

Contribuição das alvenarias na interação solo-estrutura através do estudo de um caso envolvendo danos estruturais

Contribution of masonry walls in soil-structure interaction: a case history involving structural damages

Luciana de Moraes Pereira Rosa

MSc, Pesquisadora do INPI.
lucianamprosa@gmail.com

Bernadete Ragoni Danziger

DSc, Professora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ.
bernadeterd@hotmail.com

Eliane Maria Lopes Carvalho

DSc, Professora
Universidade Federal Fluminense - UFF.
elianemaria@vm.uff.br

Resumo

O artigo apresenta a análise da interação solo-estrutura de uma construção que revelou, ao longo dos anos, comportamento inadequado de suas fundações. São resumidas análises anteriores de Rosa (2005), incluindo a interação solo-estrutura na previsão dos recalques. Essa nova análise considera, também, a influência das alvenarias na interação. Os recalques distorcionais previstos são analisados em conformidade com os danos, documentados em vários momentos da vida útil da edificação. O modelo de Kelvin foi utilizado para representar o comportamento do solo com o tempo. Verificou-se que, mesmo com as simplificações adotadas, justificadas no artigo, os resultados da análise numérica foram capazes de reproduzir a extensão dos danos, assim como sua localização espacial. Os resultados mostram a importância de uma concepção de projeto de fundações mais realista, contemplando a interação solo-estrutura.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura, danos estruturais, recalques distorcionais.

Abstract

An analysis of soil-structure interaction of a construction with unsatisfactory foundation behavior along time is presented. Previous analyses by Rosa (2005) are briefly described considering soil x structure interaction in predicting foundation settlement. In addition, a new analysis is now presented, including the influence of the masonry in the soil-structure interaction. The predicted distortional settlements are analyzed in conformity with the observed damages documented at various moments of the construction lifetime. Kelvin's model was employed to represent the soil behavior along time. Notwithstanding the simplifications adopted and justified in the article, the results of the numerical analysis were able to reproduce the extent and spatial location of the damages. Such results show the relevance of a more realistic foundation analysis involving soil x structure interaction.

Keywords: Soil-structure interaction, structural damages, distortional settlements.

1. Introdução

Apresenta-se uma análise de um edifício em fundações diretas, que revelou mau desempenho, com danos severos observados ao longo dos anos, decorrentes de recalques excessivos.

Uma previsão do comportamento do solo é procedida, incluindo a grande-

za e o desenvolvimento do recalque com o tempo, com base num modelo consistente do solo.

A análise estrutural foi feita com um modelo numérico tridimensional da estrutura, elástico-linear, utilizando um programa baseado no método dos ele-

mentos finitos (MEF).

Com um modelo consistente do solo, foi possível reconstituir os danos ocorridos, sua extensão e localização espacial, além de ilustrar o papel das alvenarias na interação solo-estrutura.

2. Descrição da edificação

Trata-se de um edifício residencial com 5 pavimentos, situado em Vitória, (ES). A estrutura é composta por pórticos nas duas direções, sobre fundações superficiais em sa-

patas corridas, assentes em camada arenosa de pequena espessura, sobrejacente a argila de baixa consistência. As sapatas longitudinais apresentam larguras de 0,9m e 1,1m

e as transversais, de 0,3m e 0,4m, na periferia e internamente, respectivamente. A Figura 1 ilustra um perfil geotécnico típico e a Figura 2, a localização dos pilares.

