

Avaliação do Desempenho de Fundações em Edifício do Distrito Federal

Gabriela de Athayde Duboc Bahia
UnB, Brasília, Brasil, gabrieladuboc@gmail.com

Neusa Maria Bezerra Mota
BMS Engenharia, Brasília, Brasil, neusamota@bmsengenharia.com.br

Renato Pinto da Cunha
UnB, Brasília, Brasil, rpcunha.unb@gmail.com

Maurício Martines Sales
UFG, Goiânia, Brasil, sales.mauricio@gmail.com

RESUMO: A realização de projetos de fundações é, na maioria das vezes, realizada com base, somente, nas sondagens à percussão de simples reconhecimento, junto à utilização de correlações que são realizadas para determinadas regiões e extrapoladas para outras com diferentes condições de projeto. Além disso, o seu dimensionamento também é realizado baseado nas cargas fornecidas pela estrutura que, corriqueiramente, são determinadas considerando os apoios indeslocáveis. Porém, na realidade, as fundações quando carregadas solicitam o terreno, resultando em deformações no solo que se consideradas no cálculo da estrutura resultariam em novas cargas. Dessa forma, o procedimento usual que desconsidera a interação solo-estrutura fornece um comportamento irreal das obras, pois não considera o processo de carregamento, a rigidez da estrutura e a deformabilidade do solo. A utilização de técnicas como o monitoramento de recalques junto à medição de cargas na estrutura permite a verificação do desempenho das fundações durante a obra e a obtenção de um diagnóstico precoce em casos de patologias nas fundações. Quando utilizada junto à prova de carga é possível obter parâmetros para uma análise mais completa. Porém, mesmo com a nova revisão da norma NBR 6122 (2010), que traz como obrigatório a realização de medições de recalque nas estruturas e da realização de provas de carga em determinadas situações, as técnicas ainda não são utilizadas de forma preventiva, sendo o monitoramento de recalques, muitas vezes iniciado quando a edificação está com alguma patologia e a prova de carga, quando as fundações já foram realizadas. Sabendo da importância de avaliar o desempenho das edificações, este artigo tem como objetivo analisar os resultados das provas de carga junto às medições de recalques e cargas nos pilares realizados em um edifício residencial localizado no DF. O monitoramento foi realizado durante a construção obtendo-se distorções angulares dentro de limites recomendados pela literatura. A medição de cargas na estrutura também foi realizada durante a obra e apresentaram a tendência esperada apesar dos resultados de carga não apresentarem valores satisfatórios. As provas de carga foram realizadas antes da execução das fundações, apresentando caráter preventivo possibilitando subsidiar a elaboração de projetos mais viáveis e seguros. O diagnóstico a partir do recalque distorcional e a velocidade de recalque auxiliaram o projetista quanto à segurança do empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Recalque, Interação solo-estrutura

1 INTRODUÇÃO

A realização de projetos de fundações é, na maioria das vezes, realizada com base, apenas, nas sondagens à percussão de simples reconhecimento, junto à utilização de correlações que são realizadas para determinadas regiões e extrapoladas para outras com diferentes condições de projeto.

Essas extrapolações são, muitas vezes, realizadas de forma negligente, ou seja, sem a utilização de critérios para ponderar as condições do solo em que se está trabalhando.

Isso aliado aos procedimentos tradicionais de cálculo, em que os projetistas de fundações e de estruturas trabalham separadamente, como se a superestrutura e as fundações fossem entes completamente distintos corroboram para a determinação do desempenho irreal da edificação.

Diante do exposto acima, a realização de um modelo que considere a continuidade da superestrutura com o terreno de fundação, associado a técnicas que permitam considerar a interação entre as partes da edificação, denominada interação solo-estrutura, poderá fornecer um comportamento mais realista da edificação.

Uma das técnicas capazes de verificar o desempenho das fundações se faz por meio do monitoramento de recalques, o qual deve ser utilizado junto às medições de carga real na estrutura e realizado ainda em fase construtiva para a obtenção do real desempenho do edifício.

