

# REFORÇO DE LAJE DE COBERTURA CIRCULAR EM CONCRETO ARMADO EM EDIFÍCIO INDUSTRIAL<sup>1</sup>

Petr Stepánek<sup>2</sup>, Bohuslav Zmek<sup>3</sup>, Jaroslav Vácha<sup>4</sup>, Leonard Hobst<sup>5</sup>

**RESUMO:** Este trabalho descreve o reforço efetuado em uma construção de concreto armado na República Tcheca. Uma laje de cobertura circular de concreto armado de grande vão e pequena espessura demonstrou deflexão de aproximadamente 200 mm após a retirada das fôrmas. A desforma foi interrompida e a estrutura precisou ser reforçada. O reforço foi projetado como uma treliça espacial de concreto armado, de acordo com estudos numéricos efetuados. O processo de reparação proposto em projeto teve de ser modificado ao longo de sua execução. Todo o processo foi verificado por medições in situ. O processo projetado foi baseado em um modelo fisicamente não-linear do comportamento da estrutura e foi modificado em virtude do seu comportamento real. A estrutura da treliça de concreto armado foi ainda utilizada para sustentar o carregamento oriundo do madeiramento do telhado.

## INTRODUÇÃO

Ao se reforçar uma estrutura de concreto armado é conveniente aplicar-se a pós-tensão, que modifica substancialmente o esquema estático original da estrutura. O método de reforço deve ser intimamente relacionado com a forma, a função e a capacidade de carga da estrutura. Além dos métodos tradicionais de utilização de barras ou de cabos de aço, é também possível utilizar-se modernas fibras não metálicas.

Ao se construir uma nova fábrica para processamento de comida na República Tcheca foi projetada uma estrutura cilíndrica monolítica com base circular à qual um prédio retangular que abriga os setores tecnológico e de comunicações foi conectado. O diâmetro interno do setor circular é de 32,4m, a espessura das paredes de concreto armado é de 0,4m e a espessura da laje de cobertura de 0,5m, sendo de 15,0m a altura total da estrutura. No interior do espaço circular não poderiam haver colunas, já que o esquema de produção não poderia sofrer restrições.

Durante a retirada das fôrmas e do escoramento da estrutura da cobertura do prédio circular notou-se que a laje de concreto armado estava separada de seus apoios. Notou-se também uma deflexão na laje de cerca de 200mm. Com isto, no dia seguinte o escoramento foi reintroduzido, de forma a evitar a ruína da estrutura.

Em virtude destes fatos, peritos foram convocados para examinar a estrutura que concluíram que a principal razão para o surgimento do problema foi a baixa rigidez à flexão da laje. Tanto os peritos convocados pelo construtor como peritos independentes contratados pelo proprietário da fábrica sugeriram inicialmente a demolição da estrutura e a construção de uma nova. Após novas análises, entretanto, optou-se pelo reforço da estrutura.

## DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura de concreto armado é a mostrada esquematicamente na Figura 1. Três colunas delgadas foram posicionadas entre as aberturas situadas abaixo do teto no trecho da parede perimetral de concreto. A laje circular foi ligada à laje do piso do edifício retangular adjacente nestes pontos.

A laje deveria ser carregada com o seu peso próprio, acrescido do peso do isolamento térmico (150mm de espessura). Sobre este isolamento térmico deveria ser efetuada a impermeabilização da laje. A carga climática prevista era apenas de neve (carregamento uniformemente distribuído de 1,1 kN/m<sup>2</sup>). A carga de utilização considerada foi de 1,4 kN/m<sup>2</sup>.

