Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Manifestações patológicas em uma edificação com lajes protendidas – um estudo de caso: parte II – reforço da estrutura.

A. B. S. Santos Neto[1]*, A. Lübeck[2], P. J. Sarkis[3], J. M. Sarkis[3]
* Autor de Contato: almir.neto@ufsm.br
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.739

Recebido: 15/05/2024 | Correções recebidas: 22/03/2025 | Aceito: 23/04/2025 | Publicado: 01/05/2025

RESUMO

As lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas são amplamente empregadas no Brasil devido suas vantagens. No entanto, o arrojo alcançado com o uso da protensão frequentemente resultam em projetos com maior complexidade. Este apresenta o estudo de caso de uma edificação comercial construída no Rio Grande do Sul, composta por lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas. Algumas manifestações patológicas, tais como, flechas excessivas e fissuras nas lajes foram observadas ainda na fase de construção. Apresenta-se a descrição das soluções de reforço estrutural utilizadas nas lajes, como mantas coladas, fitas inseridas em fibra de carbono e reforços metálicos com protensão externa. Ao final dos trabalhos de reforço foram realizadas provas de carga nas lajes, que mostraram a eficiência das soluções adotadas.

Palavras-chave: laje lisa protendida; concreto protendido; patologia das construções.

Citar como: Santos Neto, A. B. S., Lübeck, A., Sarkis, P. J., Sarkis, J. M. (2025), "*Manifestações patológicas em uma edificação com lajes protendidas – um estudo de caso: parte II – reforço da estrutura*", Revista ALCONPAT, 15 (2), pp. 141 – 156, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.739

[1] Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.
[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.
[3] Sarkis Engenharia Estrutural, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Contribuição de cada autor
Neste trabalho, o autor Santos Neto contribuiu com a redação do trabalho, análise, discussão dos resultados, conclusões e revisão do manuscrito. O autor Lübeck contribuiu com a redação do trabalho, análise, discussão dos resultados, conclusões e revisão do manuscrito. Os autores Sarkis contribuíram com o estudo e análise dos reforços estruturais e discussão dos resultados.

Licença Creative Commons
Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2025.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Pathological manifestations in a prestressed concrete flat slab building - a case study: part II - structure reinforcement.

ABSTRACT

Prestressed concrete flat slabs with unbonded tendons are widely used in Brazil due to their advantages. However, the bold achieved with prestressed structures often results in projects with greater intricacy. This paper presents a case study of a commercial building constructed in Rio Grande do Sul, designed with pretressed concrete flat slabs with unbonded tendons. Some pathological manifestations, such as excessive deflections and cracks in the slabs, were observed during the construction phase. The description of the structural reinforcement solutions used in the slabs is presented, including bonded overlays, carbon fiber tape inserts, and externally prestressed metallic reinforcements. At the end of the reinforcement works, load tests were conducted on the slabs, demonstrating the efficiency of the used solutions.

Keywords: prestressed concrete flat slab; prestressed concrete; pathological manifestations in constructions.

Manifestaciones patológicas en una edificación con losas pretensadas - un estudio de caso: parte II - reforzamiento estructural.

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio de caso de una edificación comercial construida en Rio Grande do Sul, compuesta por losas lisas pretensadas con cables engrasados. Se observaron algunas manifestaciones patológicas, como flechas excesivas y fisuras en las losas, aún en la fase de construcción. Se presenta la descripción de las soluciones de refuerzo estructural utilizadas en las losas, tales como mantas adheridas, cintas de fibra de carbono insertadas y refuerzos metálicos con pretensión externa. Al finalizar los trabajos de refuerzo, se llevaron a cabo pruebas de carga en las losas, que demostraron la eficacia de las soluciones adoptadas. Las losas lisas pretensadas con cables engrasados son ampliamente utilizadas en Brasil debido a sus ventajas. Sin embargo, la complejidad alcanzada con el uso de la pretensión a menudo resulta en proyectos con mayor complejidad.

Palabras clave: losas lisas pretensadas; concreto pretensado; patología de las construcciones.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