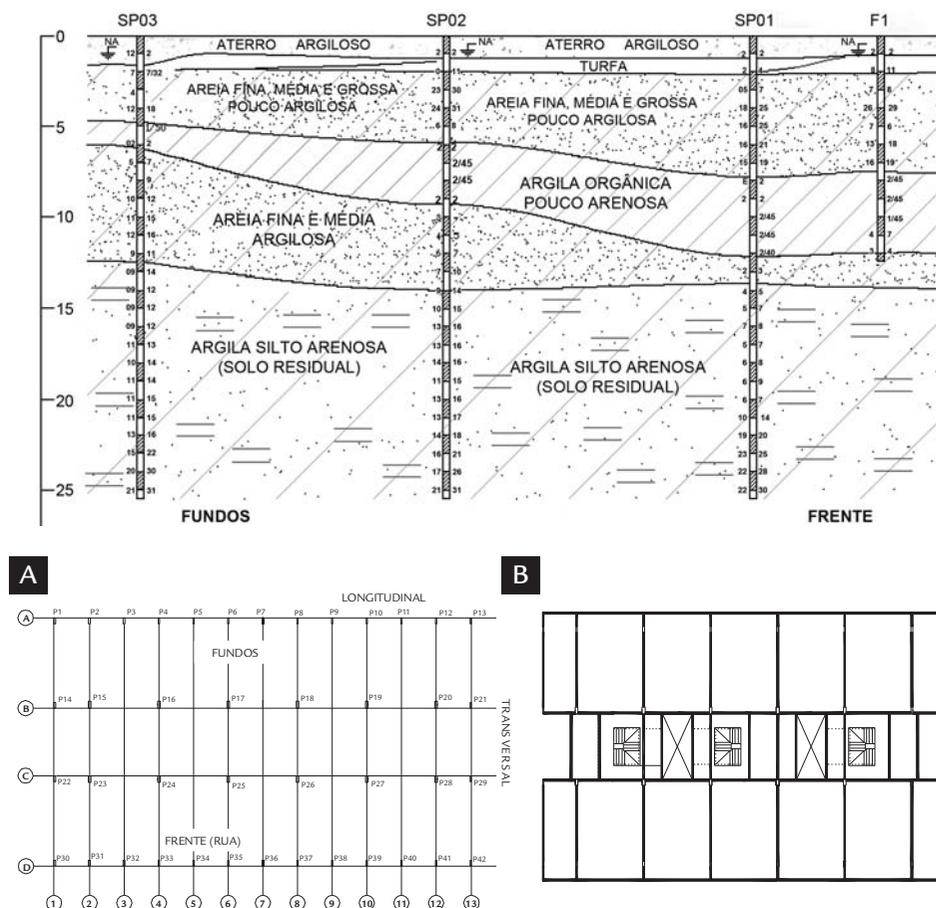


Figura 1 Perfil geotécnico com base nas sondagens.

Figura 2 A) Localização dos pilares do edifício. B) Localização das alvenarias.

3. Histórico dos problemas

Os problemas foram relatados num parecer geotécnico (Danziger, 2002), o qual teve, como objetivo, esclarecer suas causas. O parecer registra o surgimento de trincas e rachaduras, que se iniciaram há muitos anos, provavelmente ainda durante a construção, e que prosseguiram até a vistoria, cerca de 20 anos após o final da obra. O parecer ressalta tratar-se de recalques distorcionais excessivos. O padrão da maioria das trincas, a 45° (Figura 3), mostra ter ocorrido maiores

recalques no centro, do que nas extremidades, e maior na frente do que nos fundos. Os recalques distorcionais foram significativos perpendicularmente à rua. A vistoria mostrou apartamentos dos fundos mais afetados que os da frente.

Em relação à concepção geotécnica das fundações, parece ter sido correta a solução adotada, segundo o parecer. Ao observar a Figura 1, podem ser notadas duas camadas que poderiam gerar recalques significativos. A primeira, mais su-

perficial, entre as profundidades de 1 m e 2 m, de turfa e/ou argila orgânica, apresenta, no projeto original, a especificação de remoção, com substituição por material granular compactado. A segunda encontra-se a uma maior profundidade, entre 5 m e 13 m, com espessura máxima de cerca de 4 m e que não aparecia em alguns trechos. Tal camada não poderia ser removida e mereceu preocupação por parte dos projetistas. O projeto de fundações constituiu num vigamento bastante



Figura 3
Fissuras nos apartamentos dos fundos.

rígido, objetivando a uniformização dos recalques, evitando os recalques distorcionais que viessem a provocar danos como os ocorridos.

No entanto, o vigamento projetado não teve rigidez suficiente para uniformizar os recalques da edificação. Essa incapacidade do vigamento está associada a diversas causas, como o não cumprimento integral, na execução, das especificações de projeto quanto aos seguintes requisitos: i) remoção da camada de turfa e substituição por areia média e grossa compactada, ii) provável colocação de uma camada de aterro no piso do subsolo (mais 50 cm), diferentemente do especificado (apenas 30 cm) e iii) insuficiência de rigidez da estrutura de fundação.