A estrutura foi projetada de acordo com a Norma Tcheca CSB 731201, "Projeto de estruturas de concreto" e o concreto utilizado foi o de classe B ( $f_{ck}$  de 17 MPa e módulo de elasticidade de 32.5 MPa), e o aço foi o 10425 ( $\Phi$

<sup>1</sup> Tradução para o português: Vicente Custódio Moreira de Souza

<sup>2</sup> PhD, Engenheiro Civil, Professor Associado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Brno, Údolní 53, 602 00, Brno, República Tcheca, e-mail [stepanek.p@fce.vutbr.cz](mailto:stepanek.p@fce.vutbr.cz)

<sup>3</sup> PhD, Engenheiro Civil, Professor Associado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Brno, Údolní 53, 602 00, Brno, República Tcheca, e-mail [zmek.b@fce.vutbr.cz](mailto:zmek.b@fce.vutbr.cz)

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, Stavoconsult Brno, Podlesí 35, 602 00, Brno, República Tcheca

<sup>5</sup> PhD, Engenheiro Civil, Professor Associado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Brno, Údolní 53, Brno, República Tcheca, e-mail [hobst.l@fce.vutbr.cz](mailto:hobst.l@fce.vutbr.cz)

V, tensão de ruptura de 375 MPa). A armadura no teto na face inferior da laje era de  $\Phi$  V25 a cada 100mm no interior de um anel com largura de 4,3m na proximidade da parede, como mostrado na Figura 2.

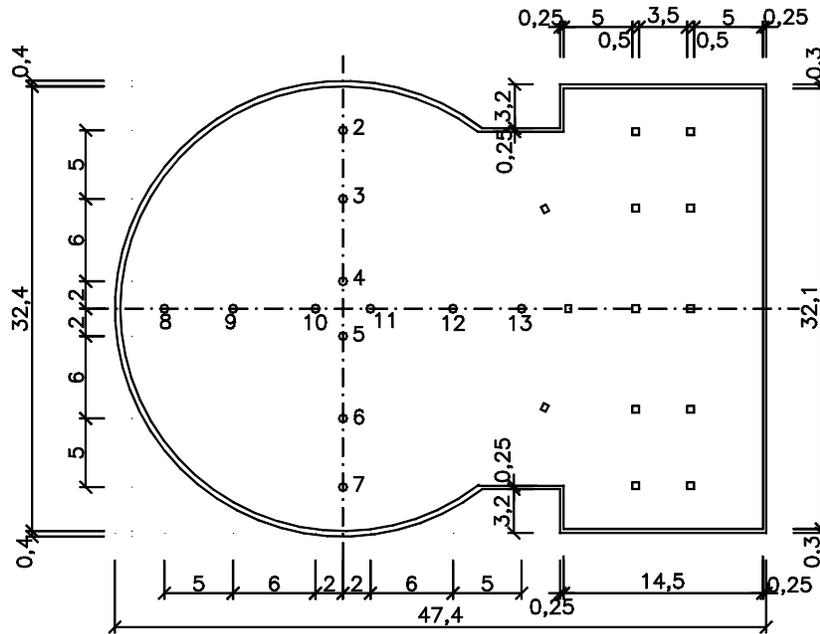


Figura 1: Esquema geral da estrutura e posicionamento dos pontos de medição das deflexões.

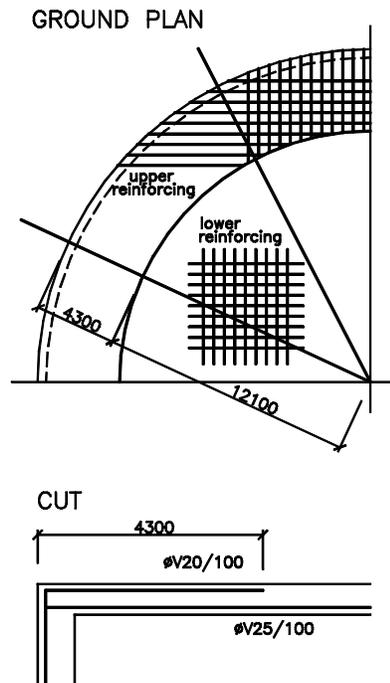


Figura 2: Esquema da armação da laje.

A armadura  $\Phi$  V20/100mm partiu da parede e entrou na laje numa extensão de 2,7m. A parede foi armada com barras verticais  $\Phi$  V10 a cada 150mm em ambas as faces (cobrimento de 55mm) e com barras horizontais  $\Phi$  V10/100mm em ambas as faces com cobrimento de 35mm. As regiões próximas das aberturas receberam uma intensidade maior de armadura.

