

Monitoring of high-rise buildings' reinforced concrete columns

Monitoramento de pilares em edifícios altos de concreto armado



K. A. R. NAHUM ^a
kellyanahum@gmail.com

D. R. C. OLIVEIRA ^b
denio@ufpa.br

Abstract

The structural behavior simulated by computer programs can be very different from reality, once the adapted loading distribution (regular) is far from the real one, and this disparity becomes more significant in high buildings because of vertical and horizontal actions which contribute to the global effects of second order for columns, making accuracy in the calculation of great importance for the stability of the overall structure. In this work are presented loads for a high building simulated using the commercial software CAD/TQS and the loads from the monitoring of 7 columns that received 3 extra bars along their height in two levels before concreting. In the steel bars were set electric strain gages to measure the strains. The data acquisition was performed through 1 module "Spider" that gets and stores the readings. The measurements were executed in periods previously chosen until the end of the structure building, including upper reservoir. The computation loads for the columns were satisfactory when compared to the loads from the strains and characteristic mechanical properties of the materials.

Keywords: reinforced concrete, columns, stability, buildings.

Resumo

O comportamento estrutural simulado por programas computacionais pode ser bem diferente da realidade, uma vez que as cargas idealizadas no cálculo não representam fielmente a verdadeira distribuição do carregamento. Essa disparidade torna-se mais significativa em edificações altas, devido às ações verticais e horizontais que contribuem aos efeitos de segunda ordem nos pilares e tornam a precisão no cálculo de grande relevância para a estabilidade global da estrutura. Neste trabalho são comparadas as cargas nos pilares, calculadas com o software comercial CAD/TQS com as cargas observadas pelo monitoramento de 7 pilares selecionados, que receberam 3 barras extras ao longo de sua altura em dois níveis antes da concretagem. Nessas barras foram fixados extensômetros elétricos para medir as deformações ao longo do tempo. A aquisição de dados foi realizada através de um módulo "Spider" que realiza e armazena as leituras. As medições foram executadas em períodos pré-fixados até a conclusão da estrutura, incluída a caixa d'água. As cargas simuladas para os pilares, nesta etapa de carregamento, mostraram-se coerentes com os resultados obtidos pela análise das deformações medidas e dos resultados de ensaios dos materiais empregados na estrutura.

Palavras-chave: concreto armado, pilares, estabilidade, edifícios.

^a Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Federal University of Pará, Master Course Student, kellyanahum@gmail.com, Dr, Armando Morelli St, 400, Pratinha, Belém, Pará, Brazil;

^b Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Federal University of Pará, Lecturer, denio@ufpa.br, Augusto Corrêa St, 01, Civil Engineering Laboratory, Room 24, Guamã, Belém, Pará, Brazil.

1. Introdução

Devido à escassez e ao custo elevado do espaço nos centros das grandes cidades, a execução de edifícios cada vez mais altos tem sido a principal solução encontrada pelas construtoras. No cálculo estrutural o modelo considerado é, em geral, uma estrutura indeslocável e com carregamentos regularmente distribuídos. Essa situação nem sempre é realista, pois recalques diferenciais nas fundações e fissuras na estrutura podem mudar a configuração adotada inicialmente no cálculo, tanto para a geometria quanto

para as reações nos pilares. Vibrações de máquinas e equipamentos também são fatores que potencializam novas configurações para os esforços nas estruturas. Efeitos inesperados ou difíceis de simular são ainda mais significativos em estruturas altas, devido ao efeito da escala e à grande intensidade dos carregamentos, o que torna o monitoramento estrutural uma importante ferramenta para o entendimento do real comportamento estrutural e para a garantia da qualidade. Pontes e viadutos há muito vêm sendo monitorados nos Estados Unidos, Inglaterra e Japão, e os benefícios deste monitoramento são claros e podem ser aplicados aos edifícios altos, principalmente na correção de imperfeições geométricas em estágios iniciais da construção e no controle de recalques diferenciais e vibrações. Esta verificação é ainda mais relevante quando se considera que a avaliação do carregamento nos pilares de uma edificação é baseada em diversas hipóteses de dimensionamento, mas de difícil verificação e amplamente reconhecidas como de elevado grau de imprecisão.

