

AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA ATRAVÉS DA MONITORAÇÃO DE RECALQUES

Evaluation of the soil-structure interaction through settlement measures

Paulo César de Almeida Maia*

Rodrigo Alvarez de Barros**

Fernando Faboya de Albuquerque Juniro***

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados experimentais da monitoração dos recalques de um edifício residencial durante a construção. A fundação do edifício é constituída por estacas hélice contínuas. O maciço de fundação é constituído basicamente por solos fofos ou moles. O objetivo do trabalho é a avaliação da interação solo estrutura e a sua influência no comportamento da construção. É apresentada uma breve descrição da metodologia empregada no trabalho. A avaliação do carregamento na fundação é realizada através de análise numérica tridimensional de um modelo da estrutura. São considerados dois modelos mecânicos: fundações fixas, sem movimento, e fundações com deslocamento vertical livre. O mecanismo de interação solo estrutura foi determinado através da comparação dos deslocamentos utilizando os carregamentos obtidos através dos dois modelos mecânicos. Os resultados permitem avaliar a redistribuição de carga devido à interação solo estrutura durante o aumento da rigidez da estrutura.

SYNOPSIS – This paper shows experimental results of settlement measurements of a residential building during construction. The foundation is composed by deep continuous auger piles. The foundation stratum is basically constituted by soft/loose soils. Important aspects are pointed out regarding soil-structure interaction and its influence on mechanical response of the building. A brief description of the surveying methodology is presented. The evaluation of the loading in the foundation was done by a three dimensional numerical model. Two different mechanical approaches were considered: fixed foundation (no movements) and one dimensional displacements foundation, where the foundation is considered to displace in vertical direction only. The soil-structure interaction was assessed by comparison the measured settlements against the loads obtained through the two approaches considered. These results allowed the evaluation of load redistribution due to soil-structure interactions, mainly the increase of structure rigidity.

PALAVRAS CHAVE – Monitoração de recalques, Nível Terzaghi, interação solo-estrutura.

1 – INTRODUÇÃO

Nas edificações, podem ser identificadas três partes: a superestrutura, a infra-estrutura ou fundação e o maciço de solo ou rocha, no qual se assentam as fundações. Estas três partes constituem o sistema solo-fundação-estrutura.

A superestrutura é composta pelas lajes, vigas e pilares, além dos elementos de fachada e de divisão interna ou fechamento. A infra-estrutura, em sentido amplo, envolve todos os elementos estruturais enterrados. Em sentido restrito, refere-se apenas às cintas e às fundações. As fundações

* Professor Associado, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, E-mail: maia@uenf.br

** Engenheiro, Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRAS, E-mail: barros.ra@gmail.com

*** Professor Titular, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, E-mail: saboya@uenf.br

têm como função receber as cargas da superestrutura e transmiti-las de forma segura para o solo de fundação. O solo de fundação recebe todas as cargas deste sistema. Devido a isto, é comum a verificação de deslocamentos nas fundações prediais. Estes deslocamentos podem ser verticais, horizontais e rotacionais. Os deslocamentos verticais totais de uma fundação são denominados recalques e a diferença entre os recalques entre dois pontos de uma fundação é conhecida como recalque diferencial.

Uma quantidade significativa de problemas estéticos e estruturais observados na vida útil de uma obra é decorrente dos recalques diferenciais na estrutura de fundação. Quando os valores destes deslocamentos ultrapassam certos limites, podem ocorrer desde problemas localizados como a fissuração de paredes até o colapso de todo o conjunto. Isto ocorre devido ao surgimento de acréscimos de esforços em pontos da estrutura provocados pela evolução dos deslocamentos da fundação.

Desta forma, pode-se afirmar que o desempenho da obra depende da capacidade da estrutura em absorver e redistribuir os acréscimos de tensões. Esta capacidade de absorção e redistribuição é definida como interação solo-estrutura que, apesar de sua relevância, é comumente desprezada na maioria dos projetos. A compatibilidade das deformações do sistema solo-estrutura gera a uniformização dos deslocamentos da fundação. Isto depende, fundamentalmente, da rigidez do conjunto solo-estrutura. Esta uniformização reduz as distorções angulares da edificação podendo evitar o aparecimento de danos na obra. Além disto, a não consideração dos efeitos dos recalques diferenciais no cálculo hiper-estático da estrutura de um edifício faz com que as fundações trabalhem em condições diferentes daquelas previstas em projeto (Chamecki, 1954).

Resultados indicados na literatura mostram que a interação solo-estrutura faz com que os pilares menos carregados recebam um acréscimo de carga (Gusmão e Gusmão Filho, 1994 e 1994a; Guimarães e Gusmão Filho, 1994; Gusmão Filho e Guimarães, 1997; Gusmão Filho, 2002; Lucena et al. 2004; Maia et al. 2004). Conseqüentemente, nestes pilares o recalque medido será maior que o estimado pelos métodos convencionais. Nos pilares mais carregados, ocorre o inverso, ou seja, alívio de carga e diminuição dos recalques previstos. Além disto, dependendo do nível de deformação do terreno e da rigidez da estrutura, a interação solo-estrutura pode modificar significativamente o desempenho da edificação.

Nota-se que a análise do conjunto solo-estrutura exige do engenheiro a capacidade de avaliar todas estas partes considerando-as como um único mecanismo. A desconsideração da condição de mecanismo único inicia-se desde a fase do projeto estrutural onde se admite a hipótese dos apoios ou fundações serem indelocáveis. O projeto de fundação, por sua vez, é desenvolvido levando-se em consideração apenas as cargas nos apoios, obtidas no projeto estrutural, e as propriedades do terreno de fundação, desprezando-se, normalmente, o efeito da rigidez da estrutura. Além disto, admite-se que os carregamentos são aplicados quando a estrutura está concluída, embora as cargas sejam aplicadas progressivamente ao longo da construção do edifício.

A representatividade do modelo adotado para avaliação do terreno de fundação pode ser feita através da associação da diferença entre os recalques médios medidos e estimados. No entanto, a representatividade do modelo de interação solo-estrutura de todo o sistema deve estar associada à diferença entre o coeficiente de variação da relação entre o desvio padrão e a média dos recalques medidos e estimados (Gusmão Filho, 2002). Esta relação é definida como o coeficiente de variação dos recalques.

Apesar da importância do conhecimento dos deslocamentos das fundações, a prática brasileira de fundações consiste em realizar monitoração de recalques apenas em situações onde são observados problemas em edificações, tais como trincas e rachaduras. Nestes casos, são instalados pinos na região inferior dos pilares, próximos às fundações, e determina-se a evolução dos recalques com o tempo, fornecendo elementos para tomada de decisões quanto à necessidade de reforço das fundações ou uma eventual medida de emergência como a desocupação da edificação ou outra medida

que se faça necessária. Em casos desta natureza não se tem qualquer idéia dos recalques anteriores à instalação dos pinos, ou seja, dos recalques já ocorridos e, portanto, do desempenho das fundações até então.

São também medidos os recalques em prédios quando da realização de escavações adjacentes, como no caso de solos de prédios vizinhos ou de escavações de metrô. Da mesma forma que no caso anterior, são medidos apenas os recalques ocasionados pelas escavações, sem conhecimento dos recalques já ocorridos.