A retirada das fôrmas e escoramentos foi feita dos bordos para o centro da laje. As fôrmas foram retiradas com a idade de 7 dias, mas a estrutura foi mantida escorada até a idade de 15 dias, e, após o concreto atingir 70% da resistência de projeto, o escoramento central foi afrouxado em cerca de 220mm. No dia seguinte a laje estava de

novo apoiada no escoramento que havia sido afrouxado e o trabalho foi interrompido. O procedimento de concretagem e desforma da laje está mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1: Programa de concretagem da laje.**

Data	Atividade	Notas
27/05/1996	Concretagem da laje, com duas bombas, duração de 12 horas	
2-9/06/1996	Desforma progressiva da laje nos bordos, de 0,5 a 6,0m, e reconstituição do escoramento	
07/06/1996	Medida da resistência do concreto com uso do esclerômetro	Resistência do concreto: 23,1; 21,8; 24,8 e 24,9 MPa
10/06/1996	Afrouxamento do escoramento e medidas de resistência do concreto com esclerômetro	Resistência do concreto: 25,3; 27,1 e 27,3 MPa
11/06/1996	Assentamento da laje nas escoras durante a noite	
12/06/1996	Medição das deformações na laje	
26/06/1996	Ensaio em corpos de prova de concreto moldados em maio de 1996	Concreto de acordo com o adotado no projeto.

Os resultados das medidas de deflexão na laje estão na Tabela 2, e o esquema dos pontos de medição pode ser visto na Figura 1. A deflexão máxima medida (ponto 10) era de 208mm.

**Tabela 2: Deflexões ( $\delta$ ) na laje deformada.**

Ponto	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\delta$ (mm)	10	178,4	202,6	205,3	165,6	42	55,1	179,3	208	194,2	117,5	0

### O ESTADO DA ESTRUTURA ANTES DO REFORÇO

Os seguintes problemas foram encontrados na estrutura durante a inspeção:

- deformação excessiva da laje;
- fissura horizontal no encontro laje-parede;
- fissuras no encontro com os pilares na área de transição (ver Figura 3);
- fissuras horizontais na parede cilíndrica.



**Figura 3.**

## VERIFICAÇÃO ANALÍTICA DA ESTRUTURA

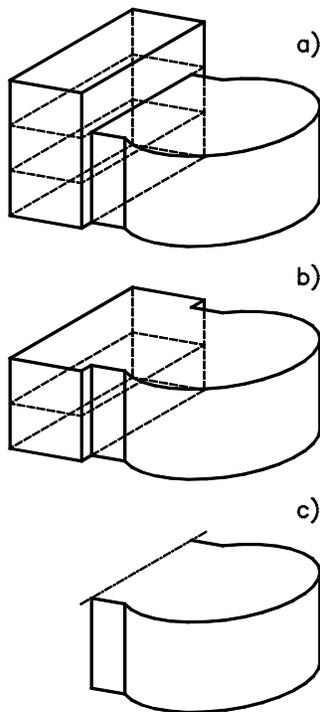
Devido à considerável extensão da estrutura, o cálculo estático no regime elástico foi efetuado dentro das seguintes alternativas:

- Solução considerando-se a estrutura como um todo (alternativa 1) - todos os elementos da estrutura são considerados, incluindo laje, paredes, colunas, escadas, zonas de ventilação e casa de máquinas.
- Solução de parte da estrutura (alternativa 2) - A estrutura da parte cilíndrica básica (paredes e colunas que sustentam a laje) é formada pela parede vertical de altura 3,45m e espessura de 0,25m que se une à laje da parte central da estrutura.
- Solução da parte básica da estrutura (alternativa 3) - Apenas a parte básica da estrutura foi considerada, i.e., ao contrário da alternativa 2, as paredes de concreto armado não foram consideradas.

A Figura 4 mostra um esquema de todos os elementos estruturais envolvidos em cada uma das alternativas.