A prática do monitoramento de recalques além de auxiliar na verificação do desempenho da edificação, permite a prevenção de manifestações patológicas que tenham como causa os recalques nas fundações permitindo a obtenção de parâmetros de deformabilidade das fundações subsidiando projetos viáveis e seguros.

2 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Nos métodos de cálculo tradicionais tem-se de um lado os engenheiros de fundações obtendo a

deformação do solo sem a consideração da rigidez da estrutura e de outro lado tem-se os projetistas de estrutura calculando as cargas sem a consideração da deformação do solo, ou seja, há uma incompatibilidade física neste modelo, pois a deformação do solo vai modificar a distribuição de cargas e momentos na estrutura, assim como a rigidez da estrutura vai influenciar na deformada de recalques da edificação, não estando o sistema em equilíbrio.

Para a consideração da interação solo-estrutura em um projeto de edifício seria necessário um modelo que considerasse a continuidade da superestrutura em relação ao solo (Rebello, 2008).

Porém sabe-se que a consideração de um modelo que considere a interação entre as partes da edificação é bastante complexo, pois envolve a consideração de condições não-lineares além da compreensão de maior número de parâmetros do solo.

Schnaid (2009) ressalta que a utilização da ISE, apesar de complexa, exerce bastante influência na determinação da redistribuição dos esforços tornando-se imprescindível para a verificação do desempenho global da edificação e dos sistemas estruturais.

Dessa forma, tem-se procurado compreender de que maneira os fatores inerentes a superestrutura, tais como a rigidez da estrutura e o processo de carregamento da edificação, podem influenciar no comportamento global da edificação.

2.1 Rigidez da estrutura x processo de carregamento

A amarração dos elementos estruturais confere considerável rigidez à estrutura, a qual impede a movimentação relativa dos apoios ocasionando migração de cargas na estrutura, conforme afirmam Poulos (1975) e Gusmão e Gusmão Filho (1994).

Porém, a rigidez não pode ser considerada isoladamente sem também levar em conta o processo de carregamento da obra. Fraser e Wardle (1976) afirmam que a rigidez de uma edificação quando se considera o carregamento

gradual é aproximadamente metade da rigidez de uma edificação com carregamento instantâneo.

Segundo Meyerhof (1953) conforme o aumento do número de pavimentos da edificação, a rigidez tende a aumentar até uma rigidez limite, a partir de então, o acréscimo no número de pavimentos não influencia mais na redistribuição de cargas nos apoios.

A consideração da rigidez nos cálculos dos recalques junto à sequência construtiva origina recalques diferenciais menores do que os estimados por métodos convencionais, se aproximando mais ao recalque real da edificação.

2.2 Deformada de recalques

O aumento do número de pavimentos gera uma tendência de uniformização de recalques e redistribuição de carga causada pelo aumento da rigidez (Gusmão e Gusmão Filho, 1994).

Moura (1995) relatou que além da uniformização dos recalques ocasionado pelo aumento da rigidez da estrutura, existe uma diminuição de recalques diferenciais e de momentos fletores nas vigas e pilares.

Por essa razão, o emprego de análises que consideram a interação solo-estrutura são de extrema importância para determinar o desempenho real da obra. A técnica de controle de recalque além de ser um método rápido e simples, permite obter o desempenho das fundações evitando gastos e permitindo também a otimização e viabilização de projetos.

2.3 Monitoramento de recalques

Velloso e Lopes (1997) destacam que a previsão de recalques é um dos métodos mais complexos da geotecnia e os resultados obtidos por cálculos, mesmo que sofisticados, devam ser assumidos apenas como estimativas, destacando a necessidade de realizar a medição para obter resultados realistas.

A técnica do monitoramento de recalques permite a verificação do real desempenho da edificação. Segundo Alonso (2011) a referida técnica deve ser realizada medindo os recalques e

as cargas reais atuantes nas fundações. Porém, na prática da engenharia a etapa de medição das cargas atuantes na estrutura vem sendo negligenciada, sendo realizadas estimativas a partir de valores teóricos obtidos do desenho de cargas.