Este trabalho é pioneiro na Região Norte do Brasil e consiste no monitoramento de 7 pilares de um edifício residencial com 41 pavimentos, localizado em um bairro nobre da cidade de Belém, cujo principal objetivo é comparar os esforços nos pilares estimados a partir da análise experimental com os resultados fornecidos pelo programa computacional CAD/TQS, o qual segue as recomenda-

Figura 1 – Vistas do prédio modelado no programa CAD/TQS

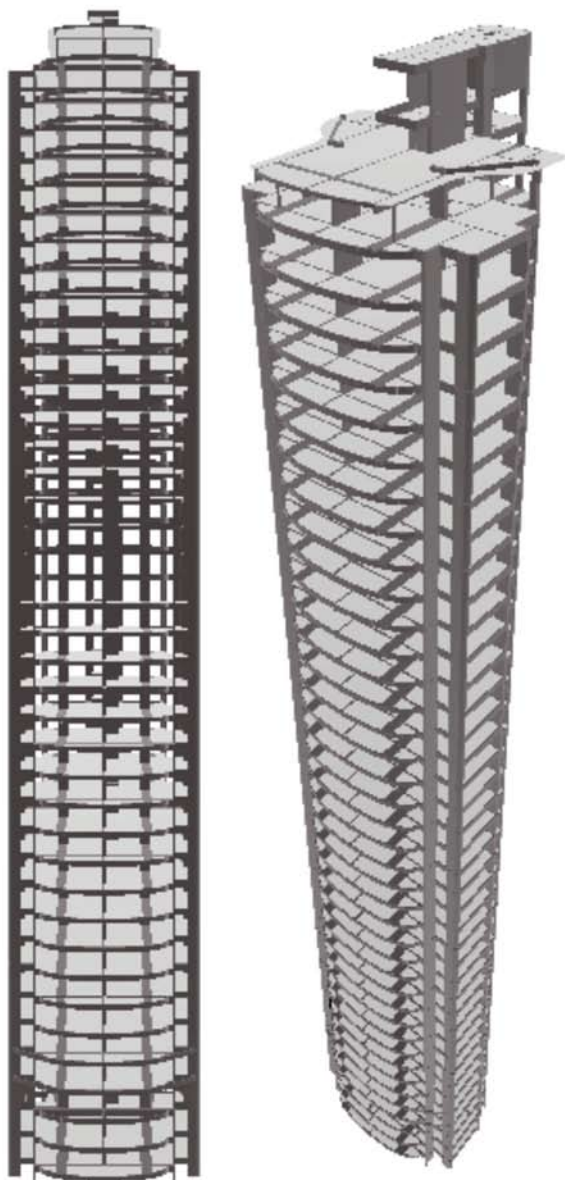
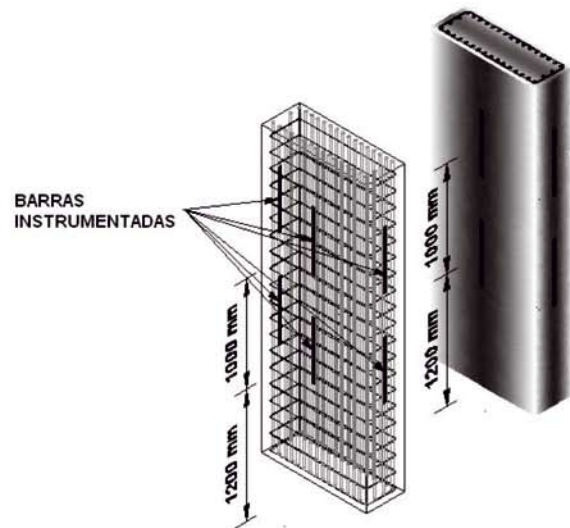


Figura 2 – Edifício monitorado (torre da esquerda)



Figura 3 – Posição das barras instrumentadas nos pilares



ções da norma brasileira [1] e considera a interação solo-estrutura, a não linearidade geométrica da estrutura e a não-linearidade física do material. O programa experimental inicial visava complementar uma dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, mas optou-se por estender o prazo de monitoramento para dois anos após a inauguração do edifício, visando o melhor entendimento do comportamento da estrutura em serviço.