Todas as alternativas consideraram o material e as características geométricas de projeto. O objetivo dos cálculos era o de determinar possíveis erros relativamente a diferentes modelos matemáticos, Assim, chegou-se às seguintes conclusões:

- a diferença entre as alternativas 1 e 2 foram desprezíveis:
  - a deflexão máxima da laje calculada pela alternativa 2 era de 1,026 vezes a flecha máxima calculada pela alternativa 1;
  - os momentos fletores nas direções x e y calculados pela alternativa 2 eram 0,95 a 1,05 vezes os momentos calculados pela alternativa 1;
- a diferença entre os resultados dos cálculos considerando as alternativas 1 e 3, embora mais significativas, também podem ser desprezadas. São elas:
  - a deflexão máxima da laje calculada pela alternativa 3 era de 1,067 vezes a flecha máxima calculada pela alternativa 1;
  - os momentos fletores nas direções x e y calculados pela alternativa 3 eram 0,9 a 1,05 vezes os momentos calculados pela alternativa 1.



**Figura 4: Esquema das Alternativas de projeto:**

- Solução da estrutura integrada;
- Parte da estrutura - modelo detalhado
- Modelo simplificado.

A precisão das deformações e dos esforços internos calculados pelos métodos descritos acima é aproximadamente a mesma.

Para avaliação do estado da estrutura antes do reforço, foram executados os seguintes cálculos:

- a) cálculos no estado elástico linear, utilizando-se as características mecânicas de projeto do concreto;
- b) cálculo linear iterativo, considerando-se a mudança progressiva de rigidez causada pelo surgimento e desenvolvimento das fissuras. Com respeito aos momentos fletores  $m_x$  e  $m_y$  nas direções das armações da laje, o cálculo da rigidez à flexão,  $B_r$ , e da rigidez de membrana,  $B_a$ , de uma seção transversal em concreto armado nas direções das coordenadas globais  $x$ ,  $y$ , foi feito baseado na Norma Tcheca. Destas rigidezes foram calculados os elementos das matrizes de constantes físicas para rigidez de flexão e rigidez de membrana. Novos cálculos foram feitos com estas matrizes. As características físicas dos elementos finitos foram consideradas idênticas às da solução elástica. Esta hipótese simplificada ocasiona que a solução numérica levasse à obtenção de menores deflexões na laje e maiores momentos na ligação laje-parede do que existem na realidade. Os cálculos foram repetidos duas vezes;
- c) o mesmo procedimento foi repetido, mas com quatro repetições do cálculo;
- d) solução considerando não-linearidade física: o problema foi analisado com o auxílio do programa ANSYS, usando dois tipos de discretização:
  - SOLID 65, que é um elemento espacial que pode ou não considerar a armadura. É possível modelar o comportamento não-linear do concreto (considerando-se as fissuras resultantes das tensões de tração, deformações por compressão e deformações plásticas em 3 direções independentes). Também é possível dar como dados, no centro de gravidade do elemento, 3 direções independentes de armação, que podem transmitir apenas tração ou compressão (não pode transmitir cisalhamento);
  - SOLID 45, que também é um elemento espacial, mas com 8 nós, e cada um deles com 3 graus de liberdade. No modelo em consideração (laje circular), este elemento foi aplicado considerando-se as características lineares.

Os resultados dos cálculos estão mostrados na Tabela 32 (deflexões) e na Tabela 4 (solicitações). Os resultados mostrados na Tabela 3 não consideram as deformações lentas da estrutura, causadas pelo peso próprio e pelo carregamento de longa duração.

**Tabela 3: Deflexões calculadas da laje utilizando-se o modelo da Alternativa 3.**

Modelo de cálculo	Deflexão (mm)
Solução linearmente elástica	141,5
Solução com rigidez variável de acordo com a Norma Tcheca, 2 passos	247,0
Solução com rigidez variável de acordo com a Norma Tcheca, 4 passos	332,6
Solução não-linear pelo sistema ANSYS	355,6

