

Manifestaciones Patológicas en una Edificación con Losas Pretensadas - Un Estudio de Caso: Parte II - Reforzamiento Estructural.

A. B. S. Santos Neto^{1*}, A. Lübeck², P. J. Sarkis³, J. M. Sarkis³

*Autor de Contacto: almir.neto@ufsm.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.739>

Recibido: 15/05/2024 | Correcciones recibidas: 22/03/2025 | Aceptado: 23/04/2025 | Publicado: 01/01/2025

RESUMEN

Las losas lisas postesadas con cables engrasados son ampliamente empleadas en Brasil debido a sus ventajas. Sin embargo, la audacia alcanzada con el uso de la postensión a menudo resulta en proyectos de mayor complejidad. Este artículo presenta el estudio de caso de una edificación comercial construida en el estado de Río Grande del Sur, compuesta por losas lisas postesadas con cables engrasados. Algunas manifestaciones patológicas, tales como flechas excesivas y fisuras en las losas, fueron observadas aún en la fase de construcción. Se presenta la descripción de las soluciones de refuerzo estructural utilizadas en las losas, como mantas adheridas, láminas insertadas de fibra de carbono y refuerzos metálicos con postensión externa. Al finalizar los trabajos de refuerzo, se realizaron pruebas de carga en las losas, las cuales demostraron la eficiencia de las soluciones adoptadas.

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

Citar como: Santos Neto, A. B. S., Lübeck, A., Sarkis, P. J., Sarkis, J. M. (2025), "*Manifestaciones Patológicas en una Edificación con Losas Pretensadas - Un Estudio de Caso: Parte II - Reforzamiento Estructural*", Revista ALCONPAT, 15 (2), pp. 141 – 156, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.739>

¹ Programa de Pogrado en Arquitetura, Urbanismo y Paisajismo, Universidad Federal de Santa Maria, Brasil.

² Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, Universidad Federal de Santa Maria, Brasil.

³ Sarkis Ingeniería Estructural, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Santos Neto contribuyó con la redacción del artículo, el análisis, la discusión de los resultados, las conclusiones y la revisión del manuscrito. El autor Lübeck contribuyó con la redacción del artículo, el análisis, la discusión de los resultados, las conclusiones y la revisión del manuscrito. Los autores Sarkis contribuyeron con el estudio y el análisis de los refuerzos estructurales y la discusión de los resultados.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2025.

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 prestressed 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.

Manifestações Patológicas em uma Edificação com Lajes Protendidas – Um Estudo de Caso: Parte II – Reforço da Estrutura.

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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta la descripción de los trabajos de recuperación y refuerzo estructural ejecutados en una edificación comercial, como complemento del artículo *Manifestaciones patológicas en una edificación con losas postesadas – un estudio de caso: Parte I – Análisis de la estructura*.

La edificación está compuesta por un nivel de subsuelo semienterrado (plazas de estacionamiento, depósitos, vestuarios, reservorio de agua y almacén), planta baja destinada a la atención al público (hall/recepción, auditorio, área comercial, sanitarios, cafetería y otros servicios), segundo y tercer nivel de oficinas (sala de reuniones, sala de capacitación, vestíbulo/espacio para café, espacio gourmet, sanitarios, área exterior dividida en una cubierta verde y otra de acceso restringido al público), nivel de cubierta sin acceso público, además del tope de las losas de los reservorios. Son, por tanto, seis niveles de pisos y una superficie total edificada de 5.697,00 m².

En la Figura 1(a) se presenta un corte esquemático con la nomenclatura de cada nivel. En la Figura 1(b) se muestra la superposición de las plantas bajas del segundo nivel (color gris) y del tercer nivel (color naranja). En dirección horizontal, en planta, la edificación tiene una longitud de 61,15 m, mientras que en la vertical alcanza 53,72 m. A partir del tercer nivel, las dimensiones se reducen a 48,48 m en sentido horizontal y 29,7m en el vertical. No existen juntas de dilatación/desolidarización en la estructura.