2. Análise estrutural

Os cálculos, que eram executados manualmente décadas atrás, hoje são realizados com ferramentas cada vez mais sofisticadas, que visam simular o comportamento estrutural de forma mais realista possível. Para verificar parte desse comportamento estrutural em um prédio alto na cidade de Belém empregou-se o software comercial CAD/TQS V13 para a realização da simulação computacional, respeitando-se os modelos de cálculo adotados pelo projetista, seções transversais dos elementos estruturais, resistências características dos materiais e as prescrições da norma brasileira [1] para projeto de estruturas de concreto armado. De acordo com Ferreira e Oliveira [2], a mudança do processo de cálculo dos pilares é um grande avanço presente nas recomendações normativas, que torna este processo mais rigoroso em relação à durabilidade e gera pilares com quantidade de aço satisfatória e menor que na sua versão anterior. O objetivo da análise numérica é verificar os esforços normais que teoricamente atuam nos pilares e compará-los aos observados no monitoramento do edifício. A Figura 1 mostra as vistas da estrutura modelada em perspectiva, vista frontal e vista superior.

Alguns critérios foram estabelecidos para a modelagem, como a ação do vento (31 m/s), classe de agressividade II (ambiente urbano), diâmetro máximo do agregado graúdo (19 mm) e do vibrador (35 mm). O modelo estrutural utilizado na análise do edifício foi

o de pórtico espacial com nós deslocáveis admitindo-se a não-linearidade da estrutura e dos materiais.

3. Programa experimental

3.1 Características do edifício

O edifício monitorado é atualmente considerado o mais alto na cidade de Belém e o segundo mais alto das regiões Norte e Nordeste. É do tipo residencial e possui 1 andar térreo, 2 níveis de mezanino, 1 nível de área de lazer, 34 pavimentos-tipo, 2 níveis de duplex e 1 ático (máquinas e barrilete), comportando um total de 41 pavimentos. Os pavimentos possuem área de 308 m² com 20 pilares, e as lajes são nervuradas com faixas protendidas, com altura média de 170 mm. Os pavimentos-tipo têm 2.970 mm de pé direito e a altura total do edifício é de 126 metros. Ao lado do edifício monitorado encontra-se outro edifício com as mesmas características estruturais. A Figura 2 mostra os edifícios no estágio final da estrutura e alvenarias externas e internas.

3.2 Instrumentação dos pilares

A técnica empregada no monitoramento dos pilares consistiu basicamente do posicionamento de barras curtas adicionais instrumentadas e inseridas nas armaduras existentes, no pavimento mezanino I. As barras de 600 mm de comprimento e 12,5 mm de diâmetro foram instrumentadas com um extensômetro elétrico de resistência da marca Kyowa (Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd), modelo KFG-5-120-C1-11, e posteriormente posicionadas nas armaduras, antes da concretagem, nas 3 faces dos pilares e em dois níveis, de modo que o primeiro extensômetro ficasse a 1.200 mm da superfície superior da laje inferior e a segunda a

