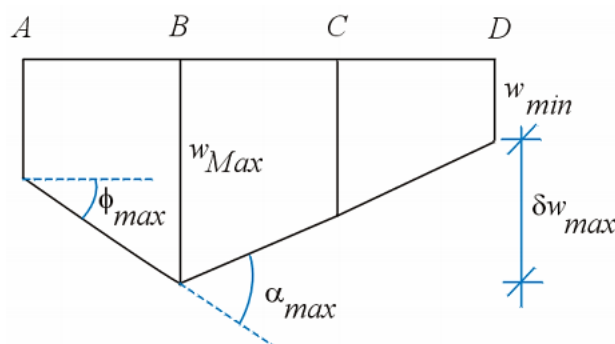


Figura 1 - Recalques diferencial, absoluto, rotação e deformação angular.

Fonte - Barros (2005)

O recalque distorcional (figura 2) é definido como o recalque diferencial sobre as distâncias entre os elementos que o compõe, considerando o desaprumo da edificação

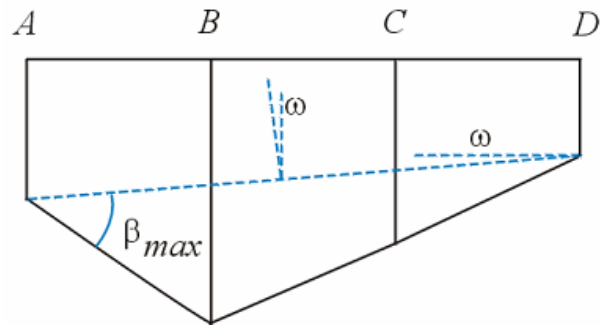


Figura 2 – Distorção angular e desaprumo.

Fonte - Barros (2005)

Velloso e Lopes (1997) ressaltam que a previsão de recalques é uma das técnicas mais complexas da geotecnia e os resultados obtidos por cálculos, mesmo que sofisticados, devam ser assumidos como estimativas, evidenciando a necessidade de realizar a medição para obter resultados realistas.

De acordo com Velloso e Lopes (2011), os principais limites de distorção angular existentes, associados a manifestações patológicas observadas nas estruturas, são:

- 1/500: Limite de segurança para edifícios onde a fissuração não é aceitável;
- 1/300: Limite a partir do qual é de se esperar uma primeira fissura em painéis e dificuldade em pontes rolantes;
- 1/250: Limite a partir do qual se torna visível a inclinação em edifícios altos;
- 1/100: Limite a partir do qual é de se recear danos estruturais em edifícios em geral.

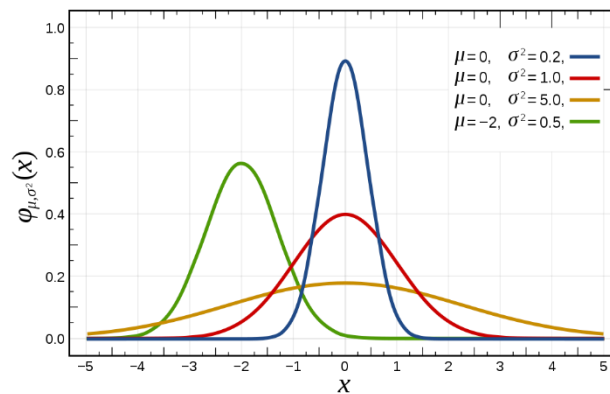
Destaca-se que a capacidade real de suportar uma solicitação decorrente do recalque é oriunda do projeto, os valores da figura 1 servem apenas para indicar as faixas onde os problemas começam a aparecer e não faz referência a quais são os tipos de danos causados (Milititsky et. al, 2015).

2.1.3 Metodologia para análise de recalque em obras instrumentadas

Para Gusmão (1990) é possível analisar o desempenho de uma edificação de duas maneiras: comportamento tensão-deformação do solo de fundação, e um modelo que representa a interação solo-estrutura. Ainda segundo o autor a interação solo-estrutura influencia o comportamento dos recalques provocando uma variação entre os recalques previstos e os recalque absolutos reais, de modo inversamente proporcional ao carregamento

aplicado: os pilares mais carregados tendem a recalcar menos, e os menos carregados a recalcar mais que o previsto, embora o recalque absoluto médio seja praticamente o mesmo.

