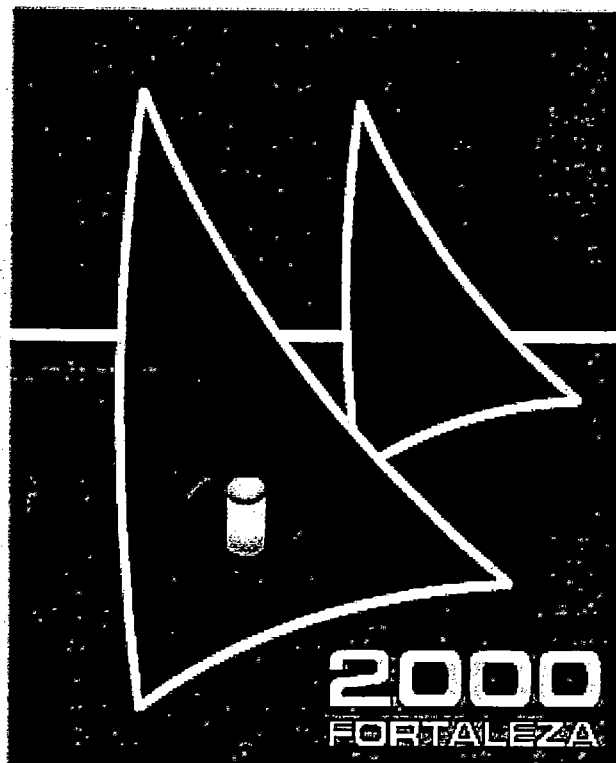


42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO



13 A 18 DE AGOSTO
Centro de Convenções
do Ceará

Realização:



IBRACON

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - casa 44

cep: 05508-901 - São Paulo - SP

Telefax: (11) 3714-2149

(11) 3765-0099

Site: <http://www.ibracon.org.br>

e-mail: office@ibracon.org.br

Produzido por Arle Indusbas
www.arleindusbas.com.br

**COMPORTAMENTO DE UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO
CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E O EFEITO
INCREMENTAL CONSTRUTIVO**

Oswaldo Gomes de Holanda Júnior⁽¹⁾

Marcio Antonio Ramalho⁽²⁾

Márcio Roberto Silva Corrêa⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia de Estruturas pela EESC-USP. E-mail: *osvaldo@sc.usp.br*

⁽²⁾ Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP)
Departamento de Engenharia de Estruturas
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – CEP 13560-970 – São Carlos-SP
Fax: (16) 273-9482

RESUMO

Dois fatores podem ser citados como muito interessantes para serem incorporados em análises de edifícios, na busca de uma representação mais próxima da realidade: a interação solo-estrutura e o efeito incremental da construção. Este trabalho constitui uma continuação do artigo "*Influência da interação solo-estrutura em edifícios de concreto armado sobre fundações diretas submetidos a ações verticais*", apresentado no 41º Congresso Brasileiro do Concreto, porém com ênfase no segundo fator mencionado. O objetivo é verificar a influência do efeito incremental construtivo no comportamento das estruturas. A partir de um edifício usual tomado com exemplo, são realizadas quatro análises distintas: uma sem considerar nenhum dos fatores, duas outras com consideração de cada um dos fatores separadamente, e uma última, com consideração tanto da interação solo-estrutura, quanto da sequência construtiva. Em todas as análises aplicam-se ações verticais correspondentes ao peso próprio da edificação e às sobrecargas normalmente impostas na análise estrutural de edifícios. Comparando os resultados, verifica-se que os valores dos esforços na estrutura tornam-se significativamente diferentes quando se considera o efeito incremental da construção, em especial nos pavimentos superiores.

1107532
111200

11 p.

SYSNO	1107532
PROD	003575
ACERVO EESC	

INTRODUÇÃO

Para que um edifício seja dimensionado é necessário que se crie um modelo que o represente, para ser submetido a uma análise estrutural. Portanto, com a finalidade de se obter resultados mais próximos da realidade, vários modelos teóricos de análise já foram criados. A evolução dessas teorias está vinculada ao constante avanço do conhecimento científico e do desenvolvimento de computadores que possibilitam análises mais elaboradas.