Figura 4 – Planta baixa do pavimento-tipo indicando os pilares monitorados

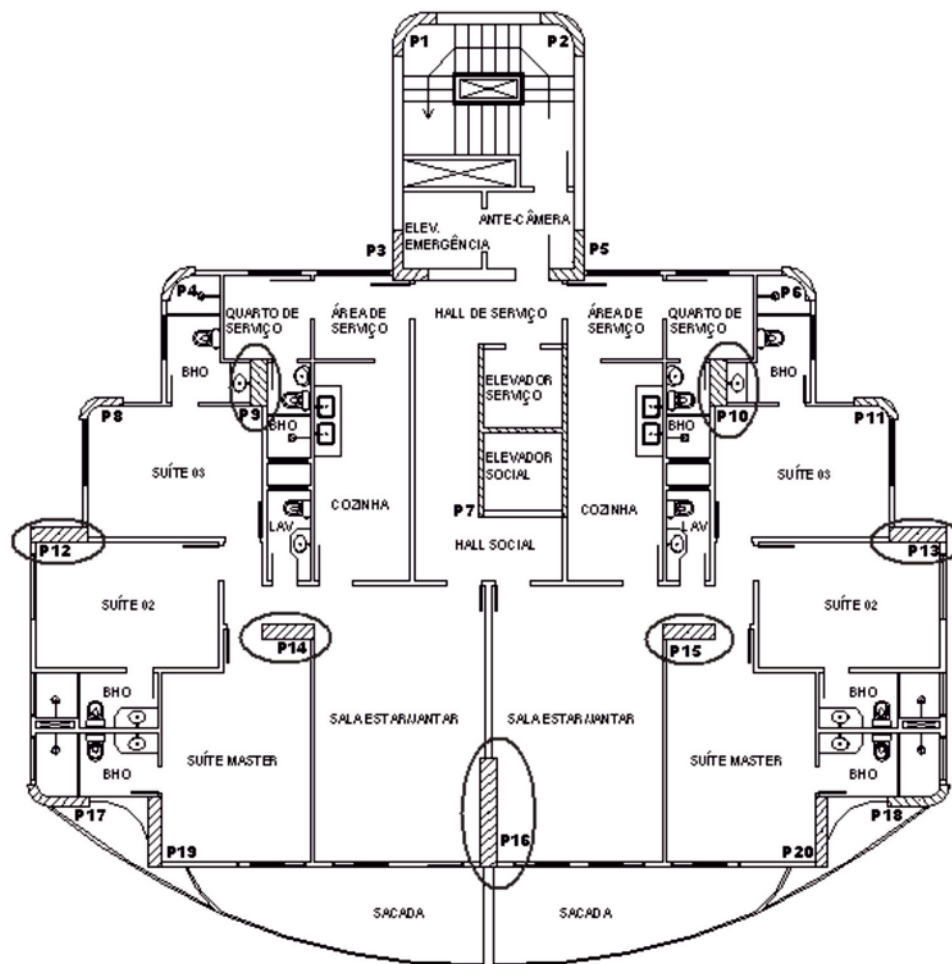


Tabela 1 – Características dos pilares monitorados

Pilar	Seção		A_c (mm ²)	Armadura Longitudinal		A_s (mm ²)
	(mm)	(mm)		(barras)	ϕ (mm)	
P9	400	1.100	440.000	36		17.671
P10	400	1.100	440.000	36		17.671
P12	350	1.300	455.000	18		8.835
P13	350	1.300	455.000	18	25	8.835
P14	350	1.200	420.000	38		18.653
P15	350	1.200	420.000	38		18.653
P16	350	2.500	875.000	60		29.452

2.200 mm, como mostra a Figura 3. Os pilares foram selecionados após a realização da pré-análise estrutural do edifício, verificando-se fatores julgados relevantes como a maior solicitação normal e as geometrias mais simples. Os pilares escolhidos foram: P9, P10, P12, P13, P14, P15 e P16, totalizando 7 pilares. A Figura 4 mostra a localização dos pilares em planta e a Tabela 1 informa suas principais características. Na tabela A_c é a área de concreto da seção transversal dos pilares e A_s é o somatório das seções transversais das barras de aço longitudinais de diâmetro \emptyset .

3.3 Sistema de monitoramento

Para o monitoramento dos pilares foi empregado um módulo do equipamento de medição de marca Spider 8, 600 Hz, com o auxílio de um notebook. A primeira leitura foi a de referência e ocorreu depois da desforma dos pilares, a segunda foi após a concretagem do piso do segundo pavimento-tipo e, a partir desta leitura, a seqüência das medições ocorreu a cada pavimento concretado. A Figura 5 mostra a realização de uma das leituras na obra.

4. Resultados

4.1 Concreto e aço

O concreto e o aço são os materiais cujos comportamentos regem o desempenho estrutural dos elementos em concreto armado. O diagrama tensão-deformação do concreto não é linear, mas apresenta comportamento aproximadamente linear para tensões até 30 % de sua máxima tensão de compressão. Para a obtenção da curva do concreto foram realizados ensaios de acordo a norma brasileira [3], utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões (100 x 200) mm sob compressão axial, que foram moldados na obra durante a concretagem dos pilares do mezanino I. Para a determinação do módulo de elasticidade

do concreto também foram confeccionados 3 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões (100 x 200) mm e instrumentados com extensômetros elétricos (Figura 6) para registro das deformações com maior precisão, de acordo com a norma brasileira [4]. Os resultados obtidos para a resistência média à compressão foi de 34 MPa e o módulo de elasticidade médio foi de 36 GPa. A Figura 6 mostra os corpos-de-prova instrumentados. Na Figura 7 são mostradas as curvas tensão-deformação teórica, (de acordo com a NBR 6118) e experimental para o concreto.