**Tabela 4: Solicitações calculadas e valores de projeto de uma seção transversal típica para carga total.**

Seção transversal	Solicitação	Valor de cálculo (kN.m)	Valor de projeto $m_d$ (kN.m)	Momento último $M_u$ (kN.m)
Meio da laje	$m_x$	580	655	813
	$m_y$	560	635	785
	$m_{xy}$	45	-	-
Bordo (na laje)	$m_x$	465	510	578
	$m_y$	45	-	-
Bordo (na parede)	$m_z$	465	510	299,5
	$m_{yz}$	45	-	-
	$n_z$	-195	-195	-

## AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA

A avaliação da estrutura foi feita tanto com a utilização do cálculo elástico-linear como pelo cálculo não-linear utilizando-se o sistema ANSYS. Os valores mostrados na Tabela 4 para as solicitações utilizados foram os do cálculo não-linear. A seção transversal da parede (na união com a laje) não tem capacidade de suporte da solicitação existente, o que é demonstrado pela trinca existente na união parede-laje. Entretanto deve ser observado que quando da retirada das fôrmas o carregamento ainda não tinha atingido o seu valor final, e

teoricamente o nó entre a laje e a parede ainda teria capacidade de resistir aos momentos solicitantes.

Do ponto de vista do estado limite último, a estrutura não tem capacidade de resistir aos carregamentos previstos. A deflexão, mesmo considerando-se os efeitos da deformação lenta, atinge a cerca de 1/50 do vão da laje.

Os estudos numéricos realizados mostraram que a estrutura tem vários pontos falhos, tais como:

- a resistência última - o nó entre a parede cilíndrica e a laje estava com dimensionamento insuficiente e a armadura horizontal da parede era fraca;
- a resistência última da laje era insuficiente.

Assim, como a laje não mostrou resistência suficiente, foi necessário proceder-se ao reforço.

## PROJETO DO REFORÇO DA ESTRUTURA

O reforço da estrutura foi projeto pela empresa STAVOCONSULT Brno e a avaliação do projeto e das modificações propostas foi efetuada pela equipe do Departamento de Estruturas de Concreto e de Alvenaria da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Técnica de Brno.

As informações quanto ao estado real da estrutura fornecidas para a análise foram;

- as deformações reais da estrutura;
- conformação mecânica excessiva: a deformação atinge o valor de 1/50 do vão;
- a face superior da laje não estava armada;
- trincas de retração na superfície superior da laje;
- trincas horizontais na união laje-parede.

Nestas condições, foi efetuado um estudo paramétrico para o reforço da laje circular. O vão central da laje foi diminuído utilizando-se suportes, sendo seus posicionamentos estudados de forma a minimizar as forças travivas na face superior da laje.

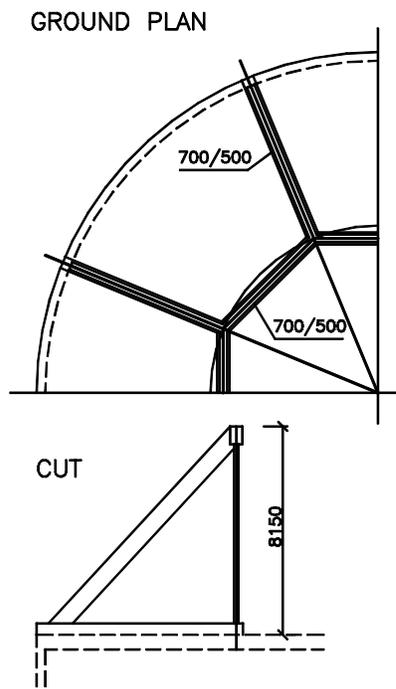
Com isto, a solução proposta foi a construção de suportes octogonais espaciais, como mostrado nas figuras 5 e 6, que forma uma viga de largura de 50cm e altura de 70cm, com um vão de 6,0m. Esta viga se apoia em uma escora diagonal com a mesma seção transversal da viga, e está situada na união entre a laje e a parede. Sob esta estrutura foi colocado um anel octogonal, preso a oito tirantes que eliminavam a componente horizontal dos tensores.

No topo de cada suporte octogonal é colocado um tirante formado por dois feixes de cabos de protensão, com quatro cabos cada. A ancoragem inferior foi situada na face inferior da laje, dentro da laje. A ancoragem superior foi situada no nó entre a viga e o suporte.