Percebe-se que um fator muito interessante a ser incorporado na análise estrutural de edifícios é a interação solo-estrutura. A influência desta consideração pode ser bastante significativa especialmente em edifícios sobre fundações diretas, em que é maior a flexibilidade da fundação, conforme HOLANDA JR. (1999a).

Outro fator importante para uma análise mais rigorosa é a consideração do efeito incremental da construção, que consiste na aplicação gradual do carregamento e a variação da rigidez estrutural de acordo com o ritmo do processo construtivo. Pode-se considerar que este seria mais um passo a ser dado na teoria de análise estrutural.

Nesta pesquisa pretende-se estudar o comportamento de um edifício ao se considerar juntamente a interação solo-estrutura e a seqüência construtiva. São determinados seus esforços e deslocamentos. Os resultados dessa análise são comparados aos de outras análises com ou sem a interação com o solo, e com ou sem o efeito incremental da construção.

EDIFÍCIO ANALISADO

Foi estudado o caso de um edifício de concreto armado com dimensões usuais. Este exemplo é constituído de 13 pavimentos e possui fundação em sapatas isoladas. A planta de forma do pavimento tipo pode ser visualizada na Figura 1.

Para a análise com a consideração da interação solo-estrutura, entende-se a edificação como um conjunto composto por superestrutura, subestrutura e maciço de solos, conforme a Figura 2. Sem esta consideração, o edifício normalmente é representado por um sistema estrutura-base rígida.

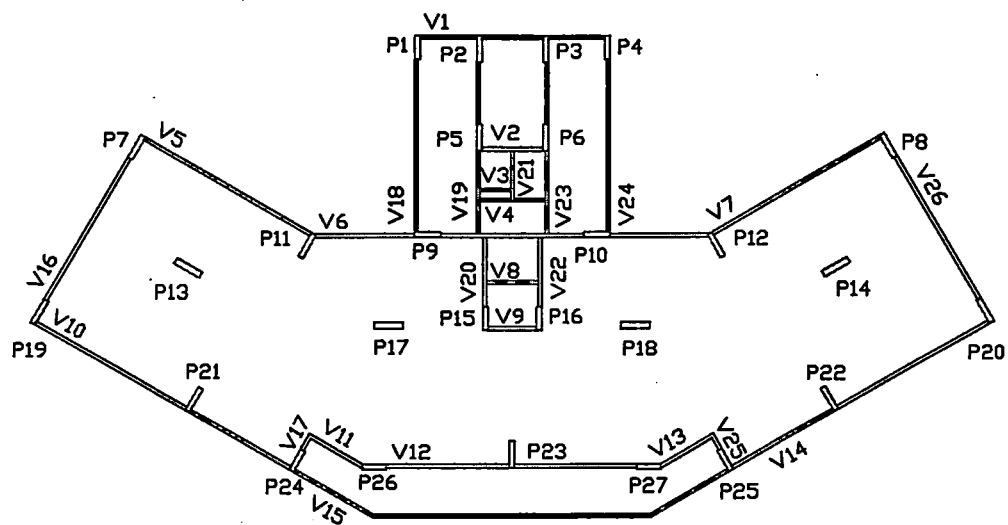


Figura 1 Planta de forma do pavimento tipo do edifício Manhattan.