Portanto a redistribuição de cargas causadas pelo recalque diferencial causa uma regularização da deformada em torno da média ao longo do tempo. Esta regularização possibilita uma análise por meio da dispersão das curvas de frequências (figura 3) produzidas a partir dos dados coletados pelo monitoramento de recalque.



É preciso ressaltar que a simples comparação entre as dispersões correspondentes aos recalques pode resultar em erros de interpretação, pois as curvas de frequência desconsideram a ordem de grandeza dos recalques absolutos. Em virtude disto, Gusmão (1990) recomenda que se use o coeficiente de variação das curvas, que é a relação entre o desvio padrão e o valor médio.

3 METODOLOGIA

3.1 CONTROLE DE RECALQUE

Os dados analisados neste estudo pertencem a uma edificação comercial composta por quinze pavimentos.

O monitoramento de recalques foi realizado por meio de pinos instalados nos pilares, régua de invar e nível ótico para medição das leituras. Como referência de nível utilizou-se um *benchmark*, tubulação de aço galvanizado instalada em um furo de sondagem.

O monitoramento foi realizado entre os dias 05/11/2015 e 25/05/2017, sendo a primeira leitura utilizada como referência para as demais. Destaca-se que devido às leituras se iniciarem no período construtivo, alguns pinos foram danificados, não sendo possível a realização do levantamento da cota de determinados pilares. Porém, para dar prosseguimento ao estudo foi realizado o renivelamento desses pilares, e utilizado como ponto de partida o último resultado válido.

3.2 MODELAGEM DE SUPERFÍCIES

Para elaboração do código computacional foi utilizado o GNU Octave (sistema operacional tipo Unix, composto por *software* livre).

O *script* recebeu como entrada de dados três argumentos:

- Primeiro argumento: matriz contendo os pilares com suas nomenclaturas e posições no espaço;
- Segundo e terceiro argumentos: matriz com os dados coletados do monitoramento de recalques.

A partir desses argumentos foram produzidas superfícies de recalques absolutos e relativos usando curvas de nível para determinar as cotas absolutas e mapas de calor, respectivamente. O método foi subdividido em três etapas:

- Definição da malha traingular que representa a superfície;
- Transformação da malha triangular em superfície contínua livre de arestas;
- Comparação das superfícies produzidas por dois conjuntos de dados distintos.

O critério de validação destes planos é a ausência de pontos dentro de uma circunferência formada por qualquer triângulo.

O método utilizado para transformar a malha triangular em uma superfície foi o inverso da distância ponderada.

Primeiramente foi produzida uma malha regular para preencher toda a superfície. Em seguida, para cada ponto representado na figura acima foi determinado um valor em z , dado pela equação 1. Esta equação irá comparar a posição do ponto gerado computacionalmente com os pontos que formam os vértices do triângulo no qual o ponto está contido e irá estimar suas coordenadas $P = (x, y, z)$, onde $z = R_{i,j}^v(x, y)$.

$$R_{i,j}^v(x, y) = \frac{(\sum_{i=1}^n p_i(x, x_i, y, y_i) R_i^r)}{\sum_{i=1}^n p_i(x, x_i, y, y_i)} \quad (1)$$

Onde:

R_i^r : recalque real verificado *in loco*;

$R_{i,j}^v$: recalque estimado para um ponto qualquer;

p_i : peso da interação entre o ponto e os vértices.

Em que $p_i(x, x_i, y, y_i)$ é dado pela equação 2.

$$p_i = (x, x_i, y, y_i) = 1/d(x, x_i, y, y_i) \quad (2)$$

Onde:

d: distância entre o ponto e o vértice.

Caso $d(x, x_i, y, y_i) = 0$, então o recalque estimado para qualquer ponto pode ser definido por meio da equação 3.

$$R_{i,j}^v(x, y) = R_i^r \quad (3)$$

Realizado este processo, a superfície gerada adquire um formato mais próximo à realidade, conforme apresentado na figura 4.