Na época da vistoria, foram feitas três sondagens, bem como escavações nas proximidades das fundações, até as bases das sapatas, cerca de 1,80m

Estimativa dos recalques

Face à não disponibilidade de resultados de ensaios de adensamento da camada argilosa compressível, foi utilizado o trabalho de Barata e Danziger (1986) e Barata et al. (2002).

Os autores desenvolveram correlações úteis para uma estimativa da grandeza do recalque total esperado em camadas argilosas de origem marinha, normalmente adensadas ou com reduzida razão de pré-adensamento. Castelo e Polido (1988) caracterizam a argila de Vitória como de origem marinha, normalmente adensada.

Modelo visco-elástico utilizado na interação solo-estrutura

O modelo visco-elástico foi utilizado para representar o comportamento do solo argiloso, com compressibilidade lenta e velocidade de recalque decrescente com o tempo. O modelo de Kelvin associa a mola e o amortecedor em paralelo, Figura 4, objetivando simular um comportamento mais realista do solo, na

de profundidade em relação ao piso de concreto. Verificou-se uma diferença em relação ao projeto original, que especificava uma profundidade da sapata de 1,30m em relação ao piso da garagem. Uma camada de cerca de 50 cm de aterro deve ter sido, assim, acrescida ao terreno natural. Verificou-se um material de preenchimento da cava que não correspondia ao especificado, tendo uma das sondagens mostrado ainda a presença de turfa, não totalmente removida, diferente do especificado.

O fato de os apartamentos dos fundos terem sido mais afetados foi atribuído à maior espessura da camada de argila na frente e na região central da obra. Na frente e na região central, essa espessura é da ordem de 3 a 4 metros, enquanto nos fundos a camada chega a não aparecer em algumas sondagens. Além da tendência natural de recalques

A partir desta proposta, foi elaborado um programa em Mathcad para a estimativa de recalque nas diversas verticais das sondagens executadas. O programa calcula a distribuição das tensões verticais em profundidade e avalia o módulo oedométrico da camada compressível. Finalmente, procede a uma estimativa de recalque.

A estimativa de recalques foi procedida para a situação documentada no parecer, ou seja, as sapatas encontram-se a uma profundidade de 1,80 m, com um acréscimo de mais 50 cm de aterro.

expectativa de uma análise mais aproximada da interação solo-estrutura.

A rigidez K da mola está associada ao recalque total, ao longo de muitos anos, que ocorreu em cada trecho do solo da fundação. Para a estimativa do coeficiente de rigidez, foram considerados os valores de recalque total previstos em

maiores na região central em relação à periferia, mesmo em caso de solos homogêneos, a menor espessura ou inexistência da camada na região dos fundos deve ter feito com que os pilares dos fundos sofressem recalques absolutos muito menores do que os do centro, gerando recalques distorcionais muito significativos entre os fundos e o centro da edificação.

O parecer considera que, embora o vigamento projetado não tenha sido capaz de uniformizar os recalques das fundações em níveis aceitáveis, impedindo a formação das trincas e rachaduras, o fato é que ele trabalhou. Caso não existisse, os danos teriam sido muito maiores. Como decorrência do vigamento e da grandeza dos recalques, uma redistribuição de cargas nos pilares deve ter ocorrido. Esta redistribuição costuma ocorrer no sentido de redução de cargas nos pilares centrais e aumento nos periféricos.

Os valores de recalques previstos, sem considerar a interação solo-estrutura, variaram entre 7,5 cm (nos fundos) e 24,9 cm (no centro). Detalhes do cálculo de recalques, incluindo a situação do projeto original, foram apresentados por Rosa (2005).

A partir das sondagens, foi possível se proceder à estimativa dos recalques com o tempo, por adensamento primário, para cada vertical de sondagens. Para a argila mole de Vitória, considerou-se um valor de coeficiente de adensamento, c_v , de 1×10^{-8} m²/seg.

cada sondagem.

O coeficiente de amortecimento c procura reproduzir a velocidade do recalque com o tempo.

Os solos permeáveis, de comportamento drenado e que não desenvolvem poro-pressões em excesso à hidrostática quando são carregados, são

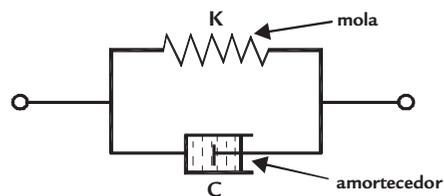


Figura 4
Modelo de Kelvin.

conhecidos como solos de compressibilidade rápida, cujos recalques ocorrem, via de regra, simultaneamente à aplicação do carregamento.