Há alguns casos reportados na literatura, de obras de grande porte ou em solos compressíveis, com medição de recalques desde o início da construção. Mesmo nesses casos, as medições são usualmente interrompidas ao final da construção, quando da ocupação dos prédios.

Vale destacar que, segundo a norma NBR-6122/96 (1996), a observação do comportamento e a instrumentação de fundações devem ser feitas com os seguintes objetivos:

- Acompanhar o desempenho da fundação, durante e após a execução da obra, para permitir tomar, em tempo, as providências eventualmente necessárias, a fim de garantir a utilização e a segurança da obra;
- Esclarecer anormalidades em obras já concluídas, inclusive no que diz respeito a construções existentes nas proximidades;
- Ampliar a experiência local quanto ao comportamento do solo sob determinados tipos de fundações e carregamentos;
- Permitir a comparação de valores medidos com valores calculados, visando o aperfeiçoamento dos métodos de previsão de recalques e de fixação das cargas admissíveis, de empuxos, etc..

Danziger *et al.* (2000) ressaltam que a necessidade das medidas de recalques foi questionada em certos momentos, mas acidentes ocorridos e relatados amplamente na imprensa evidenciaram sua importância. De fato, as medições de recalques propiciam a adoção em tempo hábil de um eventual reforço das fundações, com custos evidentemente menores do que se as medidas fossem tomadas posteriormente. Estes autores indicam, ainda, que argumentos contrários à necessidade de controle dos recalques se fundamentam na ocorrência de poucos registros de problemas graves de fundações.

Vale destacar que nas fundações, que se constituem em elementos de alta responsabilidade e importância no comportamento de uma dada estrutura, nenhum controle de qualidade de seu desempenho é feito de forma rotineira, embora sugerido pela NBR 6122/96 (1996). Os controles se restringem, na maioria dos casos, à análise dos dados de execução das fundações (Danziger *et al.*, 2000).

O controle de recalques para o aperfeiçoamento das técnicas de projeto e construção tem, por sua vez, alcance mais amplo, sendo concernente à filosofia de projeto das fundações e da própria estrutura. No entanto, não importa quão acurada uma análise de recalques possa ser, ela é de limitado valor prático se o projetista não tem conhecimento do valor do recalque que pode ser tolerado pela estrutura em consideração (Skempton e MacDonald, 1956). Em outras palavras, o conhecimento dos recalques admissíveis é tão importante quanto a habilidade de se efetuar o cálculo ou medir os recalques.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados de uma monitoração de recalques de um edifício residencial construído na Cidade de Campos dos Goytacazes, localizada no Norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Apresenta-se uma metodologia expedita para acompanhamento de recalques de edificações durante a construção e habitação. O trabalho visa, ainda, a avaliação da interação solo-estrutura do caso particular de estudo. Além disto, este trabalho

permite a obtenção de dados importantes a respeito do comportamento e eficiência de fundações em estacas hélice contínua e sapatas.

2 – CASO DE ESTUDO

O estudo desenvolveu-se em um edifício residencial no município de Campos dos Goytacazes, RJ. A estrutura do edifício é em concreto armado convencional e, nos fechamentos, alvenaria formada de tijolos furados cerâmicos. As fundações que sustentam os pilares do corpo do edifício foram definidas em estaca hélice contínua, com profundidade média de 22 metros e diâmetros de 50 e 60cm. Para os pilares da periferia foi adotada solução em sapata a 1,5m da superfície do terreno e tensão admissível do solo igual a 200kPa. O edifício possui 12 pavimentos tipo mais um pavimento de garagens. A Figura 1 apresenta vistas externas da obra, já em adiantado processo de construção.

A Figura 2 apresenta a locação das fundações dos pilares monitorados ao longo do trabalho. O Quadro 1 apresenta as cargas de projeto de cada pilar que forma o corpo do edifício, assim como, o tipo de fundação ao qual se apoiam.

O subsolo da região é constituído por materiais diversos, característicos de depósitos aluviais, notando-se, freqüentemente, a presença de espessas camadas de argilas moles ou areias fofas. O subsolo onde está localizada a região metropolitana de Campos dos Goytacazes é formado por sedimentos flúvio-lacustres do quaternário (Teixeira, 2000). Estes sedimentos são compostos, basicamente, por argilas e siltes micáceos de coloração acinzentada, formando planícies de inundação. Nestes sedimentos também podem ser encontradas areias quartzosas, de coloração branca amarelada, geralmente mal graduadas, cuja granulometria varia de média a grosseira (Teixeira, 2000).

A Figura 3 apresenta o perfil estratigráfico determinado a partir de laudos de sondagem a percussão SPT. A profundidade das estacas é igual a 22 metros. Nota-se que as estacas estão assentadas em camada de material resistente, no entanto, existe uma camada superficial de 8 metros de material mole ao longo do fuste das estacas.

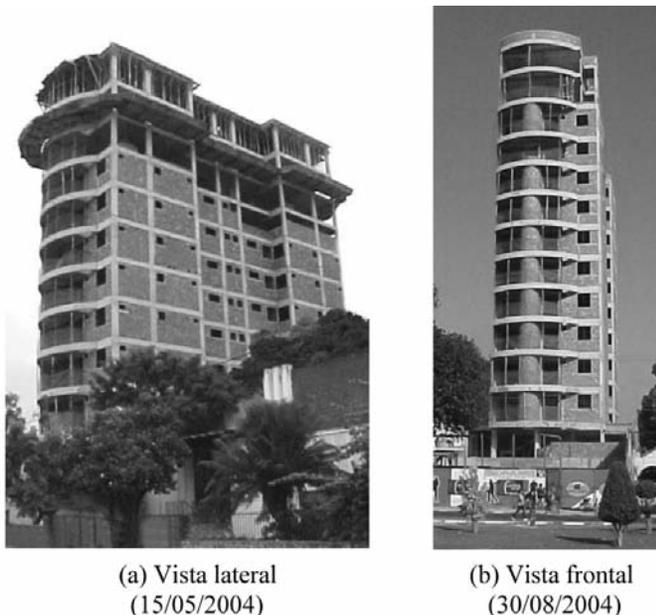


Fig. 1 – Edificação residencial utilizada como caso de estudo.