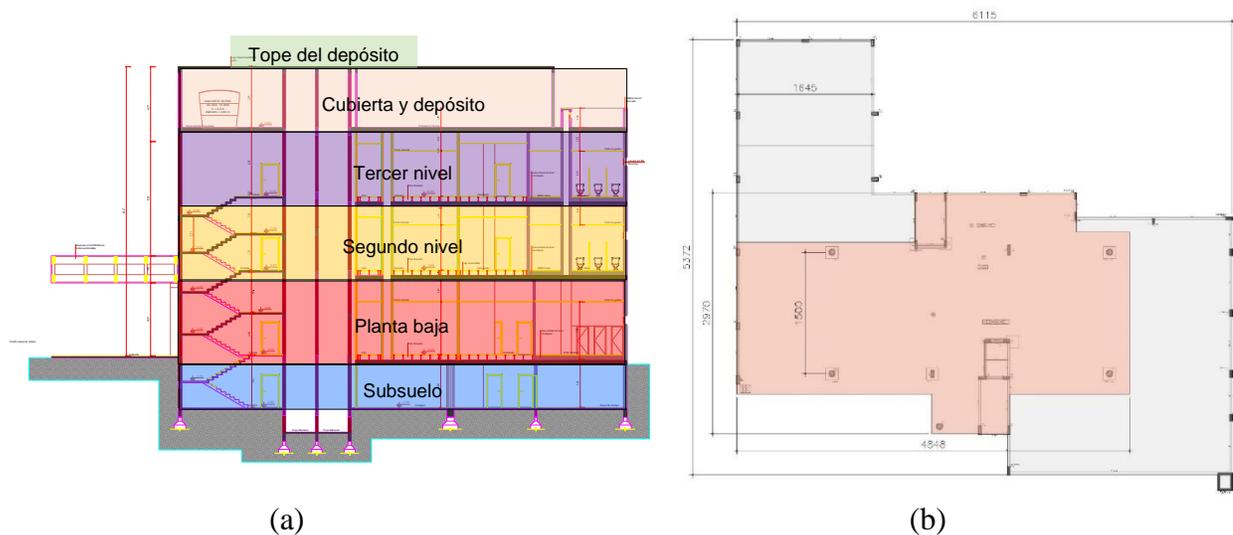


Figura 1. (a) Corte esquemático con indicación de los niveles; (b) Superposición de las plantas del segundo y tercer nivel (medidas en centímetros).

El análisis técnico realizado, y presentado detalladamente en el artículo *Manifestaciones patológicas en una edificación con losas postesadas – un estudio de caso: Parte I – Análisis de la estructura*, indicó que el espesor adoptado para las losas era inferior al recomendado por la literatura y por algunas normativas. Además, la tipología de losa adoptada podría haberse optimizado mediante la implementación de un sistema de losa nervada postesada, lo que reduciría significativamente el peso propio de la losa, permitiendo el uso de un mayor espesor. También se destacó en el análisis técnico del proyecto que no había impedimento normativo para adoptar espesores menores que los indicados en la literatura, siempre que se verifiquen las flechas máximas, las tensiones normales límite y se evalúe el riesgo de aparición de vibraciones excesivas en la losa. Se verificó que, en algunas regiones de las losas, las tensiones normales (ELS-F) superaban significativamente el límite normativo (ABNT NBR 6118:2014) de resistencia a tracción. Esta condición fue corroborada por las fisuras observadas en la obra, tanto en las caras superior como

inferior de las losas. Además, el análisis técnico realizado verificó que las armaduras pasivas positivas adoptadas en el proyecto estructural para las distintas losas eran insuficientes. De igual forma, el resultado del análisis estructural mostró que no fue posible dimensionar una configuración adecuada de armadura pasiva negativa, considerando el espesor de losa adoptado en el proyecto estructural.

A partir de los hallazgos obtenidos en los análisis de la estructura y del proyecto original, se llevó a cabo el proyecto y la ejecución de refuerzos en la estructura de la edificación. El proyecto de refuerzo combinó diversas estrategias, como el uso de mantas de fibra de carbono adheridas a las losas, láminas insertadas (*cut in*) de fibra de carbono, postensado externo con cables engrasados no adherentes y la incorporación de vigas metálicas cerchadas postesadas. Las cerchas metálicas y el postensado externo también se utilizaron con el objetivo de revertir parcialmente los desplazamientos observados en las losas. Tras la finalización de los trabajos de refuerzo, se realizaron pruebas de carga en la estructura con el propósito de evaluar y validar el desempeño estructural posterior a la recuperación.

Este artículo, titulado *Manifestaciones patológicas en una edificación con losas postesadas – un estudio de caso: Parte II – Refuerzo de la estructura*, presenta la descripción de las técnicas de refuerzo empleadas, la evaluación del desempeño de la estructura recuperada, así como las pruebas de carga realizadas después de la ejecución de los refuerzos de la estructura.

2. ESTUDIO DE CASO

En este ítem se presenta inicialmente una breve descripción de la estructura de la edificación y, a continuación, se detallan el proyecto y la ejecución del refuerzo estructural, así como el conjunto de pruebas de carga realizadas para la validación de los refuerzos.