Solos permeáveis de comportamento drenado apresentam coeficientes de amortecimento muito reduzidos. Solos argilosos, que exibem uma permeabilidade

de muito reduzida, apresentam um coeficiente de viscosidade que tende a ser tanto maior quanto mais lento é o recalque.

A teoria de adensamento, tal como proposta por Terzaghi e Fröhlich (1936), mostra que a velocidade de recalque depende não somente da permeabilidade do solo (ou do coeficiente de adensa-

mento), mas, também, das condições de drenagem e da espessura da camada compressível. Uma previsão das curvas de recalque com o tempo foi procedida para todas as sondagens, em função das características geotécnicas e de um valor de c_v compatível com a argila marinha de Vitória.

Modelo estrutural da edificação

Foi elaborado um modelo estrutural, através de um programa baseado no método dos elementos finitos. As vigas, os pilares e as sapatas corridas foram modelados como elementos de barra e as lajes, como elementos de placa, conforme ilustrado na Figura 5.

O comportamento da superestrutura foi considerado elástico-linear, embora o concreto também possua características viscosas e a configuração da estrutura, com a ocorrência dos danos, não caracterize um comportamento elástico-linear. Todavia, tal simplificação foi

necessária para a análise realizada, que procurou enfatizar o comportamento visco-elástico do solo.

Foram feitos vários modelos de análise. O primeiro considerou a estrutura sobre apoios rígidos, com o objetivo de calibrar o modelo e comparar as cargas dos pilares com as do projeto original, com diferenças nas cargas de cerca de 10%. Isso se deve à geometria bastante regular e ao modelo estrutural simples (Figura 5).

O segundo modelo procurou reproduzir a situação evidenciada por ocasião

da vistoria, ou seja, as sapatas posicionadas a 1,8 m de profundidade e o aterro antigo com um acréscimo de 50cm.

A partir do segundo modelo, que considerou apenas a rigidez da estrutura, incluíram-se, no terceiro modelo, as alvenarias, com o objetivo de quantificar seu papel na uniformização dos recalques.

Para os modelos 2 e 3, com apoios visco-elásticos, as cargas atuantes foram consideradas na análise crescentes linearmente com o tempo de construção, cerca de um ano, construção esta mantida por vinte anos.

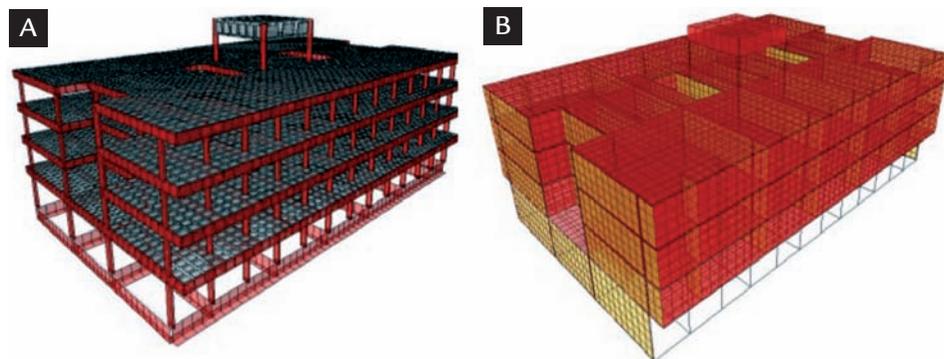


Figura 5
Modelo estrutural da edificação.
A) Sem alvenaria.
B) Com alvenaria.

Coefficientes de rigidez e viscosidade do solo

Os coeficientes de rigidez das molas do modelo de Kelvin foram determinados de forma a reproduzirem a compressibilidade da camada compressível. A expectativa é de que o efeito de um pequeno pré-adensamento, usualmente presente nos depósitos naturais, resultando em menores recalques, tenha compensado a não consideração do efeito da compressão secundária.

Para a estimativa do coeficiente de rigidez, partiu-se da definição do coeficiente de recalque K , relação entre a pressão atuante e o recalque estimado, em

kN/m^3 . Os valores de K assim obtidos, interpolados entre as verticais de sondagem, foram multiplicados pela largura das sapatas e pela distância entre nós, no nível da base, obtendo-se os coeficientes de rigidez em kN/m .