De forma a se garantir a possibilidade de se observar o progresso da ativação dos tirantes (pós-tensão) ao se levar a laje para sua posição horizontal (elevação da laje), foram instalados dois defletômetros na superfície superior do anel octogonal (defletômetros a e b), e quatro defletômetros na face inferior da laje (números 1 a 4), como mostrado na Figura 7, com precisão de centésimo de milímetro. O projeto da monitoração, o programa de avaliação e as medições in situ foram executados pelo Departamento de Estruturas de Concreto e de Alvenaria. Com base nos valores medidos das deformações da laje e após o cálculo da nova capacidade de carga da estrutura, foram efetuadas correções no processo de pos-tensionamento da estrutura.

Quatro dispositivos de protensão ativaram os tirantes. A protensão foi inserida gradualmente, até atingir 65% da tensão máxima do cabo (190kN). Após atingir este valor, a laje foi levantada por cerca de 20 a 30mm. Neste ponto suspendeu-se a protensão, de forma a se evitar a formação de fissuras na face superior da laje. Todos os tirantes foram protendidos gradualmente até o mesmo valor da força de protensão. Após a injeção das ancoragens, os tirantes foram fixados aos suportes. A face inferior da laje, permanentemente em contato com umidade do meio ambiente (influência do processo de fabricação a ser utilizado), foi pintada com tinta de base acrílica.

Os valores das deformações medidas após a protensão estão mostrados nas figuras 8, 9 e 10. Durante todo o processo de protensão a deflexão da laje foi monitorada na região dos suportes, e os valores foram comparados aos de projeto. Assim, foi possível modificar o processo de protensão de acordo com a resposta da estrutura.



**Figura 5: Suporte espacial.**



(a)



(b)

**Figura 6: Vista geral da estrutura.**

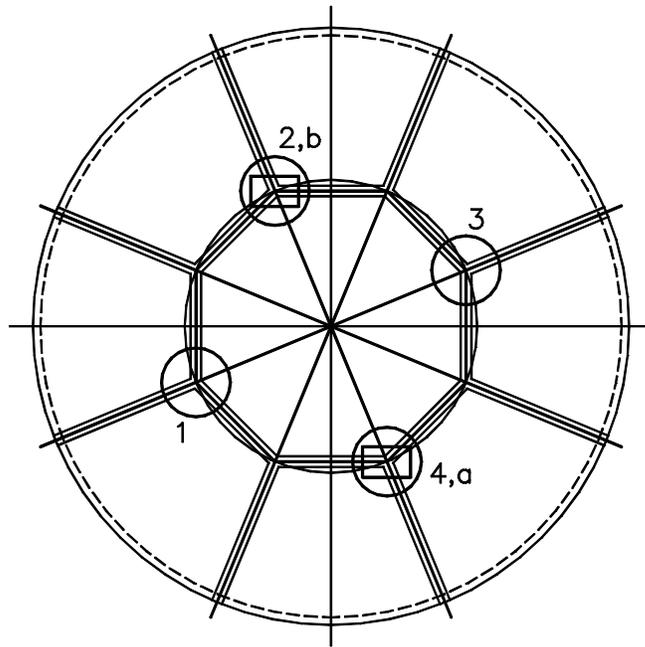


Figura 7: Arranjo dos pontos de medida na laje.