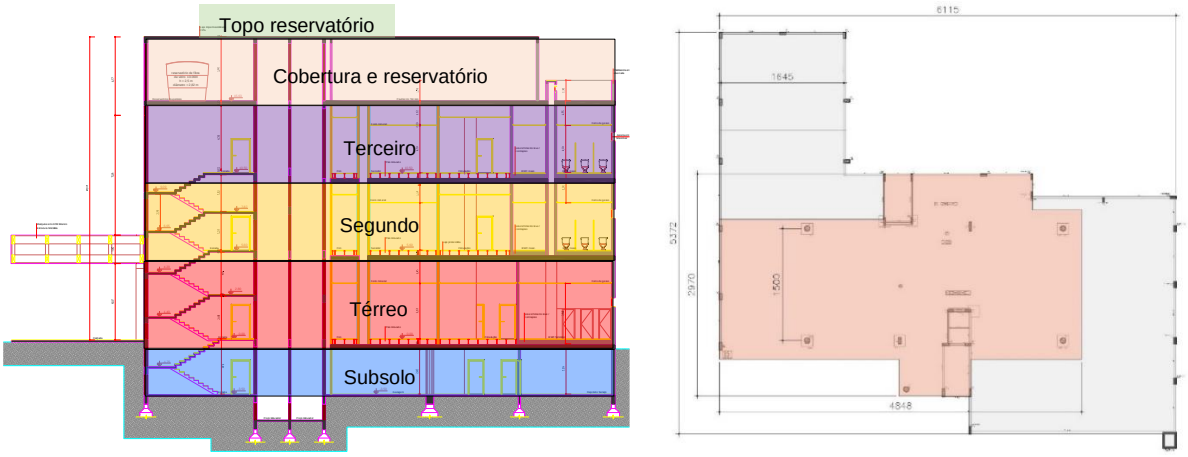
Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a descrição dos trabalhos de recuperação e reforço estrutural, executados em uma edificação comercial, sendo o complemento do artigo *Manifestações patológicas em uma edificação com lajes protendidas – um estudo de caso: Parte I – Análise da Estrutura.*
A edificação é constituída por um pavimento de subsolo semienterrado (vagas de estacionamento, depósitos, vestiários, reservatório de água e almoxarifado), pavimento térreo destinado ao atendimento do público (hall/recepção, auditório, área comercial, sanitários, copa e outras utilidades), 2º e 3° pavimentos de escritórios (sala de reuniões, sala de treinamento de pessoal, saguão/coffee break, espaço gourmet, sanitários, área externa dividida em cobertura verde e outra com acesso restrito do público), pavimento de cobertura sem acesso público, além do topo das lajes dos reservatórios. Sendo, portanto, 6 níveis de pavimentos (pisos) e área total de 5.697,00 m^2.
Na Figura 1(a) apresenta-se um corte esquemático com a nomenclatura de cada pavimento. Na Figura 1(b) tem-se a sobreposição das plantas baixas do segundo (cor cinza) e terceiro pavimentos (cor laranja). Na direção horizontal, em planta, a edificação tem um comprimento de 61,15 m, enquanto na vertical são 53,72 m. No terceiro pavimento e nos superiores, as dimensões diminuem para 48,48 m na horizontal e 29,7 m na vertical. Não há juntas de dilatação/dessolidarização na estrutura.



(a) (b)

Figura 1. (a) Corte esquemático com indicação dos pavimentos; (b) Sobreposição das plantas do 2° e 3° pavimentos (medidas em centímetros).

A análise técnica realizada, e apresentada detalhadamente no artigo *Manifestações patológicas em uma edificação com lajes protendidas – um estudo de caso: Parte I – Análise da Estrutura*, indicou que a espessura adotada para as lajes era menor do que recomendado pela literatura e algumas normalizações. Além disso, a própria tipologia adotada de laje poderia ser aprimorada se adotado um sistema de laje nervurada protendida, o que reduziria significativamente o peso próprio da laje, permitindo o uso de uma maior espessura. Foi ressaltado também na análise técnica do projeto que não havia impedimento que fossem adotadas espessuras menores que o indicado na literatura, desde que fossem verificadas as flechas máximas, as tensões normais limites e avaliado o risco de ocorrência de vibrações excessivas na laje.
Verificou-se que em algumas regiões das lajes, as tensões normais (ELS-F) ultrapassam o limite normativo (ABNT NBR 6118, 2014) de tração significativamente. Esta condição foi corroborada pelas fissuras observadas na obra, tanto nas faces superior e inferior das lajes. Além disso, a análise técnica realizada verificou que as armaduras positivas adotadas no projeto estrutural para as diferentes lajes eram insuficientes. Da mesma maneira, o resultado da análise estrutural mostrou

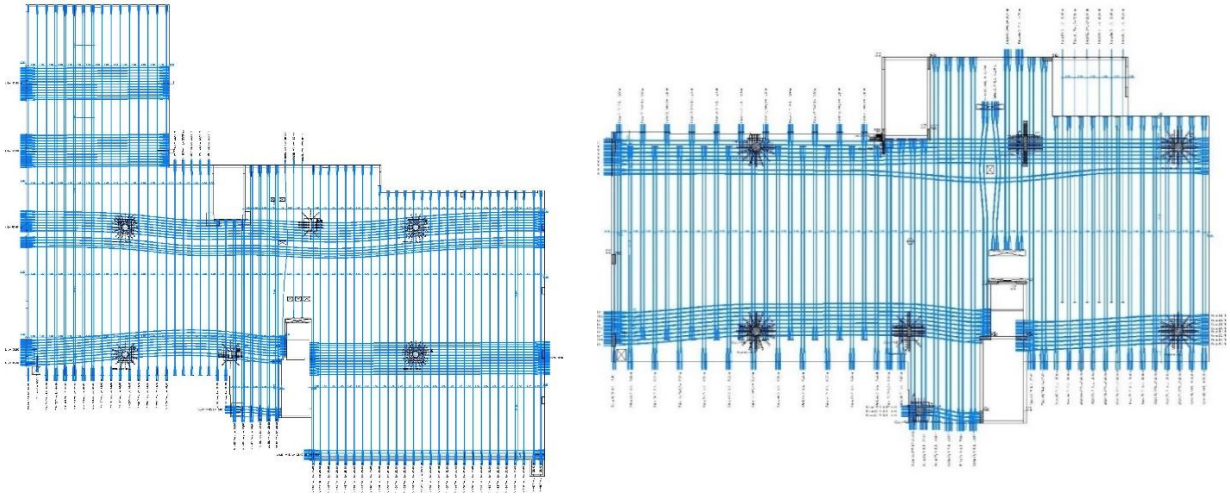
que não foi possível dimensionar uma configuração de armadura negativa, considerando a espessura da laje adotada no projeto estrutural.
A partir das constatações obtidas nas análises da estrutura e do projeto estrutural, foi realizado o projeto e execução de reforços da estrutura da edificação. O projeto de reforço combinou diferentes estratégias, como o uso de mantas de fibra de carbono colada nas lajes, lâminas de fibra de carbono inseridas (*cut in*), protensão externa com cordoalhas engraxadas não aderentes e acréscimo de vigas metálicas treliçadas protendidas. As treliças metálicas e a protensão externa foram utilizadas com o intuito também de reverter parte dos deslocamentos observados nas lajes. Após a finalização dos trabalhos de execução do reforço, foram realizadas provas de carga na estrutura com o intuito de avaliar e validar o desempenho da estrutura após a recuperação.
Este artigo, intitulado, *Manifestações Patológicas em uma Edificação com Lajes Protendidas – Um Estudo de Caso: Parte II – Reforço da Estrutura*, apresenta a descrição das técnicas utilizadas para o reforço e a avaliação do desempenho da estrutura recuperada, bem como, as provas de carga realizada após o reforço da estrutura.