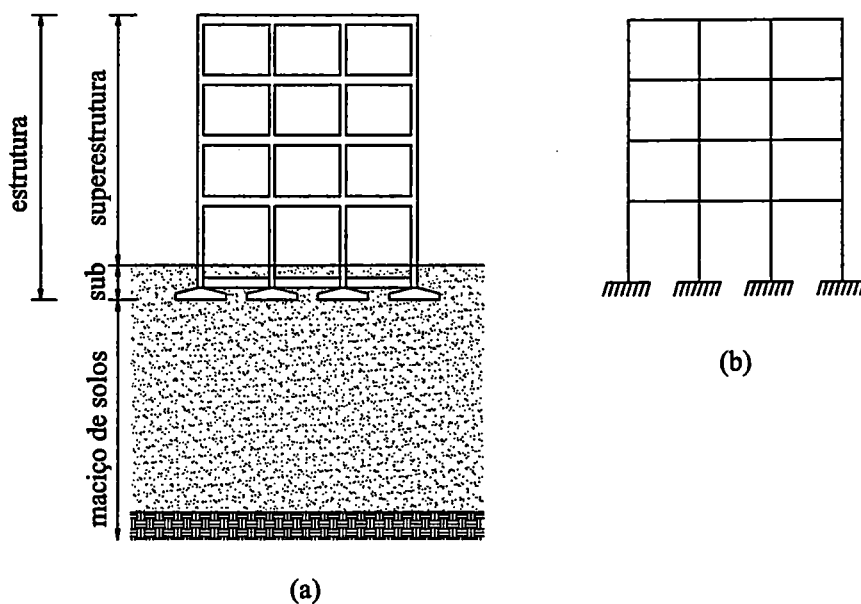


Figura 2 Hipóteses de projeto. (a) Sistema superestrutura-subestrutura-macço de solos.
(b) Sistema estrutura-base rígida.

Na sua modelagem, o exemplo teve sua superestrutura representada por um pórtico tridimensional e o conjunto subestrutura-macço de solos modelado a partir do elemento sapata rígida, desenvolvido por RAMALHO (1990).

Os elementos do tipo barra, que compõem os pórticos tridimensionais, são elementos finitos lineares com dois nós localizados em suas extremidades e seis graus de

liberdade por nó: três translações e três rotações segundo os eixos ortogonais que definem o espaço tridimensional.

Representa-se o conjunto subestrutura-maço de solos através do elemento sapata rígida. Este elemento é composto de uma ou mais sapatas perfeitamente rígidas, cada uma ligada a um ponto nodal da superestrutura. Na formulação do elemento, o solo é considerado como um meio contínuo, elástico, linear, isotrópico, e homogêneo. Após implementação realizada por HOLANDA JR. (1999b), permite-se a consideração de uma camada indeslocável situada dentro do maço de solo a uma certa profundidade.

ANÁLISES EFETUADAS

Ao edifício foram aplicadas ações verticais. O carregamento consiste basicamente do seu peso próprio e das sobrecargas normalmente aplicadas em um projeto estrutural, de acordo com a NBR 6120 (1980). Foram previamente realizadas as análises dos pavimentos. As reações nos pilares foram então aplicadas aos respectivos nós do pórtico tridimensional.

Submeteu-se o exemplo a quatro análises distintas:

- (1) Análise sem Interação;
- (2) Análise com Interação;
- (3) Análise Incremental sem Interação; e
- (4) Análise Incremental com Interação.

Nas análises (1) e (3), considerou-se o pórtico como apoiado sobre base rígida, não se levando em conta a flexibilidade da fundação. Nas análises (2) e (4), a estrutura foi analisada considerando-se a interação com o solo. Apenas nas duas últimas análises foi simulado o efeito incremental da construção. No item a seguir, expõe-se como foram realizadas estas análises.

ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA

Imaginando a sequência construtiva, quando apenas o primeiro pavimento está feito, seu peso próprio não causa esforços solicitantes nos demais pavimentos que ainda nem

estão construídos. Na análise do pórtico completo, este carregamento influenciaria todos os elementos, provocando esforços em peças inexistentes quando da aplicação da carga.

Prosseguindo com o mesmo raciocínio, os recalques diferenciais obtidos com a análise de apenas o primeiro pavimento da estrutura são maiores que aqueles calculados com a aplicação das cargas deste pavimento à sua respectiva posição no pórtico completo. A razão desta afirmação reside na rigidez da estrutura, que aumenta de acordo com o progresso da construção, atingindo seu máximo quando o edifício está completamente erguido. Quanto maior a rigidez da estrutura, menores são os recalques diferenciais, conforme investigações realizadas por MEYERHOF (1953) e LOPES & GUSMÃO (1991).