Figura 4 – Representação tridimensional de um terreno com curvas de nível

Seja R_{n+1} uma matriz de ordem qualquer onde $R_{i,j}$ representa o recalque de um determinado ponto de coordenada $P_{n+1} = (x, y, R_{i,j})$, assumindo que x e y sejam constantes ao longo de todas as medições e $R_{i,j}$ variável, ao subtrair $P_{n+1} - P_n$ o resultado será $P_{n+1,n} = (0, 0, \Delta R_{i,j})$ em que $\Delta R_{i,j} \geq 0$. Para cada valor de $\Delta R_{i,j}$ foi então aplicado um valor entre 0 e 255, sendo 0 para os pontos onde a variação foi mais expressiva e 255 para os locais em que foi nula, gerando uma imagem conforme figura 5.

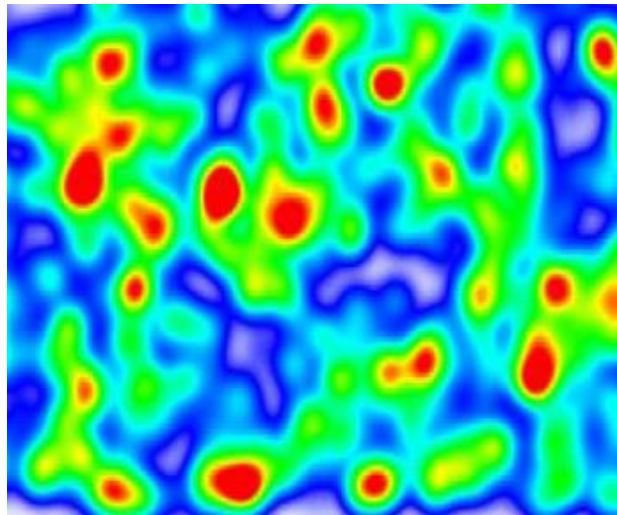


Figura 5 – Mapa de calor.

Logo, $R_{n+1} - R_n$ representou a deformação do maciço entre as medições de recalque. Por meio deste procedimento, realizado em todas as medições, foi possível observar o fenômeno de redistribuição de esforços a partir do momento em que cessaram os incrementos nos carregamentos até a estabilização

Juntamente com este método foi realizada uma análise por meio de curvas de dispersão, com o intuito de observar a série histórica das medições e verificar se existe uma tendência de aumento na frequência dos valores médios.

As curvas de dispersão foram produzidas utilizando as equações 4 e 5.

$$f(R_{i,j}^v(x,y)) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^g(R_{i,j}^v(x,y))} \quad (4)$$

$$g(R_{i,j}^v(x,y)) = -\frac{R_{i,j}^v(x,y) - \mu^2}{2\sigma} \quad (5)$$

Onde:

$R_{i,j}^v(x,y)$: valor do recalque;

μ : média do recalque;

σ : desvio padrão do recalque.

3.3 DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

As validações necessárias para o modelo foram realizadas por meio das superfícies de deformação, em que foi analisado o comportamento dos pilares que apresentaram recalque diferencial.

Esta análise visa determinar o comportamento da interação solo-estrutura e demonstrar visualmente a redistribuição dos carregamentos. Para esta etapa foram usados somente os dados de monitoramento coletados após a conclusão da etapa de construção da estrutura, a fim de diminuir a contribuição humana na redistribuição dos carregamentos.

Por fim, foram verificados os indicadores de desempenho referentes ao último monitoramento, a fim de atestar a integridade da estrutura.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir apresenta-se a figura 6 com os dados de dispersão da torre analisada.

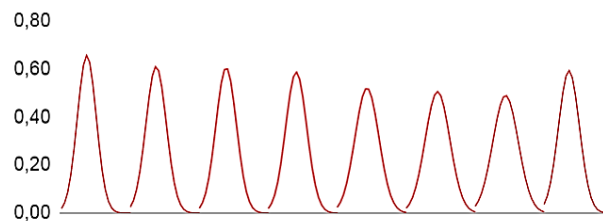


Figura 6 – Curva de dispersão da torre A.

Observa-se que as curvas de frequências apresentaram um comportamento, no geral, decrescente ao longo do período de monitoramento dos recalques absolutos aferidos nas medições.