2. ESTUDO DE CASO

Neste item é inicialmente apresentada uma breve descrição da estrutura da edificação sendo, em seguida, detalhado o projeto e a execução do reforço estrutural, bem como, o conjunto de provas de carga realizadas para validação dos reforços.

2.1 Projeto estrutural original

O sistema estrutural da edificação pode ser descrito em sua tipologia como sendo lajes lisas protendidas, com vigas de contorno e capitéis em alguns dos pilares internos. As vigas, em sua maioria são em concreto armado e uma em concreto protendido, enquanto todas as lajes são em concreto protendido, com exceção da laje de cobertura do reservatório que é armada.
As lajes protendidas apresentavam 25 cm de espessura em todos os pavimentos, menos a laje de cobertura do reservatório que tem espessura de 15 cm, sendo utilizado concreto classe C35 (f_{ck} = 35 MPa) em toda a estrutura. Nas lajes protendidas, os vãos típicos são da ordem de 15 m, chegando a 16,45 m na laje de cobertura do auditório (2° pavimento).
Foram utilizadas para a protensão da laje, cordoalhas engraxadas de 12,7 mm de diâmetro e aço do tipo CP 190 RB. No caso das armaduras passivas foram adotados aços da classe CA-50 e CA-60.
Os cabos de protensão foram concentrados em uma direção e distribuídos na outra. Na Figura 2(a) é apresentada a configuração dos cabos no segundo pavimento. Essa configuração é semelhante à usada na laje do térreo. Enquanto na Figura 2(b) é mostrada a configuração dos cabos usada no terceiro pavimento, sendo semelhante à usada na cobertura.



(a) (b)

Figura 2. Disposição dos cabos de protensão: (a) Cabos do 2° pavimento; e (b) Cabos do 3° pavimento.

2.2 Modelo estrutural desenvolvido para o reforço da estrutura

O modelo estrutural foi desenvolvimento em elementos de barras com auxílio de dois softwares (MIX-TQS, 2011 e CAD TQS, 2018). As protensões, existentes ou novas, foram consideradas como carregamentos externos. O carregamento atuante externo na estrutura foi considerado conforme a (ABNT NBR 6120, 2019). O traçado de cada cabo do projeto estrutural original, com cordoalhas engraxadas de 12.7 mm e aço CP 190 RB, foi dividido em trechos entre pontos de inflexão. Em cada trecho foi aplicada a carga equivalente na estrutura de acordo com o comprimento do trecho (corda) e o afastamento do ponto central (flecha), conforme apresentado na Figura 3, (Sarkis *et al*., 2023). A força de protensão dos cabos foi aplicada, de maneira simplificada, considerando já atuando todas as perdas, resultando em um valor final de 12 tf (120 kN), por cabo.

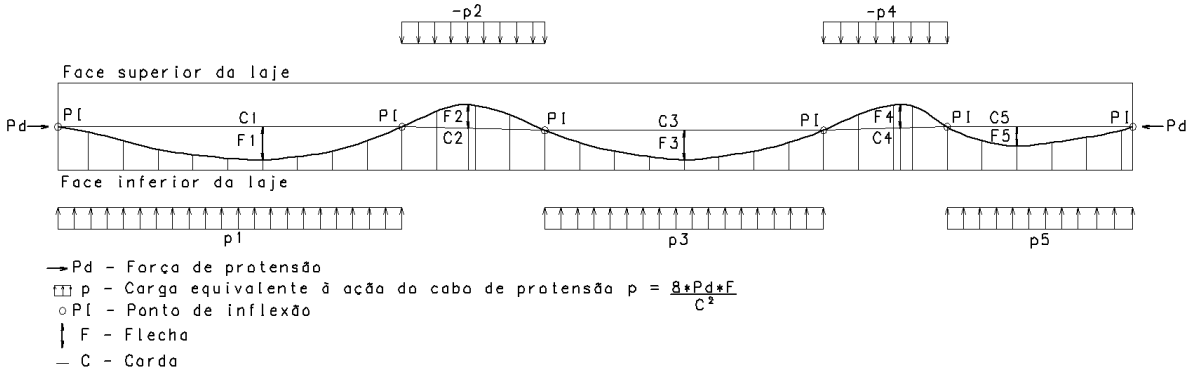


Figura 3. Reprodução de trecho do traçado de um cabo original.

As treliças e vigas metálicas de reforço foram consideradas no modelo através da inserção das propriedades homogeneizadas das seções mistas aço-concreto nas barras equivalentes na grelha dos pavimentos. O dimensionamento desses elementos em aço foi interativo, a alteração das rigidezes das barras no modelo resultou na alteração dos esforços nesses elementos, demandando o ajuste das seções transversais e, por consequência, nas rigidezes. Por outro lado, os pilares metálicos foram adicionados com suas propriedades individuais diretamente no modelo.