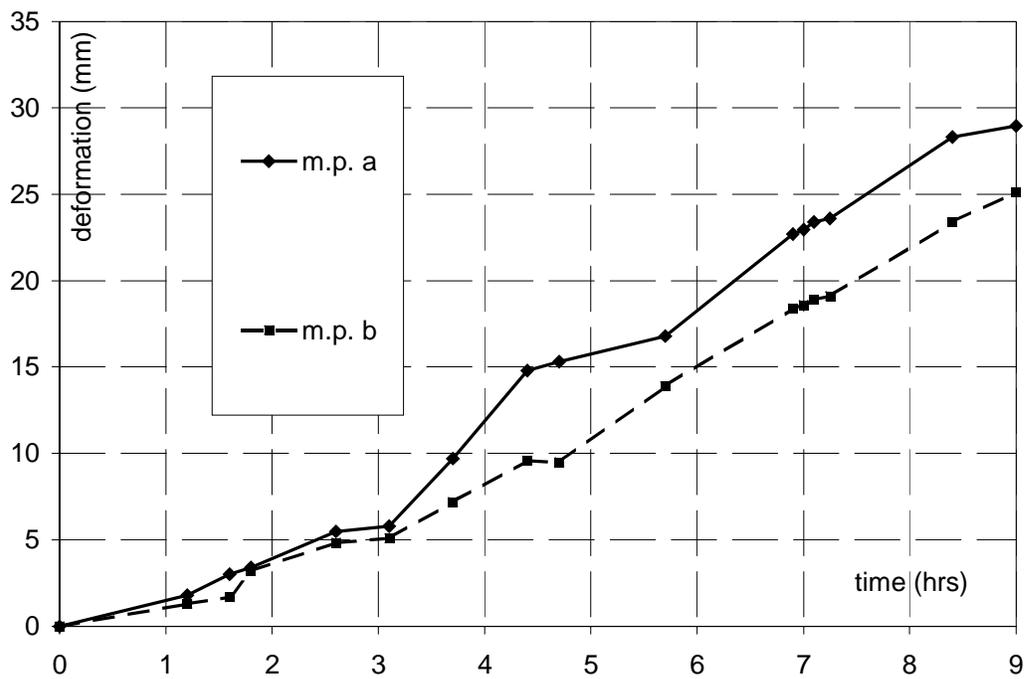


Figura 8: Relação entre a elevação da laje no tempo e a protensão medida na face superior da laje.

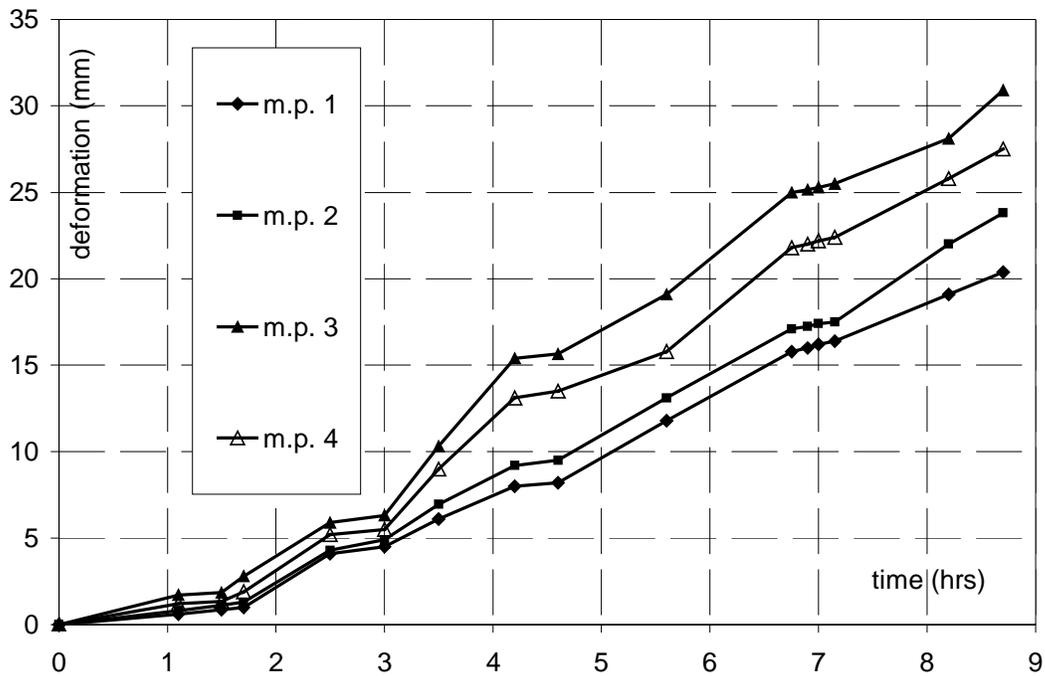


Figura 9: Relação entre a elevação da laje no tempo e a protensão medida na face inferior da laje.