É de extrema importância a criação de uma cultura de medição de recalques desde o início da construção, assim como se faz com o controle tecnológico do concreto, a fim de se obter um acompanhamento do desempenho real da interação solo-estrutura com o tempo (Danziger *et al.* 2000).

2.4 Parâmetros para análise

De acordo com as bibliografias consagradas os principais limites estabelecidos de distorção angular admissível, obtidas por meio de um estudo de caso, o qual associou os danos na estrutura com as distorções obtidas, são:

- $\beta = 1/500$: limite seguro para evitar danos em paredes de edifícios;
- $\beta = 1/300$: limite a partir do qual começam a aparecer trincas em paredes de edifícios;
- $\beta = 1/150$: limite a partir do qual se espera danos estruturais em edifícios correntes.

Além da realização do controle dos recalques distorcionais Milititsky *et al.* (2005) recomendam a observação da velocidade de recalque. São utilizados para este fim os seguintes valores de referência:

- Prédios com mais de 5 anos, velocidade menor que 10 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Prédios entre 1 e 5 anos, entre 10 e 20 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Prédios em fundações diretas, fase construtiva, até 200 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Prédios em fundações profundas, fase construtiva, até 80 $\mu\text{m}/\text{dia}$.

Sendo os valores acima utilizados para casos habituais, podendo ocorrer valores que extrapolem esses limites quando houver fatores externos à obra, como obras subterrâneas próximas à edificação, ação de atrito negativo em estacas,

entre outros.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da obra e do subsolo

A edificação residencial em estudo está localizada em Águas Claras – DF e constitui-se de duas torres (A e B) e periferias. Cada torre apresenta vinte e dois pavimentos sendo dois subsolos, um térreo e dezenove pavimentos tipo.

Vale destacar que neste artigo será analisada apenas a Torre B.

Foram realizados seis furos de sondagem à percussão e dois furos de sondagem mista, conforme apresentado na Figura 3.1 a seguir.

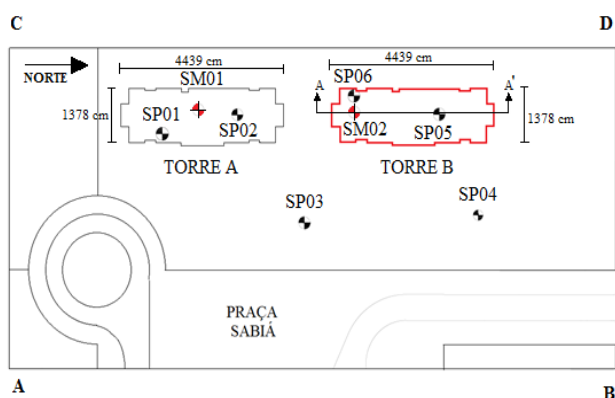


Figura 3.1 Localização das sondagens

Os furos de sondagem perfizeram um total de 20,8 m e identificaram o subsolo constituídos por um horizonte de argila arenosa variando de 1 a 4 m (N_{SPT} de 5 a 35 golpes) sobrejacente a uma camada de silte argiloso variando de 1 a 6 m (N_{SPT} de 6 a 26 golpes), acima de uma camada de silte arenoso variegado com cascalho variando de 1 a 13 m (N_{SPT} de 2 a 62 golpes), sobrejacente a uma camada de silte arenoso roxo variando de 7 a 20,8 m (N_{SPT} de 10 a 62 golpes), e nível d'água variando de 2,1 a 3,6 m, conforme Figura 3.2.

As fundações dos dois blocos foram feitas em estaca hélice monitoradas com diâmetro variando de 400 e 500 mm e comprimento variando de 10 m, para as estacas dos blocos centrais e 15 m, para as demais estacas.