Dentre as maneiras de simulação do efeito incremental da construção foi escolhido o processo seqüencial direto. Este processo segue a ordem direta da construção e simula cada etapa, sendo o pórtico inicialmente composto somente das barras que formam o primeiro pavimento e o carregamento aplicado refere-se apenas a este pavimento. Na segunda etapa, adicionam-se ao pórtico as barras componentes do segundo pavimento, sendo aplicadas somente as cargas relativas a este segundo pavimento. Cada etapa consiste de uma análise numérica do sistema superestrutura-subestrutura-macício de solos correspondente. Prossegue-se dessa maneira até que edifício atinja seu topo, conforme visualizado na Figura 3.

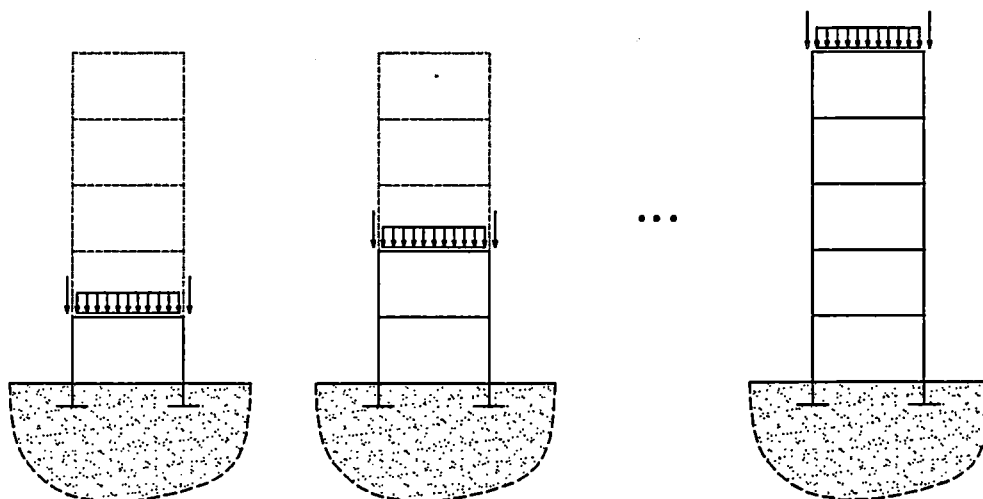


Figura 3 Processo seqüencial direto da análise incremental interativa.

Como todas as análises realizadas são elásticas e lineares, os esforços finais de cada elemento são determinados com a simples soma dos seus esforços respectivos calculados em todas as etapas. Os recalques finais da fundação e os deslocamentos verticais de todos os

nós do pórtico são obtidos da mesma forma. Assim, considera-se que cada pavimento é construído nivelado e na sua posição original prevista, sem adição dos recalques anteriormente ocorridos.

As ações verticais aplicadas são as mesmas da análise não incremental. Mantiveram-se as sobrecargas adicionadas ao peso próprio por serem estes os dados disponíveis. Além disso, as sobrecargas representam apenas uma pequena parcela da carga total, podendo inclusive ser considerado que parte da sobrecarga de utilização é equivalente ao carregamento imposto na fase de construção.

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Com a consideração de que os pavimentos são construídos nivelados e sem sofrer influência dos recalques ocorridos nos andares abaixo, presume-se que os deslocamentos nodais na direção vertical para os pavimentos superiores do pórtico são menores. Isso é decorrente de menores deformações axiais dos pilares, já que a carga aplicada aos andares imediatamente inferiores a cada pavimento não o afeta.

Para proporcionar um melhor entendimento do efeito construtivo na deformação axial dos pilares, observe-se inicialmente as curvas referentes à *análise incremental sem interação* solo-estrutura inseridas nos gráficos de deslocamentos nodais da Figura 4. Percebe-se que elas se distanciam continuamente das curvas correspondentes à *análise sem interação* até atingirem diferenças máximas no topo do edifício. Neste último pavimento, os deslocamentos verticais dos nós equivalem às deformações axiais dos pilares devidos ao carregamento do último pavimento apenas. Para a *análise sem interação* estes deslocamentos são a soma de todas as deformações axiais dos pilares ao longo da altura da edificação.