Atualmente, os aços mais empregados na construção civil são os tratados a quente, os quais apresentam maior maleabilidade e ductilidade, diagrama tensão-deformação com patamar de escoamento e resistência a incêndios moderados. Para os ensaios de tração do aço, de acordo com a norma brasileira [5], utilizou-se 3 amostras das barras de aço do mesmo lote daquelas adicionadas aos pilares, com 600 mm de comprimento e 12,5 mm de diâmetro. A Figura 8 mostra um diagrama tensão-deformação com a curva média utilizada para o cálculo das propriedades mecânicas das barras. A tensão e a deformação correspondente ao escoamento foi de 535 MPa e 2,6 % respectivamente, a tensão de ruptura foi de 713 MPa e o módulo de elasticidade obtido foi de 205 GPa.

4.2 Esforços normais nos pilares

Para estimar os esforços normais nos pilares utilizou-se a curva característica do concreto obtida com os ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova e o módulo de elasticidade médio das barras de aço ensaiadas. Em cada nível de pilar monitorado foram considerados os efeitos da flexo-compressão, sendo que os momentos fletores encontrados foram descartados nesta análise, devido à sua baixa intensidade e à não-simultaneidade das leituras nos demais pilares. Entende-se que isto não comprometeu a avaliação dos esforços normais experimentais, vis-