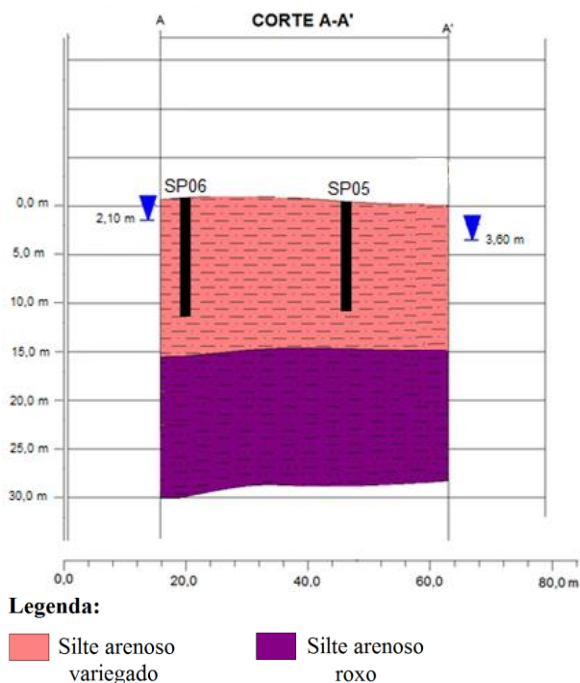


Figura 3.2 Localização das sondagens

3.2 Monitoramento de Recalques

A técnica utilizada para o monitoramento de recalques foi realizada por meio de dois níveis óticos de precisão, utilizados para nivelar os pinos engastados nos pilares da edificação e para conferência da leitura, tomando-se como base a referência de nível profunda, ou “benchmark”, com o intuito de medir os recalques da estrutura obtidos pela diferença de posição entre as leituras sucessivas.

O nivelamento foi concretizado no dia 15/12/2011 após a concretagem da 3ª laje de cada torre, tendo em vista abranger todas as etapas construtivas possíveis com as medições. Vale ressaltar que os recalques ocorridos antes desta data de nivelamento não se encontram computados nos resultados apresentados.

Para as leituras de deformação dos pilares foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, *strain gauges* tipo KFG-5-120-D16-11 de Kyowa Eletronic Instruments CO. Ltda, colados com adesivo KBR 610, em barras de aço CA-25, com 1/2” de diâmetro e 0,4 m de comprimento, e instalados aos pares ao mesmo nível, em posição diametralmente oposta, com ligação em ponte completa.

Seguindo-se corretamente os procedimentos de

colagem, o *strain gauge* se deforma nas mesmas proporções do corpo em teste, obtendo-se assim a deformação dos pilares.

Os *strain gauges* foram instalados nos estribos dos pilares antes da concretagem, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3 *Strain Gauge* instalado nos pilares

As leituras dos *strain gauges* foram realizadas no período de 1º/12/2011 a 05/04/2012 e foram instalados em vinte e quatro e dois pilares da Torre B, feitas durante as medições de recalque e intermediária a elas.

Os resultados foram obtidos a partir do módulo de elasticidade do concreto recomendado em norma, por meio das equações 1 e 2, com f_{ck} de 25 MPa, e no caso do módulo de elasticidade do aço foi adotado o valor de 210 GPa, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008).

$$E_{CI} = 5600.f_{ck}^{1/2} \quad (1)$$

$$E_{SC} = 0,85 E_{CI} \quad (2)$$

Sendo:

E_{CI} : Módulo de elasticidade inicial (MPa);

E_{SC} : Módulo de elasticidade secante.

As cargas totais foram obtidas por meio da equação 3:

$$\text{Carga Total} = \Delta \times \varepsilon \times E_c + A_s \times \varepsilon \times E_s \quad (3)$$

Sendo:

Δ : Área de aço menos a área de concreto;

ε : Deformação axial medida;

E_c : Módulo de elasticidade do concreto;

A_s : Área de aço;

E_s : Módulo de elasticidade do aço.

Destaca-se que para o cálculo da deformação

axial medida (ε), bastou dividir a deformação total lida por 2,6, total este, advindo do coeficiente de Poisson de 0,3 adotado, sendo utilizado para o cálculo da carga na barra, e para se estender ao cálculo para o pilar deve-se levar em consideração a seção transversal da peça e a taxa de aço (Soares, 2004).