Ao ser adicionada a interação com o solo na análise incremental, o deslocamento vertical de cada nó aumenta de um valor correspondente ao recalque da base do pilar ao qual pertence, provocado pelo carregamento do seu pavimento e dos pavimentos superiores. Daí o formato da curva relativa à *análise incremental com interação*.

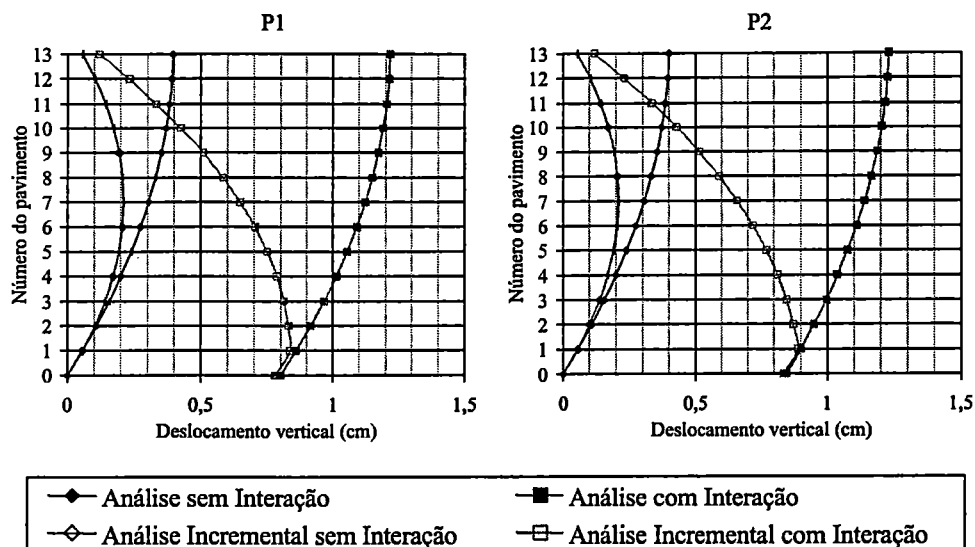


Figura 4 Deslocamentos verticais dos nós dos pilares P1 e P2.

Pode-se ver nos gráficos que os recalques das fundações dos pilares são próximos daqueles determinados a partir da *análise com interação*. Fazendo a comparação dos resultados obtidos utilizando a *análise incremental com interação* com os da *análise com interação*, verifica-se que os recalques diferenciais realmente aumentaram conforme esperado. De modo geral, os maiores recalques de cada conjunto de elementos próximos na fundação aumentaram entre 0,47% e 3,08%, enquanto que os menores diminuíram de -1,17% a -3,59%. Essa ocorrência é decorrente do fato da rigidez média da estrutura ser menor que aquela do pórtico completo.

Embora hajam ocorrido mudanças nos valores de reações dos pilares, elas não foram significativas, tanto em relação à análise com, quanto sem interação. Verificou-se ainda que as reações nas bases dos pilares calculadas com as análises incrementais estiveram em maior conformidade com os valores utilizados no dimensionamento da fundação. Os resultados podem ser observados na Tabela 1.

O pórtico aqui analisado está sujeito apenas a ações verticais aplicadas nos nós. Portanto os esforços nos elementos, sobretudo momentos fletores nos pilares e vigas e esforços cortantes em vigas, são função basicamente dos deslocamentos verticais diferenciais entre os nós de cada pavimento, responsáveis pelas deformações dos elementos estruturais.