Figura 5 – Sistema de monitoramento utilizado no edifício

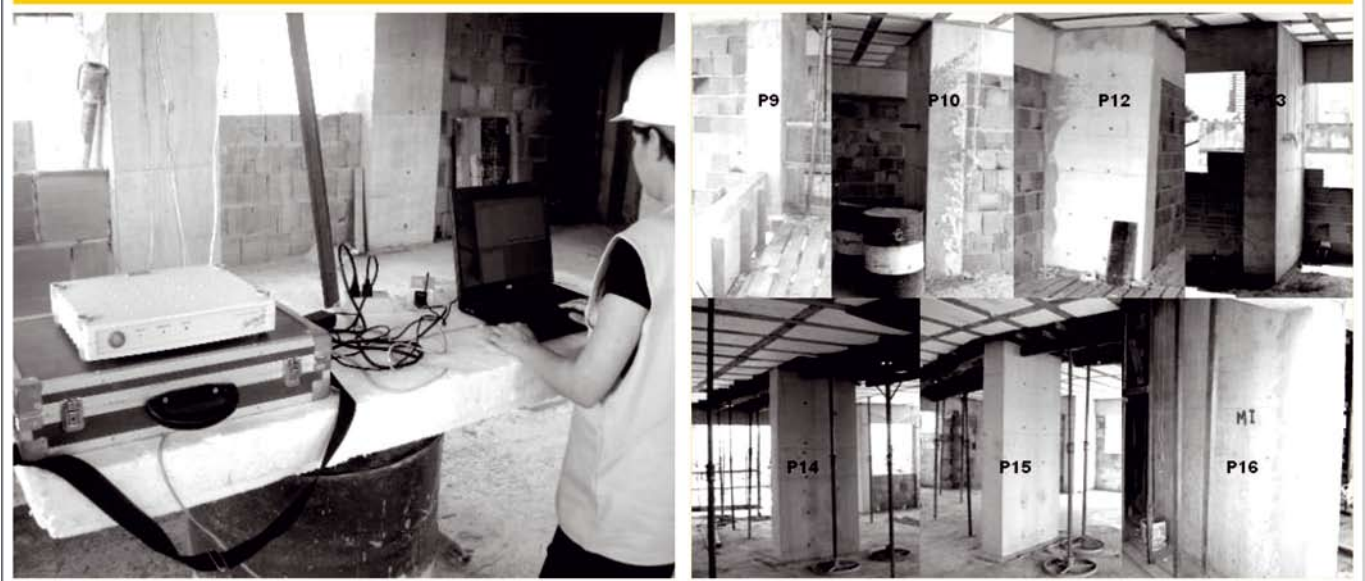
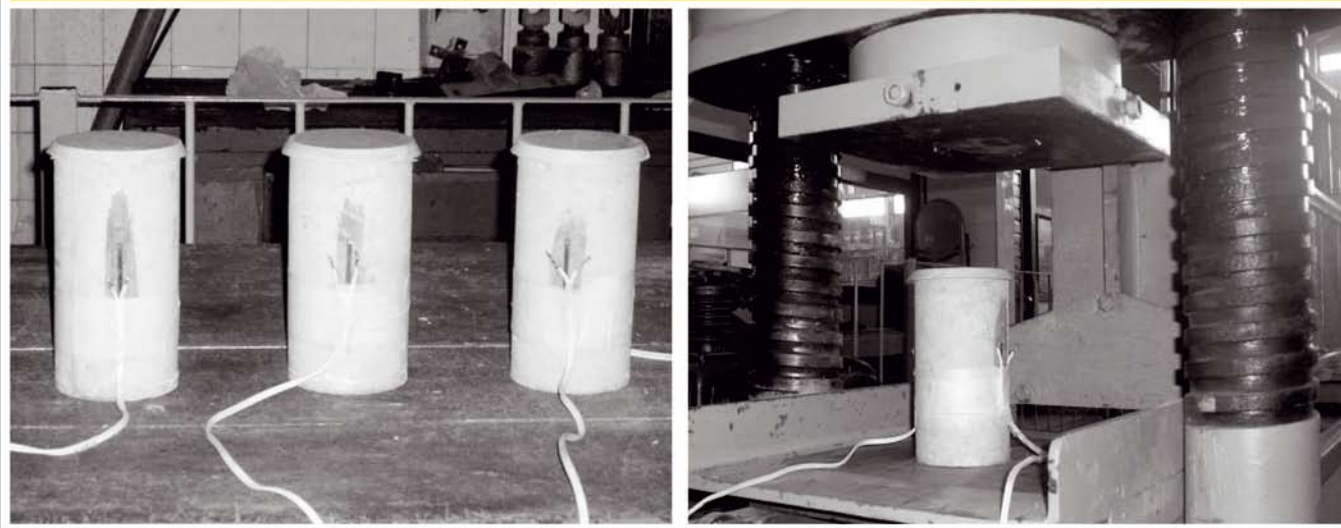


Figura 6 – Corpos-de-prova instrumentados



to que as armaduras não foram tracionadas. O esforço normal solicitante nos pilares foi calculado com a Equação 1.

$$N = (A_c - A_s) \cdot f_c + A_s \cdot f_s \quad (1)$$

onde,

N = força no pilar;
 A_c = área total da seção transversal;
 A_s = soma das áreas das barras da armadura longitudinal;
 f_c = tensão no concreto a partir da curva tensão-deformação;
 f_s = tensão na barra de aço a partir da deformação experimental.
 Todos os carregamentos nos pavimentos foram considerados nos cálculos sem coeficientes de majoração, dentre eles: paredes internas e externas, contrapisos, peso próprio da estrutura (com armaduras) e cargas de vento. A sobrecarga não foi acrescentada

visto que o monitoramento foi realizado sem a ocupação do edifício e sem a utilização do reservatório superior de água. Na Tabela 2 são apresentados os esforços normais obtidos com o monitoramento dos pilares (N_{exp}) e os estimados através da modelagem da estrutura pelo programa CAD/TQS (N_{proj}). Na Figura 9 são mostrados 2 gráficos, o primeiro com as deformações médias utilizadas no cálculo da força nos pilares, observando as deformações limite para compressão (2 ‰) e flexo-compressão (3,5 ‰) e o segundo a relação entre os esforços obtidos experimentalmente e numericamente. A Figura 10 mostra a evolução das deformações nas 3 faces dos níveis inferior e superior dos pilares P9, P12 e P14 com o aumento do número de pavimentos.