A simulação e análise da estrutura foram realizadas em etapas. Primeiramente a estrutura foi modelada como construída, sendo que os cabos de protensão foram simulados através da inserção dos seus carregamentos equivalentes. Essa etapa buscou reproduzir o comportamento e esforços atuantes na estrutura. Concluída esta etapa, na próxima foram consideradas as treliças, vigas e pilares metálicos no modelo. Repetindo-se o processamento para cada ajuste de rigidez das barras até que os esforços nos elementos não se alterassem significativamente.

Finalizada a análise iterativa, partiu-se para a terceira etapa da análise que foi a consideração da protensão externa ascendente com desviadores na face inferior das lajes. A consideração desse reforço foi realizada através da aplicação direta das forças verticais ascendentes na grelha do modelo. A definição da quantidade de cabos e elementos de reforço foi realizada pelo ajuste das flechas das lajes no modelo, buscando trazê-las para os limites aceitáveis presentes nas normas. Durante esse ajuste foram avaliados também os esforços nos elementos metálicos de reforço, realizando os ajustes nas dimensões, quando necessário.

Por fim, considerados os elementos metálicos de reforço e a protensão externa, avaliou-se os esforços nas lajes, vigas e pilares, confrontando os esforços solicitantes com os resistentes. Quando os esforços solicitantes eram maiores que os resistentes para as armaduras originalmente instaladas nos elementos, calculou-se o complemento de armadura, através da inserção de elementos em fibra de carbono.

Nessas simulações, foi utilizado também o software Adapt Floor Pro 2018. Alguns dos resultados desses modelos são apresentados neste artigo, após a apresentação das soluções de reforço aplicadas.

2.3 Reforço com estrutura metálica na laje do pavimento térreo

No caso do subsolo da edificação (laje do pavimento térreo), como este é destinado para garagens, o pé-direito é menor e, portanto, não comportava treliças e protensão externa. O reforço projetado para esta laje previu a colocação de novos pilares, com fundação em estacas de concreto prensadas. Nos pilares existentes e novos, foram colocados perfis de aço conectados com placas chumbadas na laje, garantindo o funcionamento de viga mista, dimensionado conforme a (ABNT NBR 8800, 2008) e considerando o estado de carregamento já existente, conforme (Sarkis, 2001). Na Figura 4 apresenta-se parte da nova distribuição de pilares e vigas de aço do subsolo da edificação. Nesta figura percebe-se também as mantas de fibra de carbono coladas para suprir a falta de armaduras passivas na laje.

As vigas foram mobilizadas (colocadas em carga) a partir do seu macaqueamento contra a laje do pavimento térreo, usando a própria flexibilidade da viga como elemento de ativação. Calços formados por chapas e lâminas de aço foram colocados entre a viga de aço deformada e a placas chumbadas na laje. Ao aliviar o sistema de macaqueamento, as vigas tendiam a retornar à posição indeformada, reagindo contra a laje e recebendo parte do carregamento. Na Figura 5 exemplifica-se o sistema de macaqueamento sendo executado.

As estacas prensadas foram executadas, inicialmente, como estacas escavadas com equipamento de pequeno porte, compatível com a altura reduzida do pé-direito do subsolo. Depois de esgotada a capacidade de escavação do equipamento, a estaca era concretada e finalizada a cravação com macacos hidráulicos até estabilizar com a resistência necessária de estaca mega, conforme (ABNT NBR 6122, 2019). Na Figura 6 apresenta-se o processo de prensagem de uma das estacas de fundação que suporta os pilares metálicos.

Figura 4. Pilares e vigas metálicas do reforço no subsolo.

Figura 5. Operários realizando o macaqueamento de uma das vigas metálicas do reforço no subsolo.

Figura 6. Prensagem de uma estaca de fundação.

2.4 Reforço com protensão externa nas lajes dos demais pavimentos

2.4.1 Treliças metálicas protendidas

Nos pavimentos superiores, o projeto arquitetônico previa forro falso com espaços de 90 cm a 110 cm para a passagem de instalações. Esse espaço foi aproveitado para colocação de treliças de aço, acompanhando a posição da cablagem concentrada do projeto original.

Uma treliça tradicional para os vãos e cargas atuantes, limitada pela altura disponível entre o forro falso e a laje, se mostrou inviável pelos custos e seções das peças dimensionadas. A solução encontrada foi soldar e chumbar o banzo superior da treliça na laje, passando a funcionar como treliça mista. Dessa forma a laje passou a fazer o papel de banzo comprimido. A Figura 7 apresenta uma das treliças chumbadas na laje superior, passando a funcionar como laje mista.

Da mesma forma que as vigas do pavimento térreo, as treliças foram mobilizadas pelo macaqueamento contra a laje superior. Ao aliviar os macacos, as treliças tendiam a voltar à posição indeformada, reagindo contra a laje e recebendo parte do carregamento desta.

No banzo inferior, a força de tração foi mitigada com o uso de protensão horizontal junto à face inferior da treliça. Em algumas treliças foi adicionada protensão externa no centro do vão com cabos inclinados. A Figura 8 ilustra a protensão do cabo horizontal, reforçando o banzo tracionado.

Figura 7. Treliças metálicas na região do auditório (laje do piso do 2º pavimento).

Figura 8. Aplicação da protensão na treliça com macaco hidráulico.