Tabela 1 Reação vertical nas bases dos pilares (kN)

	DIMENSIO- NAMENTO	ANÁLISE SEM INTERAÇÃO	ANÁLISE COM INTERAÇÃO	ANÁLISE INCREMENTAL SEM INTERAÇÃO	ANÁLISE INCREMENTAL COM INTERAÇÃO
P 1	1031,72	1055,56	1134,04	1039,86	1103,63
P 2	1216,64	1399,89	1334,16	1355,74	1318,46
P 5	1926,98	1739,31	1755,01	1789,34	1781,50
P 7	1851,74	1770,71	1772,67	1799,15	1797,19
P 9	2392,46	2362,25	2342,63	2375,00	2360,29
P 11	2338,90	2343,61	2323,01	2345,57	2333,80
P 13	3723,88	3723,88	3723,88	3723,88	3723,88
P 15	1261,27	1261,57	1261,57	1261,57	1261,57
P 17	2892,38	2891,99	2891,99	2891,99	2891,99
P 19	1476,80	1623,56	1652,00	1568,62	1592,16
P 21	3115,56	2908,67	2856,67	2989,11	2944,96
P 23	3558,09	3442,33	3360,91	3481,57	3416,82
P 24	1770,12	1915,89	1951,21	1859,00	1888,43
P 26	2318,50	2376,96	2417,18	2356,36	2388,74

Segundo KRIPKA & SORIANO (1992), os deslocamentos diferenciais dos nós de um pórtico sobre base rígida calculados sem a consideração da seqüência construtiva aumentam com a altura. Em contrapartida, ao ser feita tal consideração, verifica-se serem maiores os deslocamentos diferenciais à meia altura do edifício, os quais, no topo da edificação, equivalem a somente a deformação de um pavimento.

Verificou-se que isso realmente aconteceu no edifício em questão, como pode ser visto, por exemplo, no gráfico da Figura 5. Na mesma figura estão presentes também as curvas correspondentes às análises com interação solo-estrutura. As modificações que ocorrem são consequência dos recalques diferenciais.

O fato de, na análise não-incremental e sem interação, os deslocamentos diferenciais aumentarem com a altura sugere que os esforços nos elementos sigam o mesmo comportamento. Realmente, isso foi verificado na maioria das peças, mas não pode ser aceito como regra, pois num pórtico tridimensional um elemento recebe influência de vários outros.

Entretanto, observou-se que a consideração do efeito incremental da construção teve uma influência importante e característica em todos os esforços analisados. Os valores sempre se aproximaram de zero nos pavimentos superiores, inclusive sem apresentar perturbações no topo.

Verificaram-se diferenças consideráveis, sobretudo nos pavimentos superiores. No topo do edifício foram verificadas diferenças percentuais da ordem de $\pm 85\%$ na maioria

Em vigas, os momentos fletores e os esforços cortantes calculados com a *análise incremental sem interação* foram geralmente menores que aqueles resultantes da *análise sem interação*. Apenas nos pavimentos inferiores houve um pequeno aumento. Como exemplo, os gráficos de uma viga encontram-se na Figura 7.

Ao ser introduzida a interação com o solo, no entanto, os resultados da análise incremental nos pavimentos inferiores diferiram bastante dos demais em alguns casos. Esta análise chegou a apresentar os maiores esforços nos primeiros pavimentos da edificação. No topo, continuou a ser verificada a tendência de ocorrerem esforços mínimos.