Para o cálculo da tensão aplicada foi realizada a diferença da área da seção do pilar pela área da seção de aço, obtendo a área do concreto, multiplicando-se esse valor pela deformação axial (ε) e pelo módulo de elasticidade do concreto, somando-se então pela área do aço multiplicada pela deformação axial (ε) e pelo módulo de elasticidade do aço, conforme a lei de Hooke (equação 4).

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (4)$$

Sendo:

σ : Tensão;

ε : Deformação;

E : Módulo de elasticidade

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente artigo consistiu em avaliar o desempenho das fundações ao longo do processo de carregamento, acompanhando o desenvolvimento dos recalques e das cargas medidas na estrutura.

A seguir apresentam-se os recalques acumulados e velocidades de recalques acumuladas durante o período de medição da Torre B (Figuras 4.1 e 4.2).

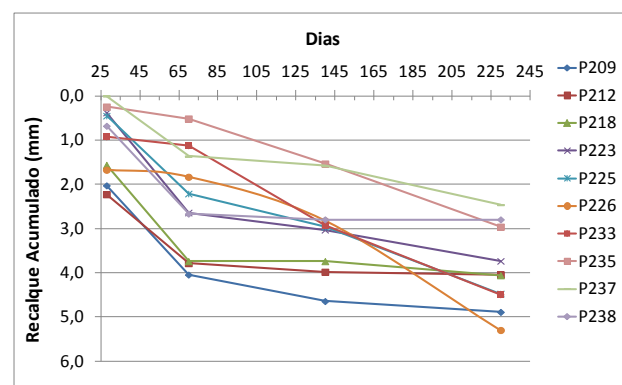


Figura 4.1. Recalque acumulado pelo período de medição da Torre B

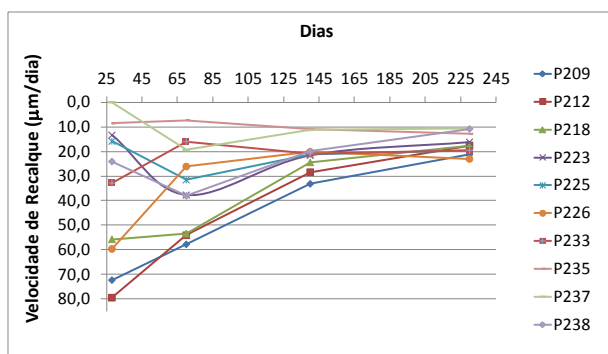


Figura 4.2. Velocidade de recalque acumulada pelo período de medição da Torre B

Observa-se uma evolução dos recalques no decorrer das medições, ou seja, os pilares continuam recalcando ao longo do tempo, porém de forma menos acentuada que no início da construção, tendendo a uma estabilização dos recalques.

Observa-se que para a região de Brasília existe uma baixa magnitude absoluta dos valores de recalques medidos em campo, sendo considerados valores aceitáveis para a referida região (de acordo com a experiência de projetistas) até 15 mm de recalque absoluto.

A partir dos valores obtidos do monitoramento de recalques, verificou-se que a maior velocidade foi de 79,46 $\mu\text{m}/\text{dia}$ (dentro dos limites aceitáveis pré-estabelecidos de até 80 $\mu\text{m}/\text{dia}$ para edificações em fase construtiva com fundações profundas, de acordo com Militisky et al, 2005), obtida na 1ª medição de recalque, sendo observado que ao longo das demais medições este valor diminuiu consideravelmente.

Isso ocorreu, pois os maiores carregamentos da edificação ocorrem no início da fase construtiva, com a construção da estrutura do edifício.

Obtiveram-se também as máximos distorcionais, os quais estão apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Recalques distorcionais máximos do Torre B.

Recalques distorcionais	
P226/P238	1/1402
P225/P237	1/2424

Observa-se que os valores de recalques distorcionais apresentam-se distantes dos limites estabelecidos pelas bibliografias consagradas

(limite em que começam a haver danos na edificação: 1/500).

A seguir apresentam-se os resultados das medições de carga na estrutura.