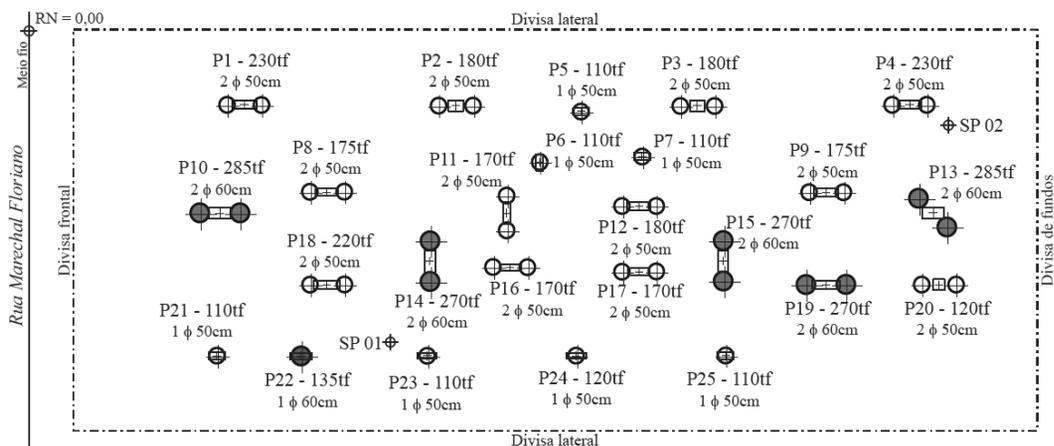


Fig. 2 – Localização e carga dos pilares e fundações do edifício estudado.

Quadro 1 – Cargas de projeto e fundações dos pilares monitorados.

Pilares	Carga de projeto (kN)	Número de estacas	
		φ50cm	φ60cm
P10 e P13	2795	–	2
P01 e P04	2256	2	–
P02, P03 e P12	1765	2	–
P05, P06, P07, P21, P23 e P25	1079	1	–
P08, P09 e P17	1716	2	–
P11 e P16	1667	2	–
P14, P15 e P19	2648	–	2
P18	2157	2	–
P20 e P24	1177	2	–
P22	1324	–	1
P55, P56, P59, P60 e P61	500	Sapata: 230 x 120 (cm)	

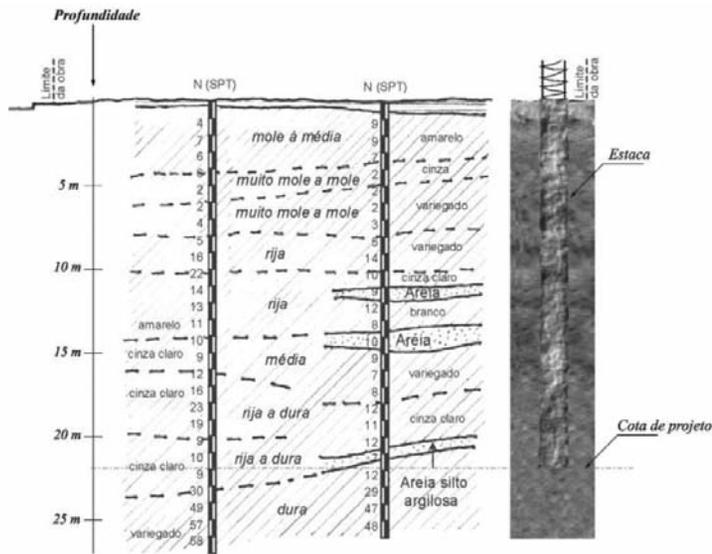


Fig. 3 – Perfil estratigráfico no local da obra.

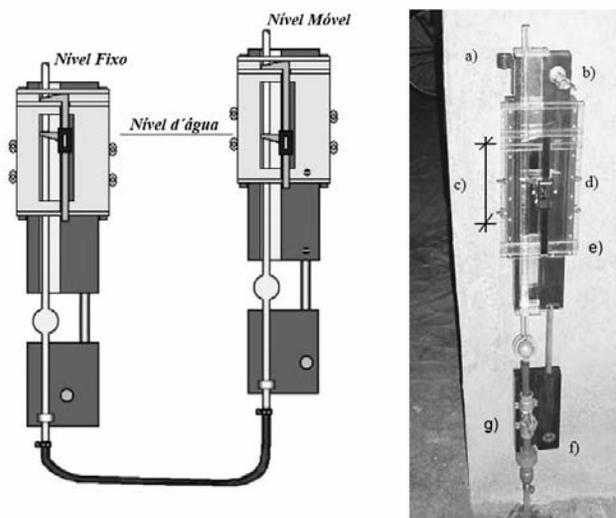
3 – METODOLOGIA PARA MONITORAÇÃO DOS RECALQUES

A monitoração dos recalques foi realizada através da medida dos deslocamentos verticais de pontos da estrutura, denominados pinos, localizados nos pilares do pilotis, em relação a um ponto fixo, denominado referência de nível, ou bench-mark. A referência de nível está localizada em região de forma a não sofrer influência da própria obra ou outras causas que possam comprometer sua indeslocabilidade.

A medição dos deslocamentos é feita através de um par de níveis, com exatidão de $\pm 0,01\text{mm}$, projetados e aperfeiçoados de modo a suprirem as necessidades e dificuldades específicas do caso de estudo. O nível foi construído a partir do modelo do Nível Terzaghi, que é fundamentado na teoria de vasos comunicantes. O princípio de operação do Nível Terzaghi tradicional é a medição do nível de água em dois cilindros que são conectados por um tubo flexível, com auxílio de um micrômetro. É importante que os dois cilindros e o tubo flexível sejam preenchidos com água livres de bolhas de ar.

Vale ressaltar que o Nível Terzaghi tradicional apresenta pouca precisão principalmente quando ocorrem vibrações e variações de temperatura durante as leituras (Alonso, 1991). Segundo Barros (2005) o nível Terzaghi tradicional possui acurácia da ordem de $0,127\text{ mm}$.

A Figura 4 apresenta uma figura esquemática e uma foto do equipamento desenvolvido. O equipamento se constitui basicamente de uma mangueira com extremidades conectadas a dois tubos de vidro transparentes e de mesmas dimensões. O conjunto é preenchido com água destilada e deaerada até que o nível de água alcance aproximadamente a altura média dos dois tubos. Pelo princípio de vasos comunicantes, não importará a diferença de altura entre os tubos, pois sempre os meniscos formados pelo líquido, tenderão permanecer na mesma altura em relação ao solo. Os dois tubos de vidro foram fixados em bases rígidas que possuem um suporte para um paquímetro digital com precisão igual a $\pm 0,01\text{mm}$. As bases rígidas possuem, também, na extremidade inferior, um ponto de apoio para um pino rígido que serve de referência para a medição dos recalques. O paquímetro locado na frente de cada tubo mede a distância do menisco até um ponto fixo na base rígida. A partir do completo conhecimento da geometria de cada conjunto, consegue-se através da leitura de cada paquímetro, definir com precisão a diferença de altura entre os centros de apoio de cada pino em relação ao *bench-mark*.



Legenda: (a) Nível de bolha; (b) Parafuso de reação; (c) Faixa de leitura efetiva do equipamento; (d) Paquímetro e seu respectivo suporte; (e) Estrutura móvel do medidor; (f) Furo de apoio do pino e ponto de referência para o cálculo do recalque; (g) Registro de água

Fig. 4 – Equipamento desenvolvido para monitoração dos recalques.

A Figura 5 apresenta um detalhe dos pinos de referência para fixação do nível nos pilares. A instalação dos pinos ocorreu após a execução dos pilares do pilotis e antes da concretagem da primeira laje. Após a instalação dos pinos fez-se a primeira leitura para determinar a altura inicial dos pilares em relação à referência de nível. As leituras subsequentes foram imediatamente antes da concretagem da laje de cada pavimento.