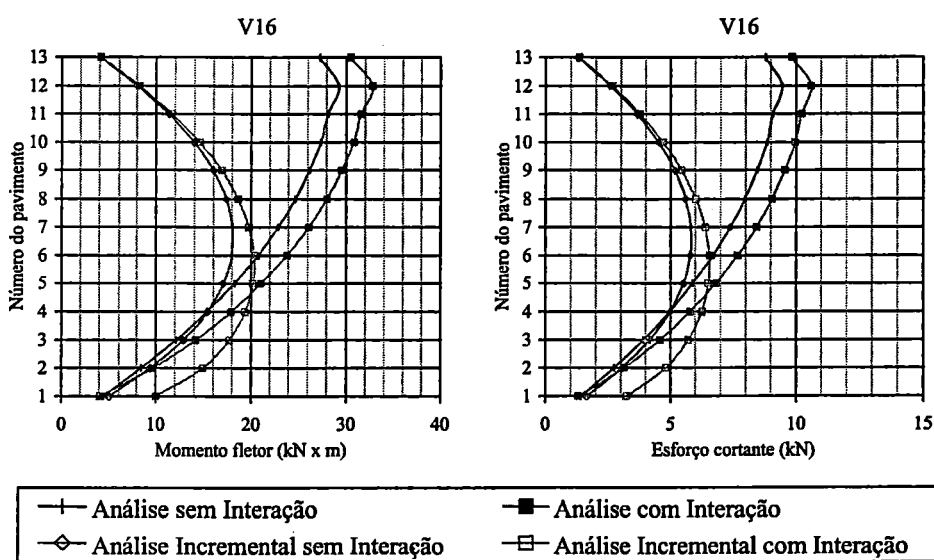


Figura 7 Momentos fletores e esforços cortantes na viga V16.

CONCLUSÃO

Respeitando a seqüência construtiva, os deslocamentos verticais dos nós de um pavimento não são afetados pelo carregamento dos pavimentos abaixo. Portanto, os deslocamentos diferenciais entre os nós de um mesmo pavimento diminuem nos andares superiores, sendo máximos à meia altura do edifício. No topo, correspondem à deformação somente do último pavimento. As deformações axiais dos pilares seguem o mesmo raciocínio.

Sem a consideração da interação com o solo, no topo da edificação os deslocamentos verticais nodais correspondem às deformações axiais dos pilares para o carregamento desse último pavimento. Quando inserida a interação solo-estrutura, o deslocamento de um nó é acrescido do valor do recalque na fundação do pilar ao qual

pertence, provocado pelo carregamento do seu pavimento e dos pavimentos superiores. Esses comportamentos descritos foram observados no exemplo analisado.

Na base da edificação, os recalques diferenciais foram maiores que aqueles estimados na análise não-incremental, embora a diferença tenha sido pequena. Esse efeito já era esperado, pois decorre do fato da rigidez média da estrutura ser menor que a do pórtico completo.

As mudanças das reações verticais nas bases dos pilares não foram significativas. Além disso, verificou-se que nas análises incrementais os valores estiveram em maior conformidade com aqueles utilizados no dimensionamento da fundação.

Todos os esforços analisados diminuíram nos pavimentos superiores, aproximando-se de zero no último, e não apresentaram perturbações no topo. Com relação aos momentos fletores nos pilares, percebeu-se a ocorrência de alterações consideráveis, sobretudo nos pavimentos superiores. No que diz respeito aos esforços em vigas, os valores determinados para os pavimentos inferiores com a *análise incremental com interação* diferiram significativamente dos calculados nas outras análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- HOLANDA JR., O. G. (1998). *Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas*. São Carlos. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HOLANDA JR., O. G. et al. (1999a). Influência da interação solo-estrutura em edifícios de concreto armado sobre fundações diretas submetidos a ações verticais [CD-ROM]. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., Salvador, 1999. São Paulo, IBRACON. 9p.
- HOLANDA JR., O. G. et al. (1999b). Soil-structure interaction with the consideration of a rigid layer in the soil [CD-ROM]. In: PIMENTA, P. M. et al., eds. *Computational methods in engineering'99* (Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 20., São Paulo, 1999). São Paulo, EPUSP. 10p.

- KRIPKA, M.; SORIANO, H. L. (1992). Sistema para análise incremental construtiva de edificações. In: CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A ENGENHARIA, 13., Porto Alegre, 1992. *Anais*. Porto Alegre, UFRGS, v. 1, p. 381-90.
- LOPES, F. R.; GUSMÃO, A. D. (1991). On the influence of soil-structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., Firenze, 1991. *Proceedings*. Rotterdam, A. A. Balkema. v. 2, p. 505-9.
- MEYERHOF, G. G. (1953). Some recent foundation research and its application to design. *The Structural Engineer*, v. 31, p. 151-67.
- RAMALHO, M. A. (1990). *Sistema para análise de estruturas considerando interação com meio elástico*. São Carlos. 389 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.