A Tabela 4.2 apresenta a penúltima e a última medição das cargas totais, obtidas por meio da equação 3, as quais representam o valor obtido pela medição de carga nos pilares, e as cargas de projeto, que foram provenientes do cálculo da estrutura no momento em que a edificação estivesse com todo o carregamento.

Destaca-se que os dois valores (da penúltima e da última) medição de cargas na estrutura serão apresentados, devido a última medição de cargas apresentarem muitos pilares em que não foi possível aferir os resultados (devido a retirada dos fios para a realização do revestimento da estrutura).

Tabela 4.2. Resultado das medições de carga nos pilares

Pilares Instrumentados	Penúltima medição		Última medição	
	Carga Total (kN)	Carga de Projeto (kN)	Carga Total (kN)	Carga de Projeto (kN)
P201	2244	1250	-	1250
P202	2033	1340	-	1340
P207	5369	3660	-	3660
P208	8326	5690	-	5690
P209	5140	3690	-	3690
P212	19879	3650	-	3650
P217	7938	6900	-	6900
P220	6372	4740	-	4740
P221	5667	3190	-	3190
P223	6559	4570	-	4570
P225	11179	6830	14909	6830
P226	8144	2840	11331	2840
P233	5753	3940	-	3940
P234	6100	3830	7292	3830
P235	2214	1300	3109	1300
P237	9128	6200	12458	6200
P238	8032	6920	10086	6920
P240	1796	1630	2295	1630

É possível notar que os valores obtidos com as leituras de carga na estrutura ultrapassaram os valores de carga total de projeto antes mesmo da edificação atingir o carregamento total. Como não foi observada nenhuma patologia na estrutura, verifica-se que existe um erro nos resultados.

Esses erros podem ter sido ocasionados devido ao posicionamento dos *strain gauges* nos pilares,

os quais não se apresentaram na mesma altura, ao modo de obtenção do módulo de elasticidade do concreto simples (que não representa o módulo do concreto armado), a diferença de tempo de cura do concreto no momento de medição da carga e interpretação das medidas obtidas (transformação de deformação em cargas).

A seguir apresentam-se as Figuras 4.3 e 4.4 com os resultados de carga ao longo das medições realizadas para os pilares centrais e periféricos, respectivamente.

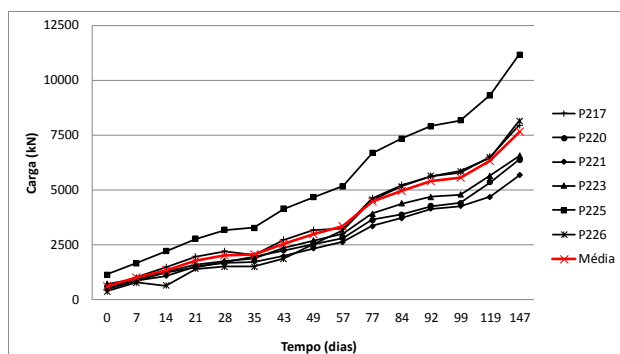


Figura 4.3 Comportamento dos pilares centrais

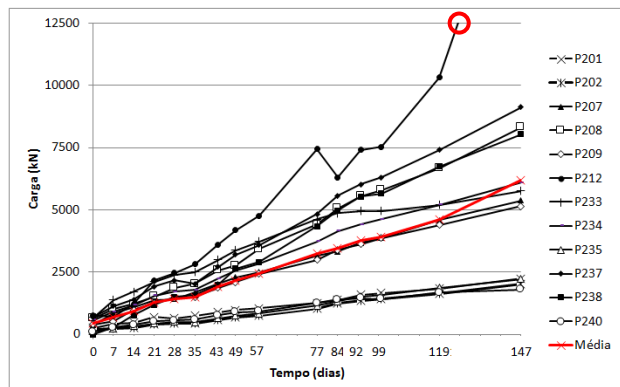


Figura 4.4 Comportamento dos pilares periféricos

Na Figura 4.4, o pilar P212 apresenta-se com um círculo vermelho, porque houve uma continuidade no aumento de carga que não foi representada na figura, sendo esta de 19879 kN.