Existem duas causas para o aumento da dispersão da torre. A primeira é a deformação do maciço provocada pela expulsão de água do solo, visto que o monitoramento foi iniciado já no período de construção, conforme pode ser observado na figura 7. A segunda é a possibilidade dos dados aferidos estarem incompatíveis com a realidade.

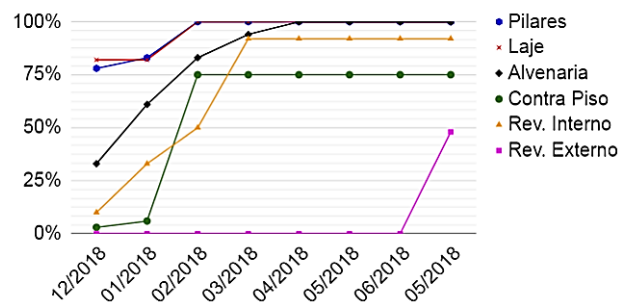


Figura 7 – Quantitativo de serviços da torre.

Os quantitativos mostram que uma parcela significativa da torre já estava construída quando os monitoramentos foram iniciados. Logo, existe a possibilidade de que a amostra

esteja prejudicada, para esta análise, por falta de condições de contorno iniciais, fazendo com que a aplicação desta metodologia de dispersão produza resultados inconclusivos.

Os mapas de calor, figuras 8 a 11, mostram os focos de variação das deformações entre cada um dos monitoramentos, a partir da terceira medição.

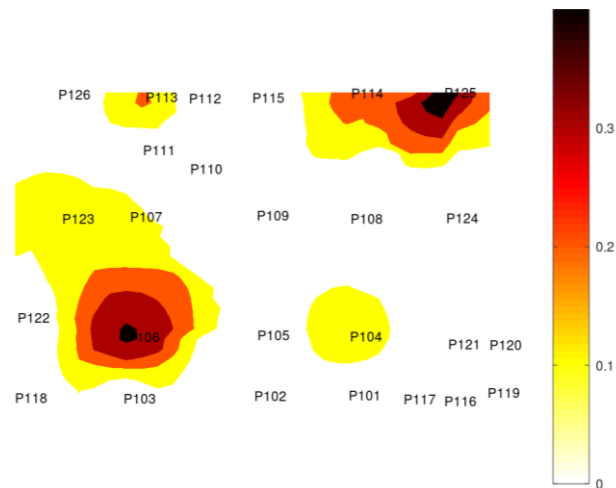


Figura 10 – Mapa de calor da torre para o 3ª e 4ª leituras de monitoramento.

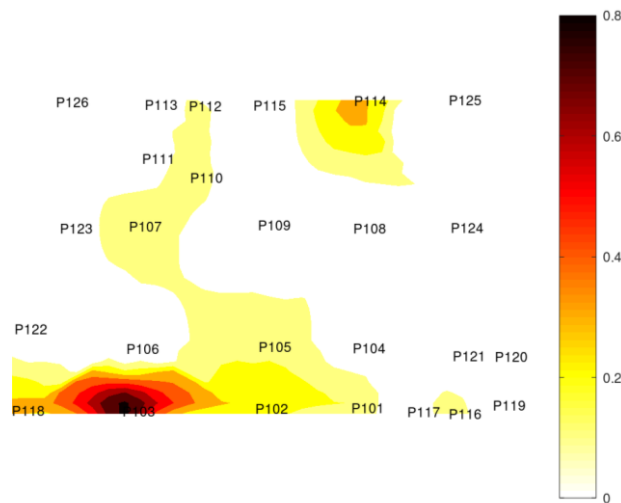


Figura 11 – Mapa de calor da torre para o 4ª e 5ª leituras de monitoramento.