Reis e Aoki (2000) obtiveram coeficientes de viscosidade η com base em ajustes de curvas medidas e teóricas de recalque no tempo, aplicadas a três edifícios em Santos, SP.

De forma a melhor reproduzir as condições de velocidade de recal-

que, Rosa (2005) partiu dos estudos de Massad (1982), baseado no método de Asaoka (1978), e de Souza Pinto (2002), chegando ao valor de η para cada sondagem. Rosa (2005) detalha o procedimento, determinando para η um valor médio de cerca de 10^3 MPa.dia. A partir dos valores de coeficiente de viscosidade η , o valor do coeficiente de amortecimento c , para entrada no programa de elementos finitos, foi obtido pela multiplicação de η pela distância entre nós consecutivos da fundação.

Coeficiente de rigidez para a alvenaria

Os coeficientes de rigidez considerados para a alvenaria foram baseados no modelo de Torres (2007), no qual as vigas e as vergas foram modeladas como elementos de barra, a alvenaria (em tijolos cerâmicos), como elementos de placa e a argamassa de ligação não foi considerada, por causa das grandes dimensões do painel em relação à espessura das juntas (normalmente de 1 cm). No modelo, há a possibilidade de separação e de deslizamento

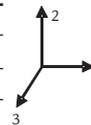
na região entre a parede e a viga. Torres (2007) optou pela colocação de elementos de conexão, que simulassem a ligação entre os painéis de alvenaria e os elementos de concreto. As características desses elementos foram ajustadas pela comparação dos resultados numéricos com os experimentais de Holanda Jr (2002).

A Tabela 1 apresenta os coeficientes assim ajustados. O painel de alvenaria foi discretizado em elemento de casca, afas-

tado da viga e da alvenaria grauteada em 0,1cm. Essa folga foi usada para colocação desses elementos de ligação com coeficientes de rigidez de translação e rotação, impedindo translação nas três direções (coeficientes de rigidez translacionais altos) e liberando as rotações nas direções 2 e 3. Os materiais, alvenaria e concreto, foram considerados com comportamento elástico-linear e isotrópico, com propriedades obtidas de Holanda Jr (2002).

Tabela 1
Rigidez dos elementos de ligação (Torres, 2007).

| Translação | Rotação |
|--------------------------|-------------------------------|
| $U1 = 10^4 \text{ KN/m}$ | $R1 = 10^4 \text{ KN.m/m}$ |
| $U2 = 10^4 \text{ KN/m}$ | $R2 = 10^{-5} \text{ KN.m/m}$ |
| $U3 = 10^4 \text{ KN/m}$ | $R3 = 10^{-5} \text{ KN.m/m}$ |



4. Análise dos resultados

Alguns resultados da análise com o solo representado pelo modelo de Kelvin são ressaltados. Rosa (2005) apresenta a descrição detalhada da análise numérica ao longo de vinte anos, incluindo o desen-

volvimento dos recalques, a distribuição das cargas nos pilares, bem como os esforços solicitantes em algumas peças estruturais e sua comparação com aqueles provenientes do projeto original, com o

objetivo de explicar os danos ocorridos.

Nesse artigo, destaca-se a influência das alvenarias, cujos resultados são comparados com aqueles analisados por Rosa (2005).

Uniformização dos Recalques

Rosa (2005) observou, claramente, a tendência à uniformização dos recalques, quando se considera a interação da estrutura com o solo, embora tenha destacado que o valor do recalque médio, praticamente, não varia. De fato, o coeficiente de variação dos recalques diminuiu, quando se considerou a interação solo-estrutura na análise numérica, confirmando resultados de Gusmão (1994) e experiências anteriores na instrumentação de recalques.

Nessa nova análise, procurou-se comparar a interação solo-estrutura com e

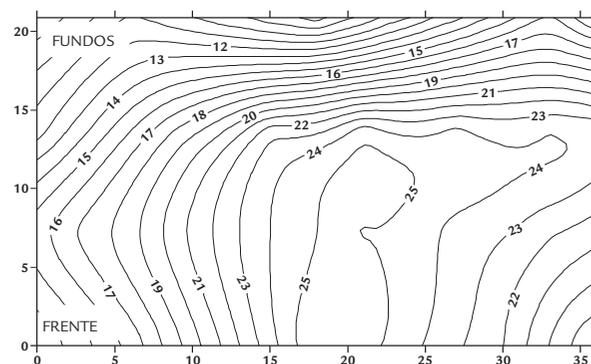
sem a influência das alvenarias. Observou-se que o recalque médio, praticamente, não varia, mas o coeficiente de variação diminuiu de forma ainda mais evidente, mostrando o papel importante das alvenarias na uniformização dos recalques.