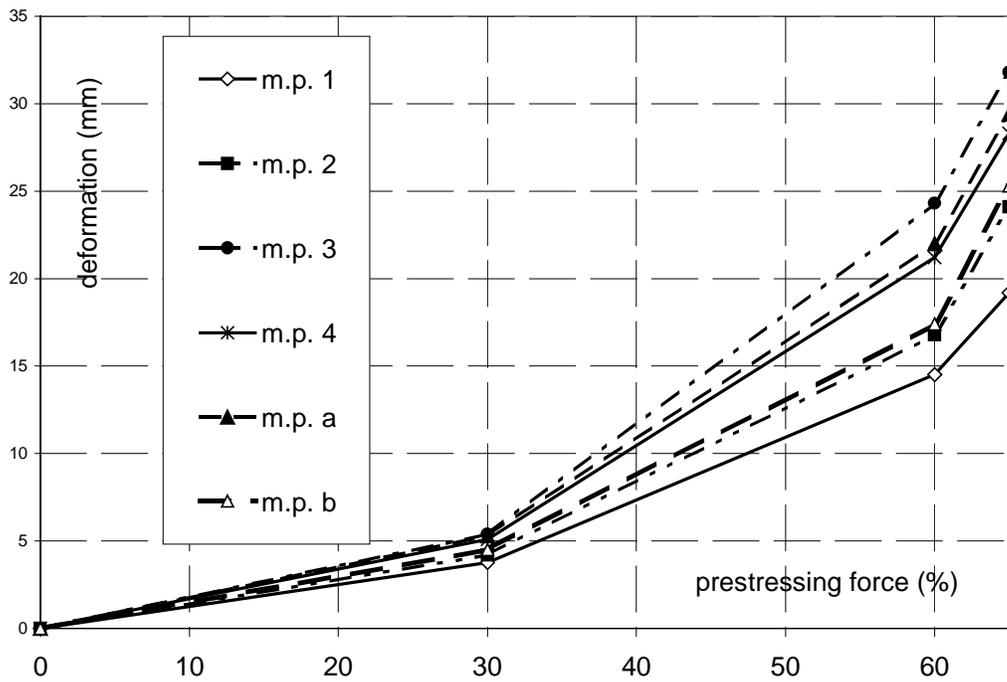


Figura 10: Relação entre a elevação da laje no tempo e a força de protensão.

## CONCLUSÕES

A laje, provavelmente projetada para o primeiro nível dos estados últimos, foi reforçada por suportes espaciais. A ação conjunta das paredes cilíndricas verticais de baixa rigidez com a laje foi subestimada no projeto original, já que a espessura da parede e o vão da laje estão incompatíveis. O novo sistema global da estrutura reforçada preenche todas as condições dos estados últimos, de acordo com o que prescreve o Eurocode 2.

Embora os projetos iniciais de reforço considerassem a idéia de demolição da laje, o reforço adicional da parede e a protensão da laje tornaram possível conservar a estrutura já construída. O reparo foi economicamente mais conveniente do que a demolição inicialmente sugerida e a construção de outra estrutura. Além disso, obteve-se eficiência com relação ao tempo e a produção pôde ser iniciada conforme o planejado. A perícia efetuada, juntamente com o projeto de reforço, levou oito semanas, e a execução 5 semanas.

Com base na experiência adquirida com esta realização, faz-se necessário alertar os projetistas sobre o projeto de lajes isotrópicas de material heterogêneo (concreto armado). A estrutura deve satisfazer não somente às condições da capacidade portante de carga, mas também aos estados limites últimos. Armar-se uma laje deste tipo em apenas uma das faces é um risco que deve ser seriamente considerado. Não é possível prever o desenvolvimento das fissuras causadas por retração do concreto e não é possível usar o efeito positivo da armadura de compressão. Portanto, em última instância, provoca o desenvolvimento de deformações excessivas.

Na prática, o projeto de reforço mostrou que qualquer solução projetada deve ser submetida a um verificador independente, já que há necessidade de medição da resposta da estrutura in situ, que permite modificar o processo de reforço quando necessário.