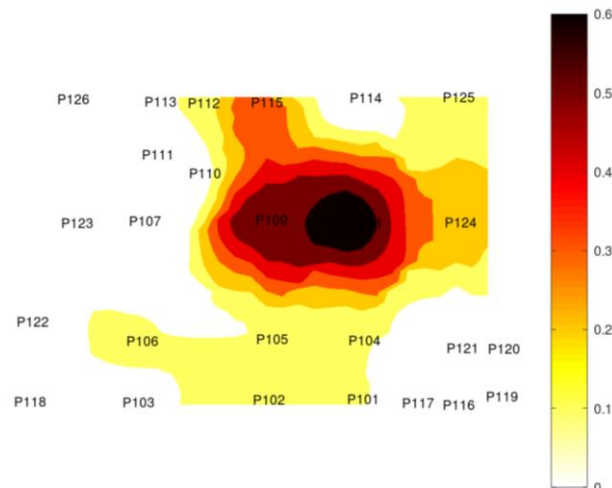


Figura 12 – Mapa de calor da torre para o 5ª e 6ª leituras de monitoramento.

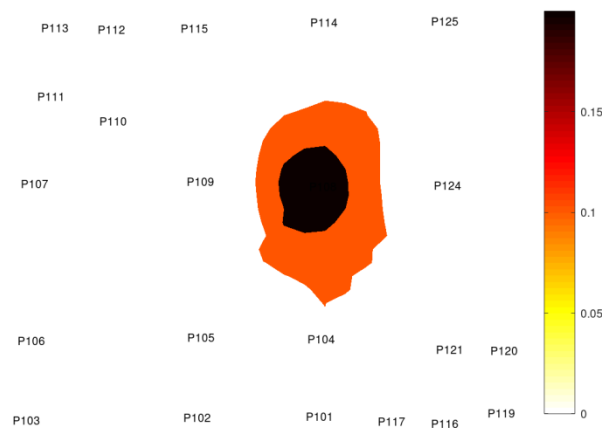


Figura 13 – Mapa de calor da torre para o 6ª e 7ª leituras de monitoramento.

Observa-se uma intensa atividade ao redor dos pilares P114 e P103. Os resultados mostram que existe uma alternância de recalques entre os pilares, em cada uma destas regiões, nos quais foram registradas as maiores variações.

Durante a etapa de carregamento da obra, o pilar P114 acumulou recalques até atingir a marca de 1,97 mm, paralelamente o P108, P109, P115 e P124 mantiveram-se relativamente inalterados. Após atingir esse valor não foram mais registrados aumentos nos recalques do P114, no entanto, houve uma variação repentina no grupo de pilares adjacentes, figura 14.

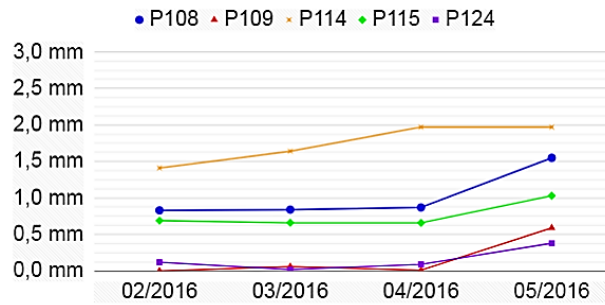


Figura 14 – Recalque no grupo de pilares P114, P108, P109, P115 e P124.

O comportamento dos elementos de fundações foi produto do recalque diferencial verificados na figura acima. A estabilidade pode ser explicada pelo aumento da rigidez da estaca devido á capacidade reduzida de movimentação, ocasionada pelo aumento da poropressão, que fez com que qualquer parcela de carregamento que não foi devidamente dissipada no solo fosse redistribuída para outros pilares, explicando assim as alterações nos pilares P108, P109, P115 e P124. O mesmo padrão de comportamento pode ser observado nos pilares P103 e P106, conforme figura 15.

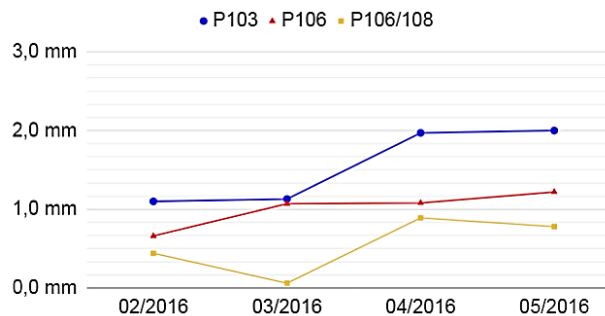


Figura 15 – Recalque no grupo de pilares P103 e P106.