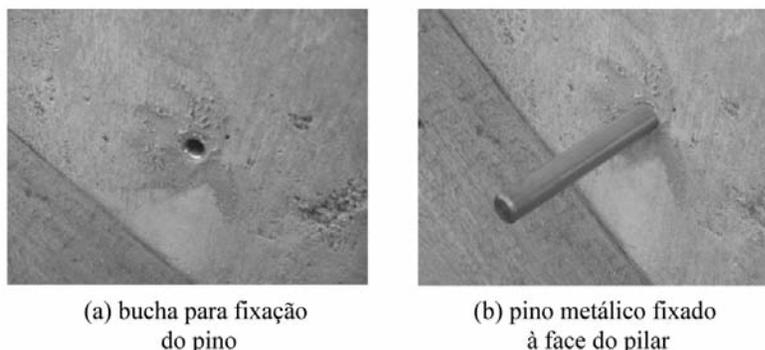


Fig. 5 – Pino de referência nos pilares.

A Figura 6 ilustra o posicionamento dos níveis sobre a referência de nível e no pilar. A verticalidade do nível na referência é mantida com o auxílio de uma haste metálica e de um tripé ajustável. O nível no pilar, denominado móvel, é encaixado no pino no pilar. Sua verticalidade é garantida com um nível de bolha e mantida através de um parafuso de reação (Figura 4).

Através de calibração no laboratório foi determinado um tempo mínimo de 60 segundos para a equalização dos meniscos. Após equalização, fecha-se o registro localizado na parte inferior da base

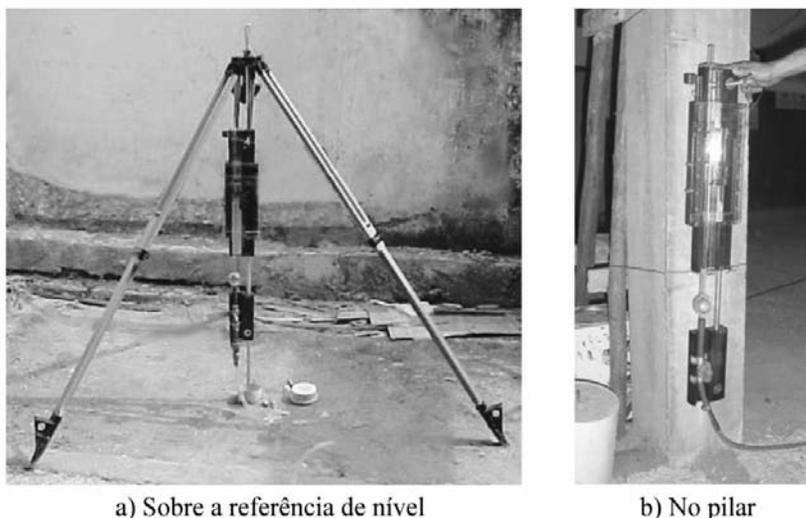


Fig. 6 – Fixação do sistema de medidas de recalque.

rígida e procedem-se 10 leituras do nível do menisco com o paquímetro. Isto se justifica para garantir uma maior precisão e evitar erros de leitura.

Calibrações sob condições controladas de temperatura mostraram que as medições feitas pelo aparelho mostram um erro padrão da ordem de 0,04 mm, com uma acurácia de 0,06 mm.

O Quadro 2 apresenta o histórico das medidas de recalque realizadas neste trabalho. Ressalta-se que foi procurado fazer a medição do recalque após a concretagem de cada laje da obra.

Quadro 2 – Datas das medições dos recalques e condição geral de carregamento da estrutura.

	Data	Número da medição	Dias transcorridos desde o início da monitoração	Condição de carregamento da estrutura
Etapas do processo construtivo modeladas numericamente	21/07/2003	Início	0	Pilares do pilotis concretados
	21/08/2003	1	30	1ª laje + pilares da 2ª laje
	16/09/2003	2	55	2ª laje + pilares da 3ª laje
	02/10/2003	3	71	3ª laje + pilares da 4ª laje
	17/10/2003	4	86	4ª laje + pilares da 5ª laje
	24/11/2003	5	123	5ª laje + pilares da 6ª laje
	18/12/2003	6	147	6ª laje + pilares da 7ª laje
	15/01/2004	7	174	7ª laje + pilares da 8ª laje
	11/03/2004	8	230	9ª laje + pilares da 10ª laje
	13/04/2004	9	262	10ª laje + pilares da 11ª laje
	15/05/2004	10	294	11ª laje + pilares da 12ª laje
11/06/2004	11	320	12ª laje + pilares da 13ª laje	

4 – MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA ESTRUTURA

A estrutura do edifício foi discretizada em elementos finitos, definindo um modelo tridimensional através de um sistema de três eixos perpendiculares (x, y e z). As vigas e os pilares foram discretizados como elementos de barra enquanto que as lajes e as alvenarias foram definidas como elementos de casca. Os elementos de casca, lajes e alvenarias, foram ligados em toda sua extensão aos elementos de barra, vigas e paredes, simulando, desta forma, a rigidez existente na estrutura em estudo. As características estruturais, assim como as dimensões de todos os elementos inseridos no modelo, seguiram criteriosamente as medidas definidas pelo projeto estrutural do edifício estudado. O Quadro 3 apresenta os valores utilizados para as propriedades dos materiais que compõem os modelos numéricos.

Quadro 3 – Propriedades dos materiais utilizados nos modelos numéricos.

Material	Módulo de elasticidade (kN/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Alvenaria	648	0,2
Concreto	2480	0,1

A elaboração de cada modelo numérico buscou simular a condição de carregamento condizente a cada etapa verificada durante as medições dos recalques. Através da seqüência de figuras 7a) a 7i) é possível verificar todos os modelos numéricos utilizados para simular a evolução executiva e o carregamento do caso em estudo. Ressalta-se a presença da alvenaria, a partir da sexta medição, Figura 7g), nos primeiros pavimentos da estrutura.

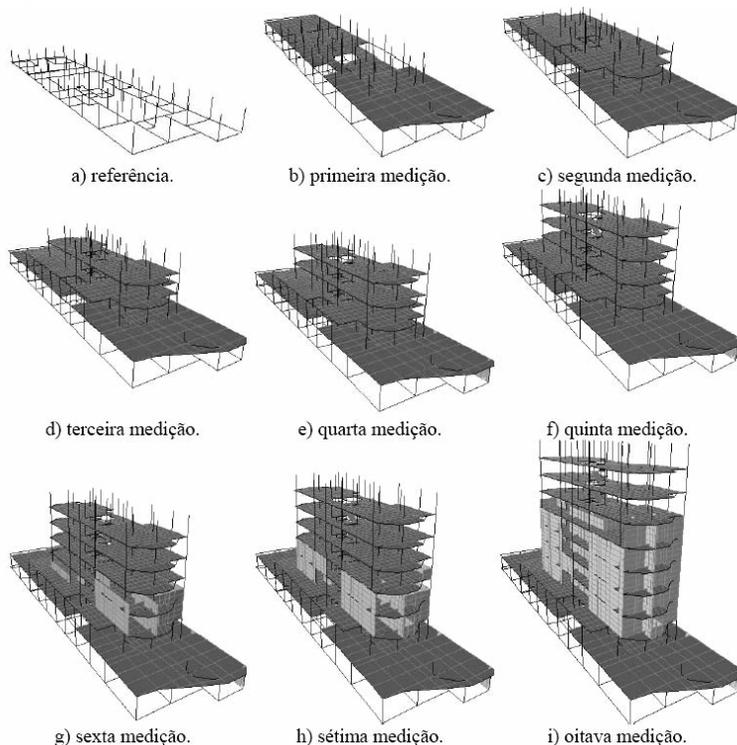


Fig. 7 – Modelos tridimensionais do caso de estudo utilizados para simular a condição de carregamento em cada fase do processo executivo.