2.4.2 Protensão externa com desviadores

Perpendicular às treliças metálicas, foi executada a protensão externa das lajes. Essa protensão consistiu de cabos com ancoragem passiva fixada à laje junto ao banzo superior das treliças e ancoragem ativa em desviadores instalados no vão da laje, para facilitar o manuseio dos macacos de protensão. Para definição do espaçamento desses cabos de protensão externa, o modelo estrutural foi alimentado iterativamente com cargas externas, correspondentes ao traçado de cada tipo de cabo, até que as tensões de borda nas barras da discretização em grelha ficassem dentro das tensões limites da norma. Na Figura 9 exemplifica-se a protensão externa das lajes.

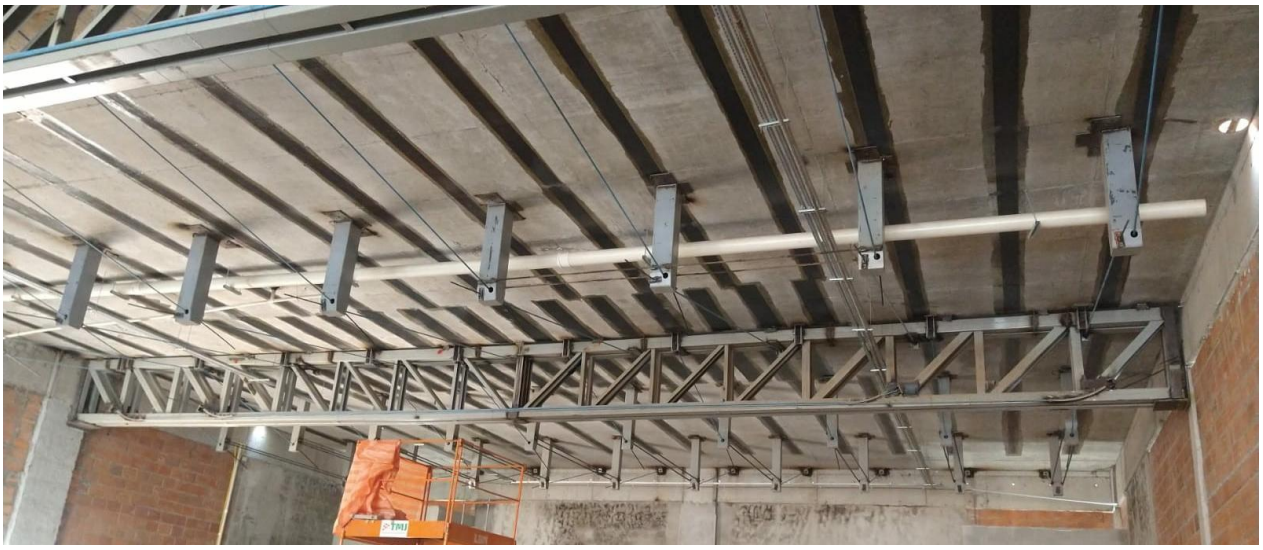


Figura 9. Protensão externa na laje de cobertura do auditório.

2.5 Reforço com manta de fibra de carbono

Como armadura passiva positiva, na face inferior das lajes, o projeto estrutural original contemplava uma malha em toda a extensão Q196 (malha quadrada, de barras de diâmetro 5 mm espaçadas a cada 10 cm, resultando em uma área de aço de 1,96 cm²/m), que resultou em área de aço inferior à mínima para a espessura da laje de 25 cm. Para completar a resistência da seção com área mínima foi projetado o reforço com manta de fibra de carbono, disposta na direção dos cabos distribuídos. Na direção ortogonal, a malha de armadura passiva do projeto original era suficiente, pois a (ABNT NBR 6118, 2014), norma vigente à época do desenvolvimento do projeto estrutural, reduzia pela metade a armadura mínima na direção secundária das lajes. Na Figura 10 apresenta-se o conjunto de mantas de fibra de carbono utilizado na laje do 2º pavimento.

Figura 10. Mantas de fibra de carbono aplicadas na laje do 2º pavimento.

Este tipo de reforço com manta de fibra de carbono colada na face inferior foi aplicado nas lajes, nos diferentes pavimentos da edificação.

2.6 Reforço com lâmina fibra de carbono inserida

Em algumas regiões da laje, onde a análise indicou a atuação de momentos fletores negativos, principalmente sobre as treliças metálicas instaladas, foi necessário acrescentar armaduras negativas. Nesses casos deu-se preferência para o uso de lâminas inseridas de fibra de carbono (*cut in*), conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11. Exemplo de aplicação da fibra de carbono inserida (*cut in*).

Este reforço com lâminas inseridas de fibra de carbono foi aplicado nas lajes do 2º, 3º e 4º pavimentos da edificação.

2.7 Reforço dos pilares de concreto

A análise estrutural indicou também a necessidade de reforçar alguns pilares da estrutura. Adotou-se dois tipos de reforço. Nos pilares circulares foram acrescentados longitudinalmente perfis metálicos em formato de tê solidarizados ao concreto por cola do tipo epóxi estrutural, como mostra a Figura 12. Já nos pilares retangulares do pavimento subsolo os reforços foram em manta de fibra de carbono colada transversalmente (cintando) e cantoneiras metálicas coladas longitudinalmente, ao longo dos vértices como mostrado nas Figuras 13 e 14.

Figura 12. Reforço de pilar circular com perfis metálicos.

Figura 13. Cantoneiras de reforço coladas em pilar retangular.

Figura 14. Mantas de fibra de carbono coladas cintando pilar retangular.

2.7 Análise estrutural dos reforços metálicos

Previamente a execução dos reforços e fabricação das treliças e elementos metálicos, foi realizado análise dos reforços com protensão externa (treliças e cabos desviadores) para as lajes dos pavimentos. Essa análise foi realizada no software Adapt Floor Pro 2018.