As fundações da torre analisada apresentaram desempenho satisfatório. Ao longo dos monitoramentos não foi verificada velocidades que excedessem o limite de segurança de 80

μm por dia, figura 16.

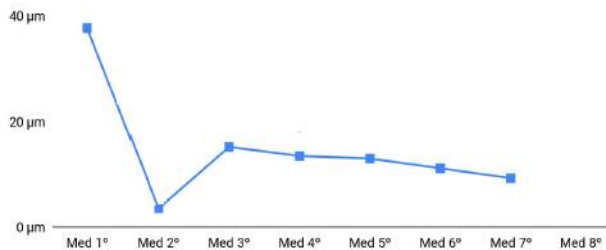


Figura 16 – Velocidade de recalque.

O distorcional máximo verificado foi de 1/2981, entre os pilares P112 e P113, também evidenciando o desempenho satisfatório da fundação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia tradicional (por meio das curvas de dispersão) mostrou uma dependência de acompanhamento nos estágios iniciais de monitoramento. Logo, existe a necessidade de um estudo geotécnico acerca da deformabilidade do solo para a estimativa dos recalques sofridos entre o início da obra e o início do monitoramento.

Utilizando como base os recalques relativos, foi possível observar a interação solo-estrutura e determinar a estabilidade da torre devido a redução do diâmetro das ilhas de calor e taxas de variação.

A partir das taxas de variação dos mapas de calor infere-se que a torre encontra-se no período de transição do adensamento primário para o secundário, pois conforme observado existe uma tendência de uniformização das cotas dos pilares, reduzindo a incidência de recalques diferenciais, com graduação decrescente.

A visualização espacial apresentou vantagens em relação ao método tradicional no que diz respeito à identificação de padrões de comportamento de grupos de pilares levando em consideração as ligações rígidas entre si. No entanto, esta ligação não existe de maneira formal no método de espacialização. Sendo assim, é válido assumir que existe espaço para melhorias imediatas considerando estes elementos como objetos.

O método ainda possui uma dificuldade de implementação superior à produção de curvas de dispersão. Além de precisar de uma quantidade superior de comandos e processamento, necessita de uma base matemática extensa, sendo necessário que os indexadores sejam os mesmos em todos os mapas gerados a fim de comparar os valores que estão na mesma posição espacial.

Dessa forma, o aumento da resolução das imagens significa uma degeneração de relações entre dois pontos que ocupam o mesmo lugar no espaço, separados pelo tempo.

A distribuição de uma plataforma apresenta-se como uma solução de mercado interessante, pois além de auxiliar as análises torna possível uma base nacional de recalques, que pode ser utilizada em colaboração com desenvolvimento de projetos estruturais, elevando a eficácia deste sistema em relação ao fenômeno abordado.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *NBR 6122: Projetos e Execução de Fundações*, Rio de Janeiro, p. 8.
- Alonso, U. R. (1991). *Previsão e Comprovação da Carga Admissível em Estacas*, 1a ed., Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, p. 14.
- Barros, R. A. (2005). *Avaliação do Comportamento de Fundações em Estaca Hélice através de Medidas de Recalque*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 118 p.
- Braja, M. Das. (2012). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 7a ed. [s.l.], Cengage, 632p.
- Gusmão, A. D. (1990). *Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/RJ, 165 p.
- Melo, M. C. (2003). *Uma Análise de Recalques Associada a Biodegradação no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 127p.
- Milititsky, J.; Consoli, N. C.; Schnaid, F. (2015). *Patologia das Fundações*, 2a ed., oficina de textos, São Paulo, 63p.
- Rebello, Y. C. P. (2011). *Fundações: Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento*, 3a ed., Editora zigurate, São Paulo, 240 p.
- Simons, N. E. e Menzies, B. K. (1977). *A short Course in Foundationa Engeneering*, London: Butterworth & Co, 518 p.
- Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (1997). *Fundações Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais e Fundações Profundas*, Vol. Completo, Oficina de textos, São Paulo, 63p.

Brazilian Journal of Development

Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (2011). *Fundações Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais e Fundações Profundas*, 2a ed., V. 1, Oficina de textos, São Paulo, 63p.