Com o intuito de avaliar a influência da interação solo-estrutura sobre a redistribuição de cargas transmitidas às fundações foram consideradas duas condições de apoio para cada modelo numérico. Na primeira condição os apoios da estrutura foram admitidos indelocáveis verticalmente ao longo de todo o processo executivo. Esta medida tem a finalidade de obter o carregamento transmitido às fundações através de um modelo de maior praticidade e simplicidade. Na segunda hipótese, os recalques medidos em cada fase construtiva são impostos nos apoios, simulando os efeitos da interação solo-estrutura em termos de deslocamentos.

Devido ao tempo disponível para o desenvolvimento da pesquisa e em função do cronograma executivo da obra, foram criados modelos numéricos que denotam o comportamento da estrutura somente para as oito primeiras leituras de recalques, totalizando oito lajes construídas. Basicamente, foram gerados nove modelos tridimensionais (Figuras 7a) a 7i)), um relativo à primeira medição de referência e as oito primeiras medições de recalque, cada uma das medições tendo sido submetida a duas condições de apoio. Os resultados provenientes da simulação com a imposição dos recalques em cada apoio servem como uma estimativa do real comportamento da estrutura.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 4 fornece os valores dos recalques medidos. A primeira medição foi realizada para obtenção da elevação inicial dos pinos localizados em cada pilar do corpo do edifício em relação ao marco de referência. Para análise da evolução dos recalques considerou-se a cota inicial dos pilares igual a zero.

Dos resultados das medições, verifica-se um crescimento dos recalques absolutos medidos em cada pilar com o tempo de construção. A forma das curvas de variação dos recalques com o tempo de construção é similar para todos os pilares da obra, independentemente do tipo de fundação, quantidade ou diâmetro das estacas em cada pilar. As Figuras 8 ilustram a evolução dos recalques da fundação com o tempo de construção para os pilares apoiados sobre duas estacas hélice com diâmetro nominal igual a 60cm e sobre sapatas, respectivamente.

O comportamento da fundação apresenta uma fase inicial marcada pela presença de recalques elevados, indicando uma participação solitária do fuste das estacas no processo de absorção do carregamento proveniente da superestrutura. E uma segunda fase, verificada após os 90 dias de construção, aproximadamente, se observa a presença de menores taxas de recalques entre as medições. Esta alteração no comportamento das fundações profundas surge provavelmente devido ao início de uma maior participação da ponta das estacas na absorção dos esforços.

A similaridade do comportamento recalque vs tempo entre as fundações profundas e superficiais justifica-se devido à influência de fatores provenientes da interação solo-estrutura e da rigidez característica do edifício estudado. Este comportamento sugere que, em um dado momento do processo executivo, o recalque das fundações superficiais foi possivelmente imposto pelas fundações profundas que sustentam a maior parte das cargas da estrutura.

Dos resultados obtidos pode-se concluir que o mecanismo de transferência de carga das estacas para o maciço de fundação depende do nível de recalque. Neste caso, a metodologia executiva e o formato da ponta da hélice do trado helicoidal, favorecem que a mobilização de resistência de ponta das estacas hélice contínua ocorra à custa de grandes recalques (Simons e Menzies, 1981; Almeida Neto, 2002).

A redução da taxa de crescimento dos recalques provoca também a homogeneização dos acréscimos de recalque. A homogeneização dos acréscimos de recalque à medida que a obra evolui pode ser verificada através do coeficiente de variação dos recalques CV total da obra e das fundações em sapatas ou estacas hélice durante a construção do edifício (Figura 9). Destaca-se que a

Quadro 4 – Evolução dos recalques absolutos ao longo do tempo de construção.

		Recalques Absolutos (mm)											
Lajes		0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12
Dias		0	30	55	71	86	123	147	174	230	262	294	320
Pilares	Medições	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1		0,00	1,18	14,75	20,08	23,40	24,19	26,19	26,71	28,43	36,99	31,45
2		0,00	3,29	14,22	21,05	23,86	24,72	26,15	27,96	31,80	38,49	32,89	30,68
3		0,00	1,57	13,11	19,91	22,57	22,20	27,07	27,22	35,44	37,72	33,76	30,46
4		0,00	2,28	16,39	18,50	25,64	26,05	29,63	29,46	22,66	29,68	34,24	32,40
5		0,00	2,43	13,36	20,88	23,46	23,28	25,57	26,62	31,31	37,43	32,69	31,02
6		0,00	3,95	14,10	20,99	24,05	24,00	28,53	28,13	36,80	39,68	33,46	31,76
7		0,00	5,75	14,48	21,70	24,41	24,21	30,06	28,61	37,32	40,76	34,55	32,85
8		0,00	3,03	13,65	20,15	23,16	23,88	25,17	26,29	30,52	36,56	33,59	30,00
9		0,00	2,09	12,68	18,82	23,37	24,70	28,86	27,17	32,29	28,33	33,93	31,45
10		0,00	2,07	12,56	18,43	22,41	23,02	27,14	25,60	30,25	36,61	31,40	29,82
11		0,00	3,58	15,57	22,54	24,41	25,73	27,90	28,48	33,28	40,57	34,84	31,97
12		0,00	3,00	14,96	21,69	24,44	25,26	30,47	28,90	37,46	39,65	35,59	32,47
13		0,00	2,87	5,76	19,41	3,86	25,80	24,95	27,20	20,95	30,18	35,34	33,41
14		0,00	3,34	13,67	20,16	23,33	26,32	26,53	27,23	31,42	38,92	33,83	33,45
15		0,00	2,05	5,78	22,05	24,11	23,93	30,00	28,55	37,25	39,35	35,16	32,26
16		0,00	3,42	13,05	20,22	22,01	23,65	25,07	26,22	34,74	37,86	33,78	30,38
17		0,00	4,92	15,15	22,95	25,08	25,37	29,35	29,24	37,44	40,42	35,08	32,42
18		0,00	7,03	17,25	24,47	27,76	28,06	31,26	30,86	36,66	42,80	37,13	35,81
19		0,00	2,84	13,99	19,63	24,34	25,76	28,76	28,04	21,01	29,35	34,30	32,50
20		0,00	3,27	13,96	22,27	23,67	23,96	25,56	26,71	20,54	39,37	33,30	32,32
21		0,00	5,23	15,37	22,61	24,47	25,47	28,26	28,09	31,64	39,67	34,11	32,60
22		0,00	3,30	16,80	20,21	26,40	24,40	29,79	28,70	34,60	42,30	36,73	34,59
23		0,00	1,47	12,40	20,25	22,62	23,59	27,91	25,18	28,92	37,11	31,39	30,12
24		0,00	2,15	13,72	20,28	23,69	23,79	27,01	27,64	36,28	38,60	32,38	30,66
25		0,00	2,20	13,26	20,93	23,25	23,40	26,02	25,95	35,41	29,05	33,80	30,08
55		0,00	6,55	16,89	24,89	27,64	29,16	32,72	31,36	36,04	42,57	37,46	38,22
56		0,00	4,01	13,37	20,98	23,78	24,24	28,40	26,71	30,97	38,25	32,14	31,39
59		0,00	2,26	5,53	21,46	24,10	24,62	31,87	28,86	38,11	40,35	35,07	33,39
60		0,00	4,95	8,82	21,53	26,18	25,68	33,58	31,23	25,48	33,10	33,16	36,91
61		0,00	3,427	16,56	22,31	26,96	26,38	30,12	30,31	33,71	33,28	39,49	37,0