Uma forma clara e simples de se visualizar a tendência de uniformização dos recalques é através do traçado das curvas de iso-recalques para diferentes tempos da análise numérica.

A Figura 6 apresenta as curvas sem considerar a interação. A Figura 7, à sua esquerda, apresenta as referidas

curvas, quando se considera a interação com a estrutura. A Figura 7, à sua direita, apresenta essas mesmas curvas, incluindo, também, as alvenarias, após 20 anos. Os maiores recalques ocorreram na frente da edificação e, de forma mais acentuada, à direita. O efeito da distorção média prevista, crescente no tempo, justifica o histórico de trincas que se abriam, após preenchidas pela construtora. Comparando-se as curvas, observa-se o papel importante da estrutura e das alvenarias na uniformização dos recalques da edificação.

Figura 6
Curvas de iso-recalques sem considerar a interação solo-estrutura, recalques em metro.



Crítérios de Bjerrum

Foram calculadas as distorções angulares entre alguns pontos da edificação (Figura 2), para a análise com a interação

solo-estrutura. A Tabela 2 indica distorções angulares significativas, para a fundação, conforme executada, além dos

valores calculados, quando se considera a influência das alvenarias.

Rosa (2005) comparou a situação

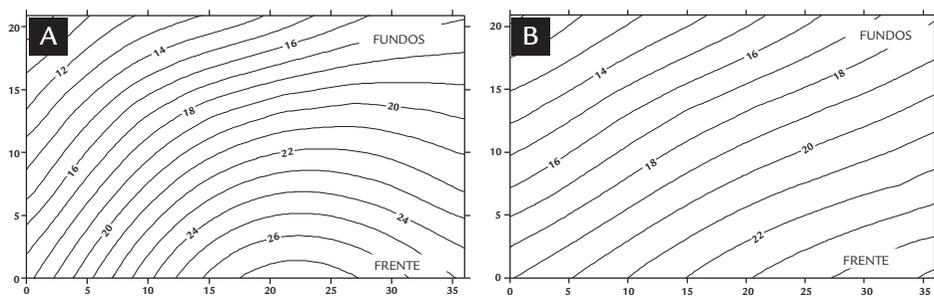


Figura 7
Curvas iso-recalques considerando:
A) A interação solo-estrutura após 20 anos.
B) Incluindo também as alvenarias, recalques em centímetros.

projetada e a executada e verificou que as distorções, para a situação projetada, não justificariam os danos estruturais, mas apenas nas alvenarias. Para a situação executada, os resultados da Tabela 2 revelam um panorama consistente com o ocorrido. Entre o centro e os fundos, ocorreram os maiores recalques distorcionais, estando, nos fundos, os danos

mais severos. Os recalques distorcionais calculados, no trecho dos fundos, indicam, inclusive, valores próximos ao limite para o qual se deve temer danos na estrutura de edifícios comuns (1/150) (Bjerrum, 1963). Os demais valores mostram, também, menores danos para as outras regiões, porém com valores acima do limite a partir do qual se poderia espe-

rar trincas nas alvenarias (1/300), constataando o que, de fato, ocorreu.

Contemplando a influência das alvenarias, os resultados da Tabela 2 mostram que a tendência de uniformização de recalques é marcante, com distorções angulares bem inferiores, mas que também justificam os danos ocorridos.

| Colunas | Distorção angular | |
|-----------|-------------------|---------------|
| | Sem alvenaria | Com alvenaria |
| P8 - P18 | 1/148 | 1/227 |
| P7 - P18 | 1/142 | 1/200 |
| P17 - P25 | 1/183 | 1/256 |
| P26 - P37 | 1/220 | 1/279 |
| P30 - P31 | 1/176 | 1/500 |
| P23 - P24 | 1/182 | 1/429 |

Tabela 2
Distorções angulares entre alguns pilares para a fundação executada.