5. Conclusões

São apresentados os resultados obtidos experimentalmente com a instrumentação de sete pilares de um edifício de 126 m de altura na cidade de Belém. As curvas obtidas para as deformações apresentaram uma tendência linear com baixo desvio padrão, como esperado. As variações ao longo destas curvas podem ser consequência da ação do vento, da distribuição do carregamento, ainda sendo realizado, de recalques diferenciais ou até mesmo de interferências eletrônicas no sistema de aquisição de dados. A deformação média encontrada nos pilares foi de 0,5 ‰, que corresponde a 25 % da deformação limite de 2 ‰ para compressão e 15 % para a deformação limite de 3,5 ‰ recomendado para flexo-compressão. Os momentos fletores encontrados computacionalmente foram superiores aos calculados com as deformações nos pilares (variação da velocidade do vento, etc.), não sendo considerados significativos para a análise dos resultados apresentados. Os valores estimados pelo programa CAD/TQS para os esforços normais nos pilares P10 e P16 foram superiores em 14 % e 7 %, respectivamente, aos valores encontrados experimentalmente. Para os demais pilares, as estimativas foram inferiores em até 5 %, caso do pilar P13. Considerando que a edificação encontrava-se em fase de carregamento, estes valores não são definitivos, podendo variar para mais ou para menos dependendo, principalmente, da distribuição das sobrecargas, dos revestimentos interno e externo e do comportamento das fundações. O monitoramento será realizado durante dois anos após a inauguração do edifício, visando o melhor entendimento da resposta estrutural em serviço,

Figura 7 – Curva tensão-deformação teórica e experimental para o concreto

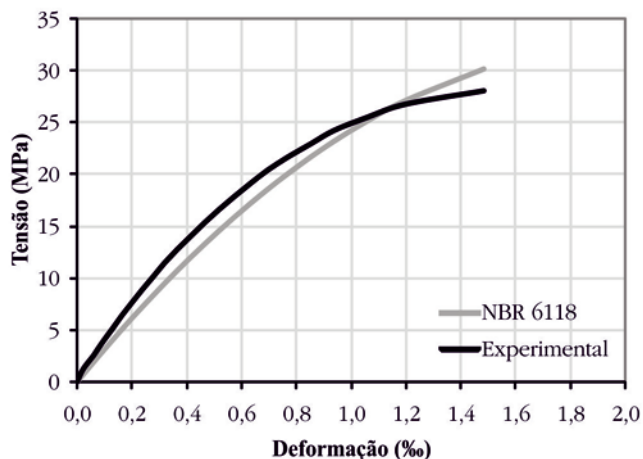
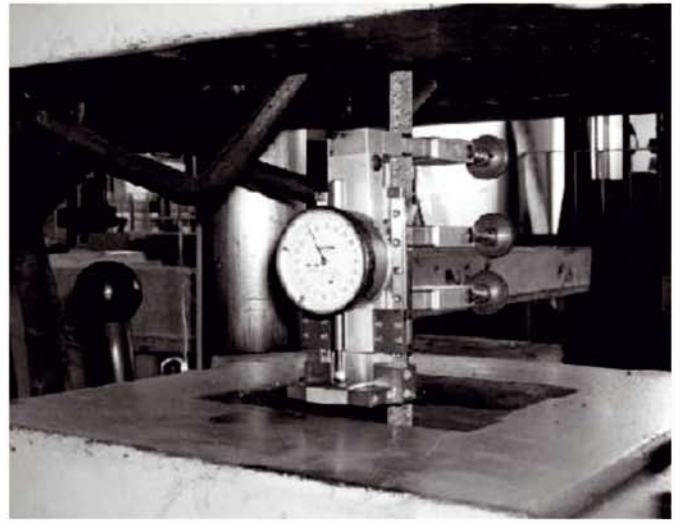
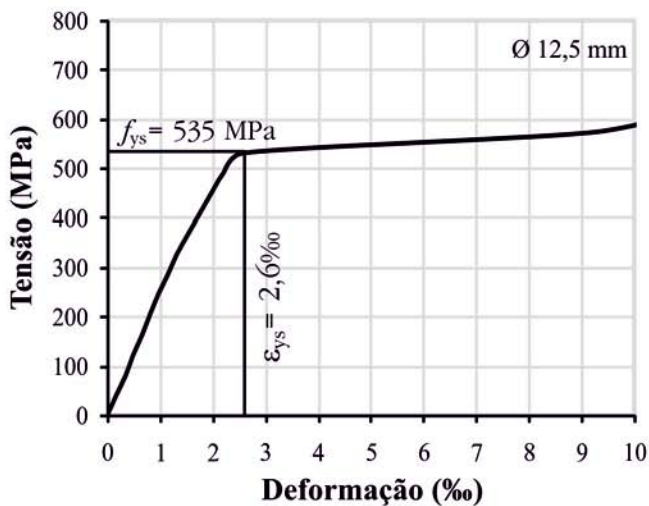