Os novos carregamentos utilizados nas análises, a posição das treliças de reforço e o posicionamento das vigas de protensão externa foram indicados pelo projetista do reforço estrutural e inseridos no programa.

Para a modelagem considerou-se:

a) No intuito de simular as treliças de reforço foram inseridas no modelo vigas de concreto com rigidez equivalente das treliças metálicas;

b) Os carregamentos devidos ao reforço das treliças metálicas e desviadores foram inseridos, no programa, como carregamentos pontuais em pontos específicos, em sentido contrário ao do peso próprio da laje (para cima), para simular o efeito do reforço.

c) O peso próprio das vigas de concreto foi desconsiderado das análises. As vigas foram modeladas considerando as extremidades como rotuladas em relação ao eixo de maior inércia da seção transversal. Foi liberada, também, a rotação em torno do seu eixo longitudinal, de maneira que essas permitissem que a laje trabalhasse sem restrições.

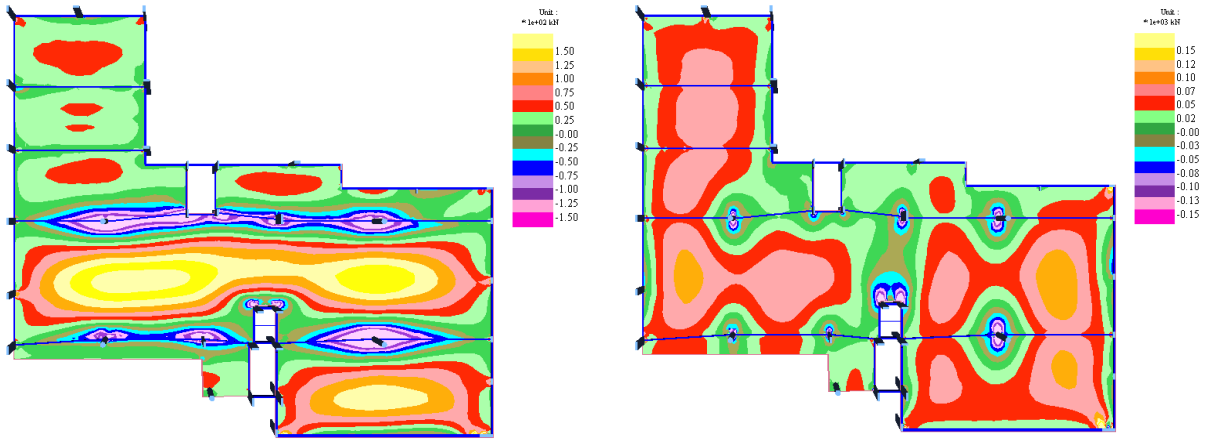
d) As combinações de carregamento adotadas na análise seguiram os preceitos da (ABNT NBR 6118, 2014), conforme a seguir:

- Esforços (ELU): 1,4 PP + 1,4 SC + 1,0 Hiperestáticos + 1,0 Reforço
- Flechas elásticas (ELS - Comb. Quase Permanente): 1,0 PP + 1,0 Protensão + 0,4 SC + 1,0 Reforço

e) Foi considerado também para visualização dos deslocamentos, para fins de verificação, duas outras combinações:

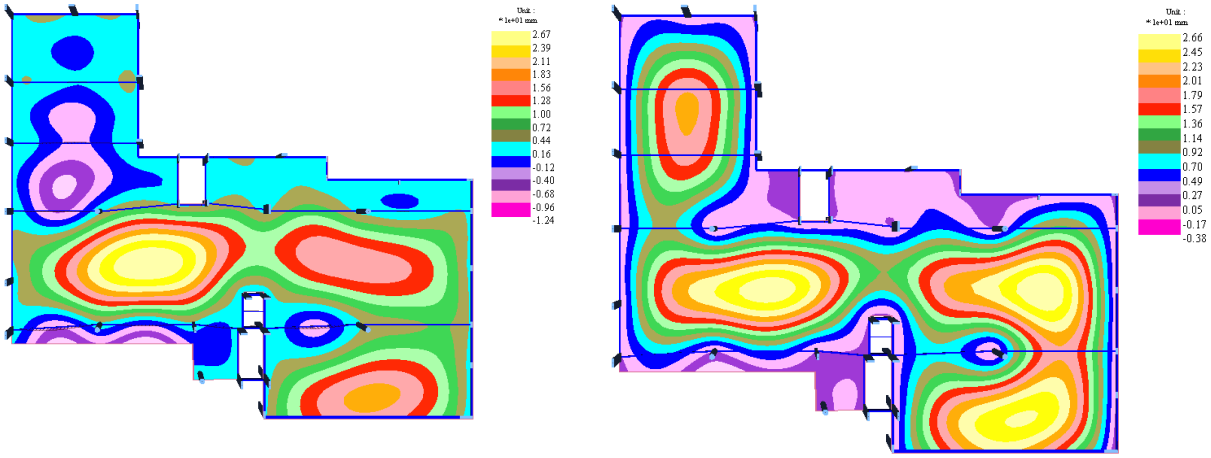
- Flechas elásticas (Reforço + PP laje): 1,0 Peso Próprio + 1,0 Reforço
- Flechas elásticas (Reforço + PP laje + Protensão): 1,0 Peso Próprio + 1,0 Protensão + 1,0 Reforço

Neste artigo são apresentados os resultados da análise apenas para a laje do 2º Pavimento, referentes ao momento fletor e flechas. Na Figura 15 mostram-se as curvas de isovalores de momentos fletor na laje na direção y (M_{xx} representa o momento que causa flexão em torno do eixo x, ou seja, momento na direção y).
Já a Figura 16 apresenta as curvas de isovalores dos deslocamentos verticais na laje (em mm) para as diferentes combinações de carregamento.