É possível observar uma progressão de cargas ao longo das medições, com exceção do P212, o qual apresentou um valor atípico de carga aos 77 dias. Porém, mesmo havendo um comportamento esperado de aumento de carga, os valores obtidos pela medição estão fora da realidade, estando muito distantes do limite proposto pela estrutura.

No geral, constata-se que a média das cargas obtidas por meio da última medição de carga

apresenta-se 48% acima da média das cargas estimadas pela estrutura, sendo que em termos de carregamento, no momento da última aferição, a edificação encontrava-se com 52,90% de seu carregamento total.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dizer que o método de monitoramento de recalque consiste em um ensaio simples e rápido de se executar. Além disso, quando realizado desde o início da construção é utilizado como um controle de qualidade das fundações.

Os resultados de recalque da edificação se mostraram satisfatórios dentro das faixas limites estabelecidas pelas bibliografias consagradas com valores pequenos de recalque e de distorção.

A instrumentação de pilares para medição de carga na estrutura ainda é um tema incipiente. O grande número de variáveis envolvidas dificultaram a obtenção de dados exatos e representativos que pudessem ser considerados nas análises.

A medida de carga, em alguns pilares da edificação, não coincidiram com os pilares selecionados para a leitura de recalques, impossibilitando a verificação do desempenho quanto à carga x recalque.

Quanto aos resultados de medição de cargas apesar de terem apresentado uma tendência esperada, de aumento de carga ao longo do tempo, observou-se que os valores obtidos com 52,90% do carregamento total da edificação se encontram fora da realidade, apresentando-se em média 48% acima da média estimada para a estrutura com o carregamento total da obra.

Neste caso, recomenda-se a realização de novos estudos para a apresentação da metodologia correta de medição de cargas na estrutura.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT (2008). *Concreto – determinação do módulo de elasticidade à compressão: NBR-8522*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 16p.
- Alonso, U. R. (2011). *Previsão e controle das fundações*. 2a edição, São Paulo, 142p.

- Danziger, B. R., Danziger, F. A. B, Crispel, F. A (2000). *A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações*. Anais do 4º seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia, SEFE IV, v. 1, pp. 191-202, São Carlos.
- Fraser, R.A., Wardle, L.J. (1976). *Numerical Analysis of Rectangular Rafts on Layered Foundations*. *Géotechnique*, v.26, n. 4, pp. 613-630.
- Gusmão A. D. e Gusmão Filho J. A. (1994). *Avaliação da influência da interação solo-estrutura em edificações*. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, Vol. 1, pp. 67-74.
- Meyerhof, G. G. (1953). *Some recent foundation research and its application to design*. *Structural Engineering*, v. 31, pp. 151-167, Londres.
- Milititsky, J., Consoli, N. C. E Shnaid, F. *Patologia das Fundações*. Oficina de textos, São Paulo, 2005.
- Moura, A. R. L. U. (1995). *Interação solo-estrutura em edifícios*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 135p.
- Poulos, H. G. (1975). *Settlement analysis of structural foundation systems*. Proceedings of South-East Asian Conference on Soil Engineering, Kuala Lumpur, Malasia, Vol. IV, pp. 52-62.
- Rebello, Y. C. P (2008). *Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. 4ª edição, São Paulo, 233p.
- Schnaid, F; Odebrecht, E.; Lobo, B. O.; Rocha, M.M. (2009). *Engenharia de fundações passado Recente e Perspectivas Homenagem ao Prof. Nelson Aoki*. Suprema Gráfica e Editora Ltda, São Carlos, São Paulo, p. 89-96.
- Soares, J. M. (2004). *Estudo numérico-experimental da interação solo-estrutura em dois edifícios do Distrito Federal*. Doutorado, Geotecnia, Universidade de Brasília, DF, 263p.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (1997). *Fundações, critérios de projeto – investigação do subsolo, fundações superficiais e fundações profundas*. Vol. Completo, São Paulo, Oficina de textos, 2010, 568p.