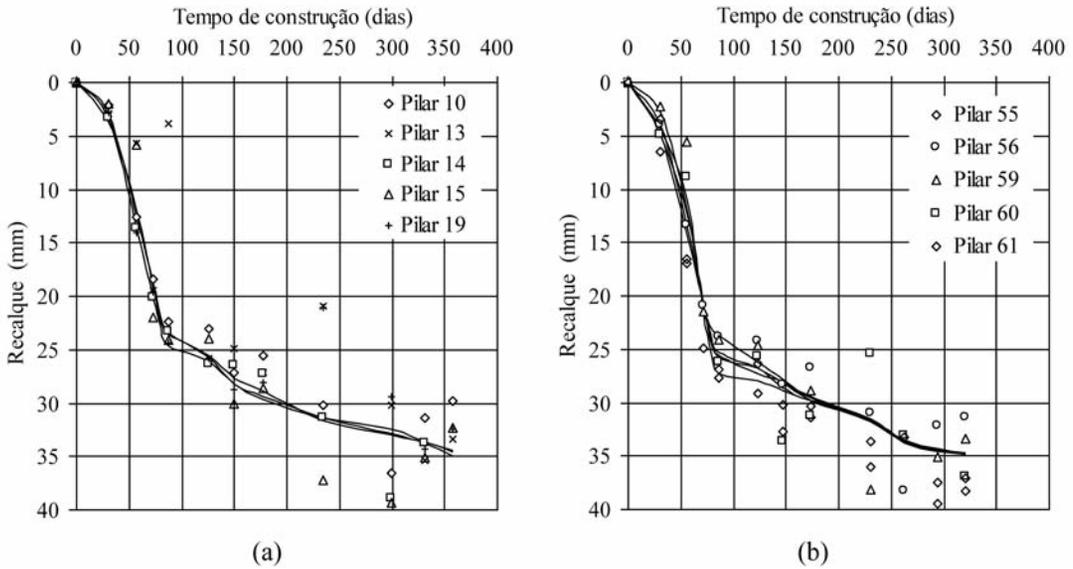


Fig. 8 – Variação dos recalques com o tempo de construção dos pilares sobre:
 (a) duas estacas com diâmetro igual a 60cm; (B) sapatas de divisa.

diminuição do valor do coeficiente de variação dos recalques CV é uma conseqüência do enrijecimento da estrutura (Gusmão, 1994). Atualmente, não existem estudos específicos para o estabelecimento de valores limites para o coeficiente de variação dos recalques CV de edificações. Desta forma, a variação do CV obtida pelos deslocamentos dos apoios monitorados fornece apenas uma visualização global do desempenho da estrutura. Ressalta-se que para os níveis de CV observados não ocorreu nenhum dano estrutural.

A Figura 10 apresenta a variação das velocidades média, máxima e mínima dos recalques das fundações com o tempo de construção. Verifica-se que o início da construção é marcado por grandes velocidades de recalque. Após a execução do terceiro pavimento, correspondente a 70 dias de construção, aproximadamente, ocorre a redução das velocidades de recalque. Observa-se,

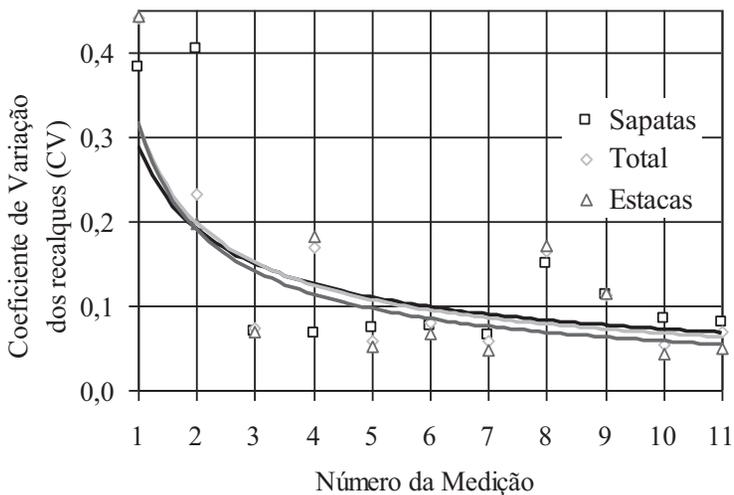


Fig. 9 – Coeficiente de variação dos recalques das fundações em estacas hélice contínua e sapatas.

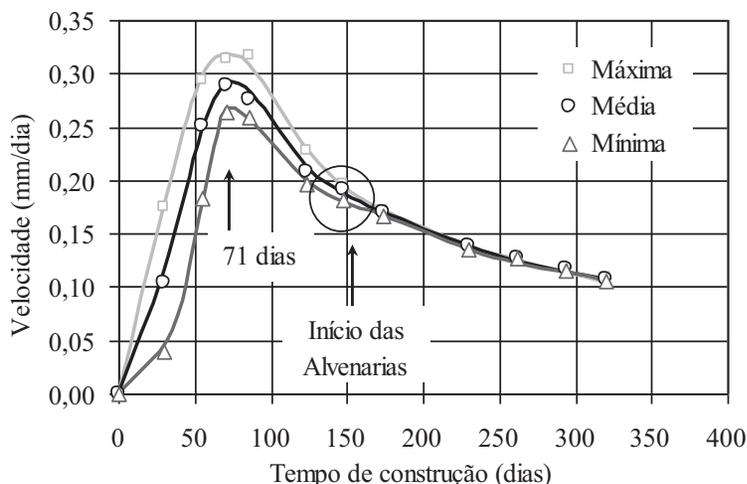


Fig. 10 – Variação da velocidade de recalques em função do tempo de construção.

também, que no início da construção das alvenarias, fato que representa um significativo aumento da rigidez da estrutura, não ocorreu modificação da tendência de redução da velocidade dos recalques com o tempo de construção, mas existe a redução da dispersão da velocidade de recalque entre os pilares.