(a) (b)

Figura 15. (a) Momentos fletores, M_{xx}, em 10^2 kN.m/m, na direção y (vertical); (b) Momentos fletores, M_{yy}, em 10^2 kN.m/m, na direção x (horizontal).



(a) (b)

Figura 16. (a) Deslocamentos verticais em 10^1 mm, para a combinação quase-permanente (flecha imediata); (b) Deslocamentos verticais em 10^1 mm, levando em consideração os carregamentos do peso próprio da laje + reforço com protensão externa (flecha imediata).

Como pode ser visto no resultado das análises, os reforços metálicos com protensão externa contribuíram significativamente para a redução dos valores de momento fletor nas lajes, bem como a redução dos deslocamentos verticais (flechas), para valores dentro dos limites recomendados pela (ABNT NBR 6118, 2014).

2.8 Provas de Carga

Apesar da estrutura com os reforços ter sido modelada numericamente e o comportamento observado durante os reforços ter sido próximo aos resultados obtidos nos modelos, optou-se por

realizar a prova de carga das lajes para atestar a segurança da estrutura reforçada. Ao todo foram realizadas 17 provas de carga, nos diferentes pavimentos, seguindo as prescrições da (ABNT NBR 9607, 2019), exemplificadas na Figura 17.

(a) (b)

Figura 17. (a) Prova de carga em uma laje do segundo pavimento (carregamento realizado com placas de piso elevado); (b) Dispositivo para medição da flecha, em ponto definido no modelo estrutural.

A determinação da área a ser carregada e da quantidade de carga aplicada em cada região foi realizada de maneira a obter nas lajes os esforços solicitantes equivalentes obtidos no Estado Limite Último (ELU). Na Figura 18 exemplifica-se a planta com o plano de provas de carga das lajes do 3° pavimento. Essas provas de carga não foram concomitantes.

As etapas das provas de carga consistiram na instalação do sistema de medição das deformações com as lajes descarregadas, o carregamento das áreas acréscimos de carga de 25% por etapa, com a medição das deformações até a estabilização, prosseguindo até a carga total. O carregamento total foi mantido por 60 horas, com leituras de deformação imediatamente ao carregamento total, e depois com 24, 48 e 60 horas após a carga. Por fim, foi realizado o descarregamento, com medição das deformações a 50% da carga e depois da descarga total. A medição das deformações residuais foi realizada imediatamente e 4 horas após a descarga. Destaca-se que a deformação das lajes foi medida no centro da área carregada e em uma das bordas, ao longo da maior aresta, para a determinação da deformação da laje pela diferença entre as duas medidas. Na Tabela 1 exemplifica-se os resultados da medição da prova de carga 1 das lajes do terceiro pavimento.

Tabela 01. Resultados da prova de carga 1 do 3° pavimento.

PC1						
Área da laje	75.00 m²					
Carga total	29.9 tf					
Flecha limite de norma	42.8 mm					
Leitura inicial (zero de carga)	0.0 mm					
Hora	Dia	Carga	Medida (mm)	Medida Viga (mm)	Diferença (mm)	Observação
07:37	03/06/2022	0	0.00	0	0.00	
08:16	03/06/2022	25%	1.88	0.55	1.33	
08:30	03/06/2022	25%	1.97	0.55	1.42	

08:42	03/06/2022	25%	1.99	0.54	1.45	
09:25	03/06/2022	50%	3.76	1.05	2.71	
09:40	03/06/2022	50%	3.79	1.06	2.73	
09:49	03/06/2022	50%	3.77	1.07	2.70	
10:20	03/06/2022	75%	6.49	1.53	4.96	
10:34	03/06/2022	75%	6.46	1.54	4.92	
10:48	03/06/2022	75%	6.45	1.54	4.91	
11:12	03/06/2022	100%	7.34	1.89	5.45	
11:28	03/06/2022	100%	7.37	1.9	5.47	
11:45	03/06/2022	100%	7.37	1.9	5.47	
10:37	04/06/2022	100%	8.20	2.29	5.91	(24 horas)
10:14	05/06/2022	100%	8.24	2.37	5.87	(48 horas)
09:28	06/06/2022	100%	8.25	2.53	5.72	(60 horas)
10:49	06/06/2022	50%	4.54	1.68	2.86	Descarga
13:40	06/06/2022	0	0.78	0.62	0.16	Descarga
18:02	06/06/2022	0	0.67	0.54	0.13	4h após descarga