5. Conclusões

Foi apresentado um estudo de caso envolvendo danos estruturais importantes, face ao comportamento inadequado do solo de fundação.

A grandeza dos recalques, e seu desenvolvimento com o tempo, foram avaliados em previsões pouco precisas, tendo como base sondagens e características de compressibilidade obtidas de correlações.

Um modelo detalhado da estrutura em elementos finitos foi concebido, com o comportamento do solo representado pelo modelo de Kelvin, que procura representar suas características de compressibilidade e viscosidade, numa tentativa de melhor representar as condições de contorno existentes, considerando a análise da interação solo-estrutura.

Rosa (2005) investigou duas situações: a constante das especificações de projeto e aquela executada.

A análise de Rosa (2005) incluiu o ajuste dos parâmetros de viscosidade do solo, o estudo da distribuição espacial dos recalques em planta, a uniformização dos recalques com o tempo, a redistribuição dos esforços, as distorções resultantes e a alteração dos esforços em algumas peças estruturais.

O artigo destaca o papel relevante das alvenarias, na uniformização dos recalques, que, em média, são de mesma grandeza. Os recalques distorcionais justificam os danos ocorridos.

Conclui-se que, apesar do caráter simplificado das estimativas da grandeza

e da velocidade dos recalques e, portanto, dos parâmetros pouco aproximados utilizados no modelo de Kelvin, bem como da consideração simplificada do comportamento elástico-linear da estrutura, as análises procedidas foram capazes de reproduzir o mau comportamento das fundações da edificação. O modelo foi capaz de reconstituir a localização espacial dos danos, bem como justificar, qualitativa e, também, quantitativamente, o acréscimo excessivo de esforços em algumas peças estruturais, em conformidade com os registros dos danos nas vistorias realizadas.

A análise desse caso, com mau desempenho, visa a contribuir para futuros projetos de fundações em solos de baixa consistência.

6. Referências bibliográficas

- ASAOKA, A. Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundation*, v. 18, n. 4, 1978.
- BARATA, F. E., DANZIGER, B. R. Compressibilidade de argilas marinhas moles brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, *Anais...* Porto Alegre, 1986. v. 1, p. 99-122.
- BARATA, F. E., DANZIGER, B. R., PAIVA R. F. Compressibilidade de argilas marinhas moles brasileiras. Ampliação de banco de dados e extensão da análise. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, *Anais...* São Paulo, 2002. v.1, p. 271-280.

- BJERRUM, L. Allowable settlement of structures. *Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Germany: Wiesbaden, 1963. v. 3.
- CASTELO, R. R., POLIDO, U. F. Tentativa de sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória, ES. In: SIMPÓSIO SOBRE DEPÓSITOS QUATERNÁRIOS DAS BAIXADAS LITORÂNEAS BRASILEIRAS: ORIGEM, CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E EXPERIMENTOS DE OBRAS. Vitória, 1988. v. 2, p. 3.1-3.23.
- DANZIGER, F. A. B. *Parecer geotécnico sobre os problemas verificados no edifício de Vitória, ES*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2002.
- GUSMÃO, A. D. Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações. *Solos e Rochas*, v. 17, n. 1, p. 47-55, 1994.
- HOLANDA JÚNIOR, O. G. *Influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. 242p. (Tese de Doutorado).
- MASSAD, F. Método gráfico para o acompanhamento da evolução dos recalques com o tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7. Recife, 1982. v. 2.
- REIS, J. H. C., AOKI, N. Análise de interação solo-estrutura em maciço de argila mole. In: SEMINÁRIO DE INTERAÇÃO ESTRUTURA-SOLO EM EDIFÍCIOS. São Carlos, 2000. CD-rom.
- ROSA, L. M. P. *Interação solo-estrutura - análise de um caso de obra envolvendo danos estruturais*. Niterói: Universidade Federal Fluminense, Engenharia Civil, 2005. 117p. (Dissertação de Mestrado).
- SOUZA PINTO C. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- TERZAGHI, K., FRÖHLICH O. K. *Theorie der Setzung von Tonschichten*. Vienna, Deuticke, 1936.
- TORRES, L. S. *Análise numérica de uma edificação popular em alvenaria estrutural assente em solo compressível*. Niterói: Universidade Federal Fluminense, Engenharia Civil, 2007. 120p. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 13 de agosto de 2008. Aprovado em 29 de dezembro de 2011.