O aumento da rigidez estrutural provoca a uniformização das velocidades de recalque entre os pilares, o que pode ser verificado pela menor diferença entre os valores de velocidades máximas e mínimas a partir da colocação das alvenarias (Figura 10). Este comportamento sugere que, à medida que a estrutura ganha um comportamento monolítico, a velocidade de recalque de cada pilar tende para a velocidade média.

Através da modelagem numérica da estrutura da obra em 3 dimensões foi possível estimar as cargas transmitidas para as estruturas de fundação. Considerando-se as duas condições de apoio, é possível estimar as curvas carga vs. recalque das fundações. As Figuras 11 e 12 apresentam as curvas

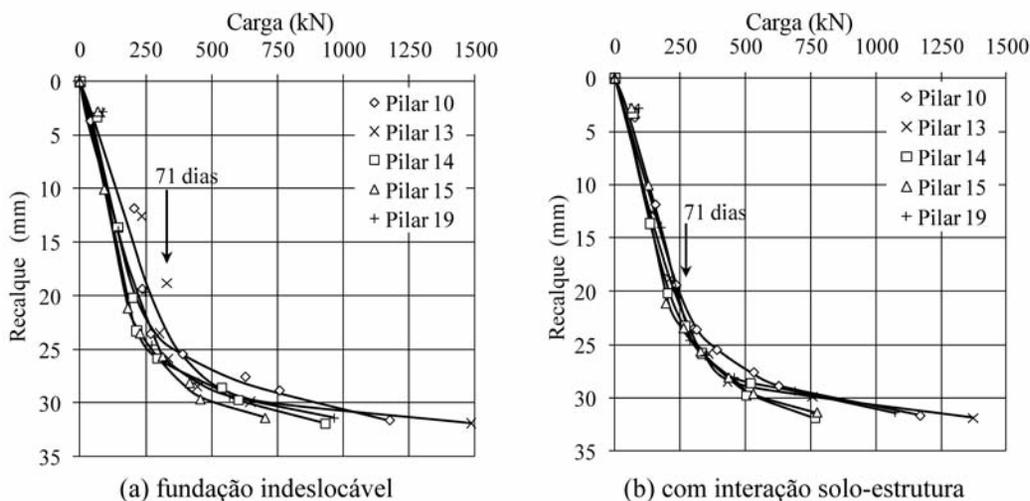


Fig. 11 – Curva carga vs. recalque para pilares apoiados em duas estacas com diâmetro igual a 60cm (Maia *et al.*, 2005).

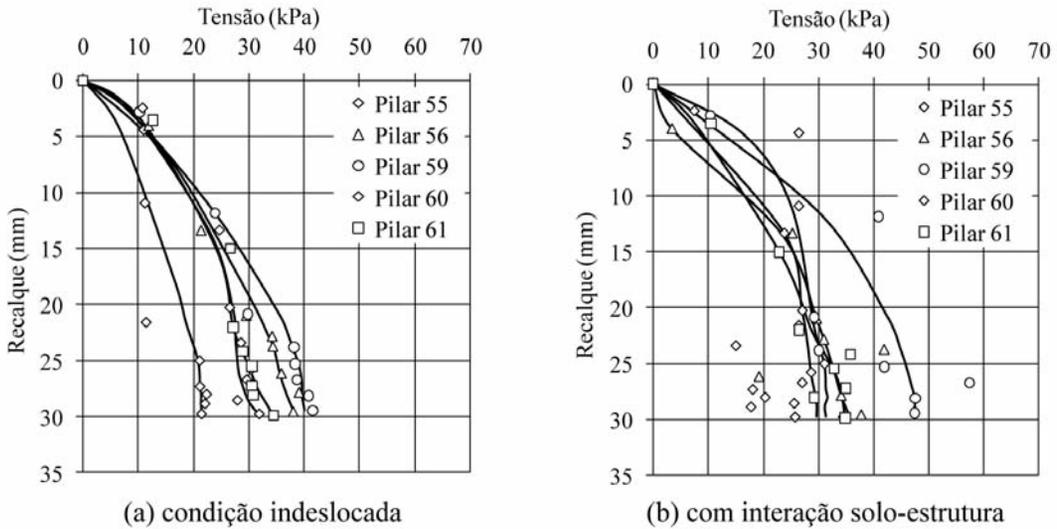


Fig. 12 – Curva tensão vs. recalque de um grupo de pilares apoiados sobre sapatas de divisa.

carga vs. recalques dos pilares monitorados apoiados sobre duas estacas hélice com diâmetro nominal igual a 60cm e sobre sapatas, para as duas condições de apoio.

Um primeiro aspecto a se observar nas curvas carga vs. recalque é a forma propriamente dita. No caso das estacas, os grandes recalques iniciais indicam a necessidade de grandes deslocamentos da estaca para ganho de capacidade de carga, como já discutido. Por outro lado, as fundações em sapata sugerem o estado de ruptura. De fato, o comportamento das fundações em sapata é um reflexo da interação solo-estrutura. Neste caso, o corpo do edifício ganha carga com o crescimento da obra enquanto que a periferia, com fundações em sapata, não. Deste modo, o corpo central recalca e, devido à rigidez da estrutura, induz recalque nas fundações periféricas sem acréscimo aparente de carga.

Das Figuras 11 e 12 nota-se uma modificação das curvas carga vs. recalques obtidas a partir das duas condições de liberdade dos apoios. Neste caso a interação solo-estrutura, representada pela condição de apoios deslocáveis para determinação das cargas, provoca o aumento ou a redução da carga estimada do pilar. Isto depende, basicamente, da posição do pilar na estrutura: periférica ou central.

De fato, existe uma relação entre a taxa de redistribuição de carga entre os pilares, a dispersão dos recalques e a rigidez da edificação durante a construção.

Para verificação desta relação, pode-se avaliar a dispersão das cargas devido à interação solo-estrutura com a dispersão dos recalques em relação à média, durante a construção. Para isto, define-se o fator de redistribuição de carga F_Q com as seguintes expressões:

$$F_Q = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_i} \text{ para } Q_i \geq Q_{ssi} \quad (1)$$

e

$$F_Q = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_{ssi}} \text{ para } Q_i < Q_{ssi} \quad (2)$$

onde, Q_i é a carga aplicada no pilar i estimada para a estrutura para apoios fixos e Q_{ssi} é a carga estimada considerando a interação solo-estrutura, com apoios deslocáveis. Deste modo, F_Q assume valores negativos ou positivos quando o pilar perde ou ganha carga devido à interação solo-estrutura, respectivamente. O valor de F_Q varia normalmente entre -1 e 1.

A dispersão dos recalques D_w é definida pela seguinte expressão:

$$D_w = \frac{w_i - \bar{w}}{\bar{w}} \quad (3)$$

onde, w_i é o recalque do pilar i e \bar{w} é a média dos recalques. Geralmente, D_w assume valores entre -1 e 1.

A Figura 13 apresentam as variações de D_w e F_Q para a primeira, segunda, terceira e quinta lajes. Nestes gráficos, cada ponto representa um pilar e a dispersão dos pontos indica uma maior redistribuição de cargas entre os pilares devido a interação solo-estrutura e um maior coeficiente de variação dos recalques.