Figura 8 – Diagrama tensão-deformação para o aço a partir do ensaio de tração em laboratório



observando-se, dentre outros fatores, a configuração e a intensidade dos carregamentos e possíveis efeitos da fluência no comportamento dos pilares.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES e FAPESPA pelo apoio financeiro a esta e outras pesquisas desta natureza realizadas na Região Norte do Brasil.

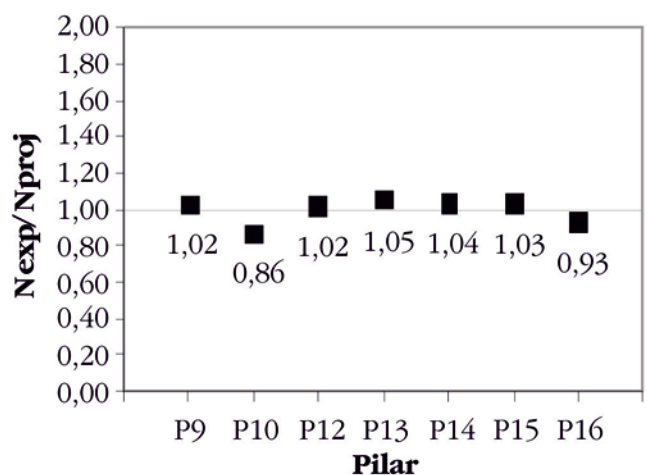
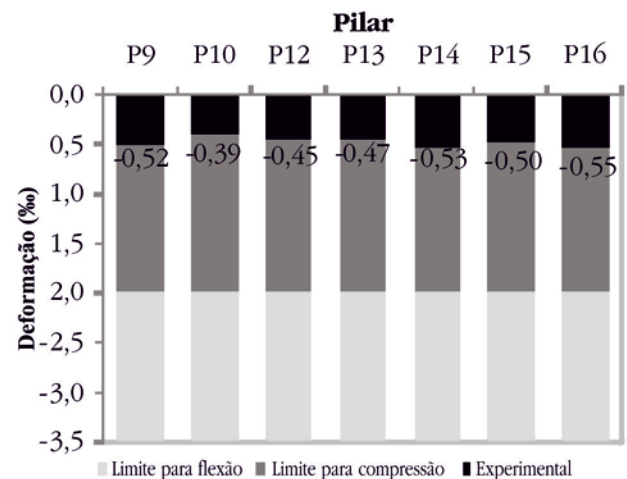
7. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2003.
- [02] FERREIRA, M. P. e OLIVEIRA, D. R. C.. Análise Quantitativa dos dimensionamentos de um Edifício Residencial de Concreto Armado de Acordo as Recomendações Normativas da NBR 6118:1978 e da NBR 6118:2003. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Recife, 2005.

Tabela 2 – Esforços normais nos pilares

Pilar	Nproj (kN)	Nexp (kN)	Nexp/Nproj
P9	8.691	8.886	1,02
P10	8.169	7.059	0,86
P12	7.266	7.425	1,02
P13	7.263	7.634	1,05
P14	8.485	8.799	1,04
P15	8.099	8.375	1,03
P16	19.210	17.858	0,93

Figura 9 – Deformações médias e comparação dos esforços obtidos nos pilares monitorados



- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. NBR 5739, Rio de Janeiro, 1994.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de

- deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de Ensaio. NBR 8522, Rio de Janeiro, 1984.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais Metálicos - Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração - Métodos de Ensaio. NBR 6152, Rio de Janeiro, 1992.

Figura 10 – Deformações medidas nas armaduras dos pilares P9, P12 e P14