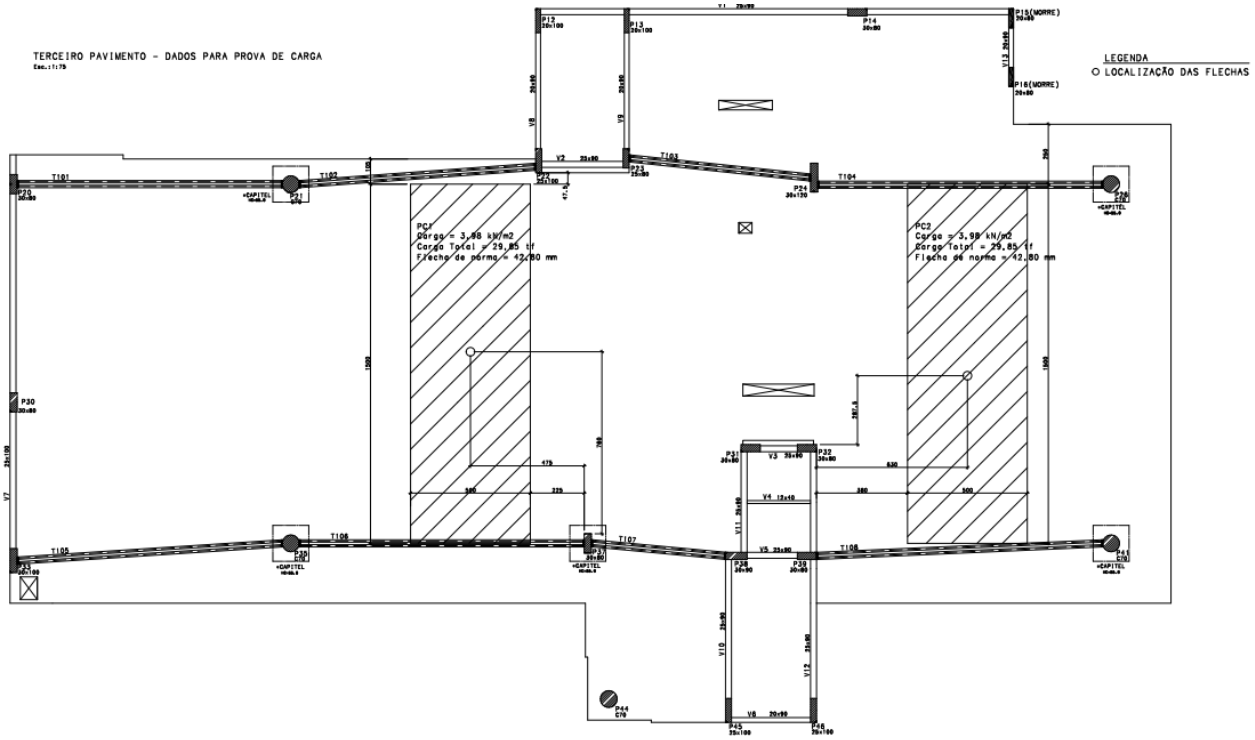


Figura 18. Plano de provas de carga nas lajes do 3° pavimento.

Os resultados das provas de cargas do pavimento térreo, reforçada com novos pilares e vigas mistas, foram muito favoráveis. As deformações ficaram abaixo do previsto no cálculo ou do limite da norma, em torno de 20% do calculado. Nos pavimentos com reforços metálicos com protensão externa, as flechas chegaram até 30% do previsto. Na laje de cobertura do reservatório de água, que foi reforçada apenas com fibra de carbono, sem elementos metálicos ou protensão, chegou-se a deformações que representavam 90% do calculado.

É importante esclarecer que estas flechas na prova de carga são devidas ao carregamento aplicado na prova de carga e não as flechas acumuladas com as já existentes nas lajes. A determinação das flechas totais não foi possível em alguns elementos pelas variações de deformação sofridas nos elementos expostos à insolação direta (lajes maiores do segundo pavimento e lajes da cobertura). Nestes elementos as deformações variavam em alguns centímetros ao longo do ciclo de um dia

devido a ação da insolação. Corroborando a afirmação de que esses elementos originalmente não dispunham da rigidez necessária para o perfeito funcionamento da estrutura.
Da mesma forma, a instalação dos reforços não buscou "zerar" as flechas das lajes, apenas trazê-las para os limites aceitáveis previstos na norma (ABNT NBR 6118, 2014). A divisão dos grandes panos contínuos de laje de cada pavimento em elementos menores foi por uma facilidade de identificação e nomenclatura. A continuidade nos panos de laje fazia com que a diminuição das deformações em alguma região resultasse, muitas vezes, no aumento em outras, tornando o processo de ajuste dos reforços um processo complexo e iterativo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final dos trabalhos de reforço da estrutura foram preservados os principais aspectos e espaços previstos no projeto arquitetônico.
A avaliação da estrutura reforçada, tanto pelos modelos numéricos quanto pelas provas de carga indica que as soluções adotadas atenderam o desempenho estrutural demandado. A estrutura atualmente está em uso, sem relato de anomalias. Mesmo assim, vistorias periódicas têm sido realizadas a fim de atestar o comportamento estrutural do conjunto.
Esse comportamento adequado da estrutura só foi possível pela combinação das diferentes técnicas de reforço aplicadas, aliadas ao acompanhamento constante do comportamento aos modelos numéricos desenvolvidos.

4. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações.* Rio de Janeiro.
Associação Brasileira de Normas Técnica. (1980). *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.* Rio de Janeiro.
Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.* Rio de Janeiro.
Associação Brasileira De Normas Técnica. (2019). *NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações.* Rio de Janeiro.
Associação Brasileira de Normas Técnica. (2008). *NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro.
Associação Brasileira de Normas Técnica. (2019). *NBR 9607: Prova de Carga Estática em Estruturas de Concreto – Requisitos e Procedimentos.* Rio de Janeiro.
Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2023). *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto.* Rio de Janeiro.
Sarkis, J. M. (2001), *"Vigas Reforçadas sob Carregamento: Um Método para Simulação Matemática"*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. p. 86.
Sarkis, J. M., Sarkis, P. J., Brasil, C. H., Moro, M. R., Piovezan, T. M., Vargas, L. B., Adams, F. P. (2023), "*Protensão Externa, Fibra de Carbono e Treliça Protendida em Laje Cogumelo"*. 3° Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.