A Figura 13 mostram que no início da construção existe uma considerável redistribuição de cargas e recalques entre os pilares. Isso se justifica pela baixa rigidez da estrutura no início da construção. Com o andamento da construção, a rigidez do edifício aumenta, provocando a concentração dos pontos na área central do gráfico. Após a quinta laje observa-se que não ocorre mais significativa dispersão de recalques e que a redistribuição de carga é menor que 20%, aproximadamente. Este efeito ocorre independentemente do tipo de fundação, quantidade ou diâmetro das estacas.

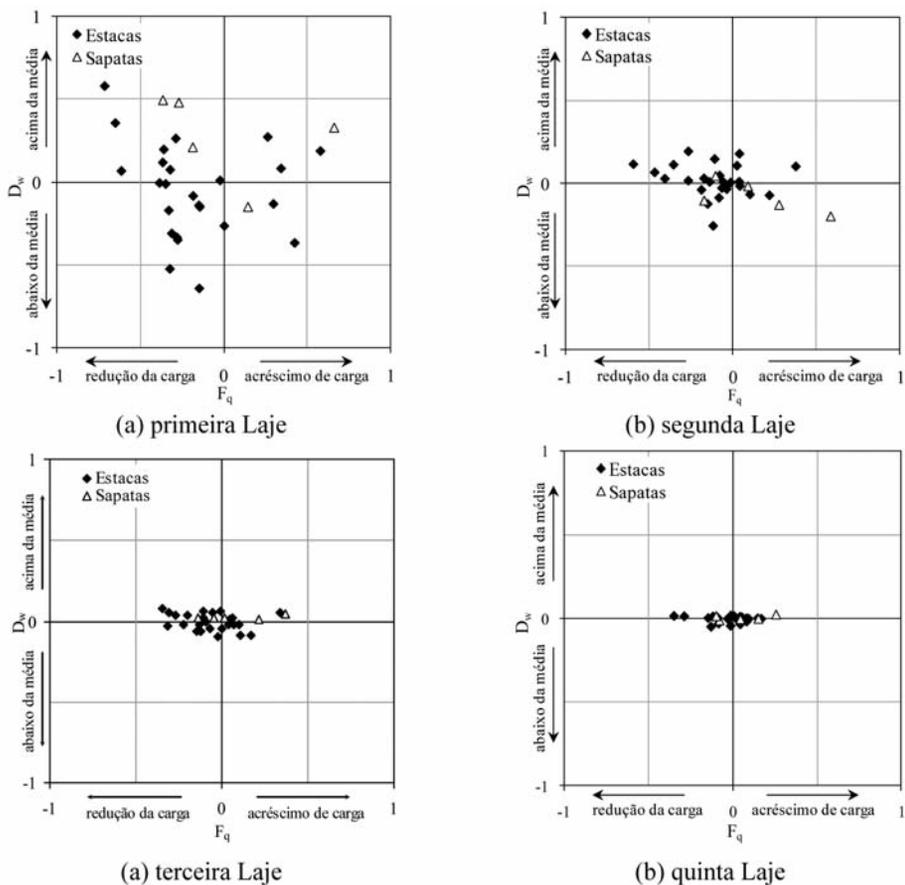


Fig. 13 – Variação da redistribuição de carga com a dispersão dos recalques (Maia *et al.*, 2005).

6 – CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicam que o uso do sistema de medidas de recalque utilizando o princípio do Nível Terzaghi permitiu a obtenção de resultados satisfatórios. Além disto, os resultados obtidos permitiram a avaliação do efeito da interação solo-estrutura na redistribuição de cargas e no comportamento das fundações do edifício monitorado.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Construworck Engenharia por permitir a divulgação dos resultados.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Neto, J. A. (2002). *Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega – Aspectos executivos*. Dissertação de mestrado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 174 p., São Paulo, Brasil.
- Alonso, U.R. (1991). *Previsão e controle das fundações*. Editora Edgard Blucher, 142 p., São Paulo, Brasil.
- Barros, R. A. (2005). *Previsão e Controle de Recalques Durante a Construção de Edifícios*. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, 118 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Chamecki, S. (1954). *Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação*. Proc. COBRAMSEF, Vol. I, pp. 35-80, Porto Alegre, Brasil.
- Danziger, F. A. B.; Danziger B. R.; Crispel F. A. (2000). *A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações*. Proc. SEFE IV, pp. 191-202, São Paulo, Brasil.
- Guimarães, L. J. N, e Gusmão Filho, J. A. (1994). *Prática de fundações na Cidade de Recife - Uma contribuição ao estudo de interação solo-estrutura*. Relatório de Pesquisa, Iniciação Científica, CNPq, 50 p. Recife, Brasil.
- Gusmão Filho, J. A. (2002). *Fundações - do conhecimento geológico à prática da engenharia*. Editora Universitária – UFPE, 345 p., Recife, Brasil.
- Gusmão Filho, J. A. e Guimarães, L. J. N. (1997). *Limit stiffness in soil structure interaction of building*. Proc. XIV ICSMFE, Ed. A.A. Balkema, Vol. 2, pp. 807-808, Hamburgo, Alemanha.
- Gusmão, A. D. (1994). *Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações*. Solos e Rochas, Vol. 17, N. 1, pp. 47-55. São Paulo.
- Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, J. A. (1994). *Construction sequence effect on settlements of buildings*. Proc. XIII ICOSOMEFE, Vol. 2, pp. 1803-1806, New Dehli, Índia.
- Gusmão, A.D.; Gusmão Filho, J. A. (1994a). *Avaliação da Influência da interação solo-estrutura*. Proc. X COBRANSEF, Vol.1, pp. 68-74, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Lucena, A. E. F. L.; Bezerra, R. L.; Gusmão, A. D. (2004). *Monitoramento de recalques de edifício sobre fundações diretas desde o início da construção e avaliação da interação solo-estrutura*. Solos e Rochas, vol. 27, no. 3, pp. 215-230.

- Maia, P. C. A.; Barros R. A.; Saboya, F. (2004). *Acompanhamento de Recalques de Fundação em Estacas Hélice na Região de Campos dos Goytacazes*. Proc. SEFE V, Vol. 2, pp. 441-449, São Paulo, Brasil.
- Maia, P. C. A.; Barros R. A.; Saboya, F. (2005). *Control and Prediction of the Pile Foundations Behavior Through Settlement Measures*. Proc. XVI ICSMGE, 4 p. , Boston-USA.
- NBR-6122/96 (1996). *Projeto e Execução de Fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Norma Técnica, 33 p., São Paulo, Brasil.
- Simons N. E.; Menzies, B.K. (1981). *Introdução a Engenharia de Fundações*. Ed. Interciência, 199 p., Rio de Janeiro, Brasil.
- Skempton A. W.; MacDonald D. H. (1956). *Allowable settlements of buildings*. Proc. Institution of Civil Engineers, Part 3, vol. 5, pp. 727-768, London, England.
- Teixeira, L.M. (2000). *Ocorrência de solos moles na região metropolitana de Campos dos Goytacazes – Um enfoque probabilístico*. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF– RJ, 59 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.