2.1 Proyecto estructural original

El sistema estructural de la edificación puede describirse, desde su tipología, como compuesto por losas lisas postesadas, con vigas perimetrales y capiteles en algunos de los pilares interiores. Las vigas son, en su mayoría, de hormigón armado, con una viga en hormigón postesado, mientras que todas las losas son de hormigón postesado, con excepción de la losa de cubierta del reservorio, que es armada.

Las losas postesadas tenían 25 cm de espesor en todos los niveles, excepto la losa de cubierta del reservorio, que presentaba un espesor de 15 cm. En toda la estructura se utilizó hormigón clase C35 ($f_{ck} = 35$ MPa). En las losas postesadas, los vanos típicos eran del orden de 15 m, alcanzando los 16,45 m en la losa de cubierta del auditorio (segundo nivel).

Para el postensado de las losas, se utilizaron cables engrasados de 12,7 mm de diámetro, de acero tipo CP 190 RB. Para las armaduras pasivas, se adoptaron aceros de las clases CA-50 y CA-60.

Los cables de postensado se concentraron en una dirección y distribuidos en la otra. En la Figura 2(a) se presenta la configuración de los cables en el segundo nivel, configuración similar a la utilizada en la losa de la planta baja. En la Figura 2(b) se muestra la configuración de los cables del tercer nivel, siendo semejante a la empleada en la cubierta.

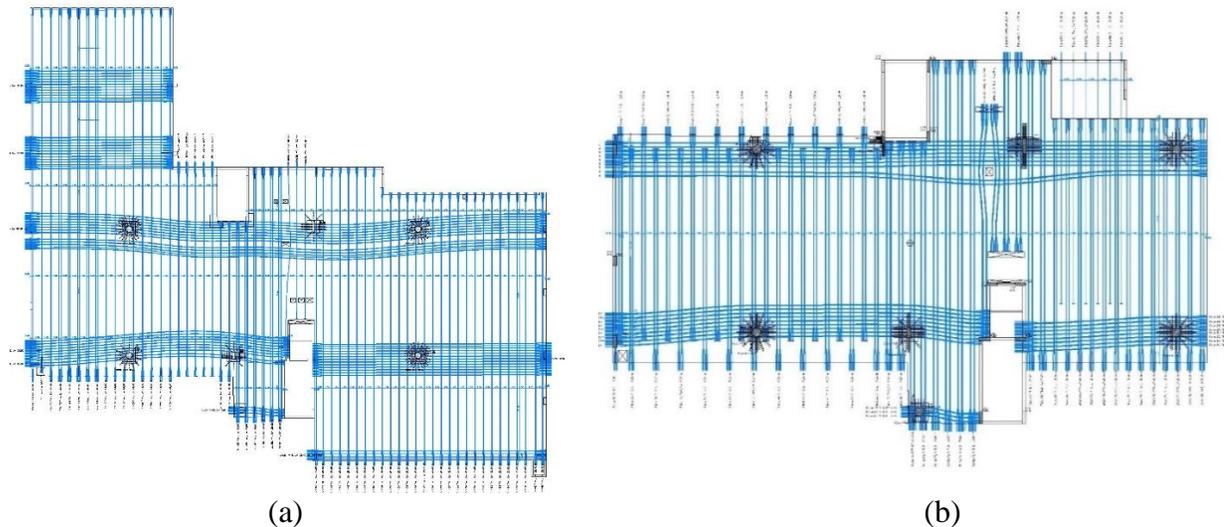


Figura 2. Disposición de los cables de postensado: (a) Cables del segundo nivel; y (b) Cables del tercer nivel.

2.2 Modelo estructural desarrollado para el refuerzo de la estructura

El modelo estructural fue desarrollado mediante elementos de barra, con el apoyo de dos softwares (MIX-TQS, 2011 y CAD TQS, 2018). Las postensiones, tanto existentes como nuevas, fueron consideradas como cargas externas. La carga externa actuante sobre la estructura se consideró según la ABNT NBR 6120:2019. El trazado de cada cable del proyecto estructural original, con cables engrasados de 12,7 mm y acero CP 190 RB, fue dividido en tramos entre los puntos de inflexión. En cada tramo se aplicó la carga equivalente en la estructura de acuerdo con la longitud del tramo (cuerda) y el desplazamiento del punto medio (flecha), conforme se presenta en la Figura 3 (Sarkis *et al.*, 2023). La fuerza de postensado de los cables fue aplicada, de forma simplificada, considerando todas las pérdidas ya efectivas, resultando en un valor final de 12 tf (120 kN) por cable.

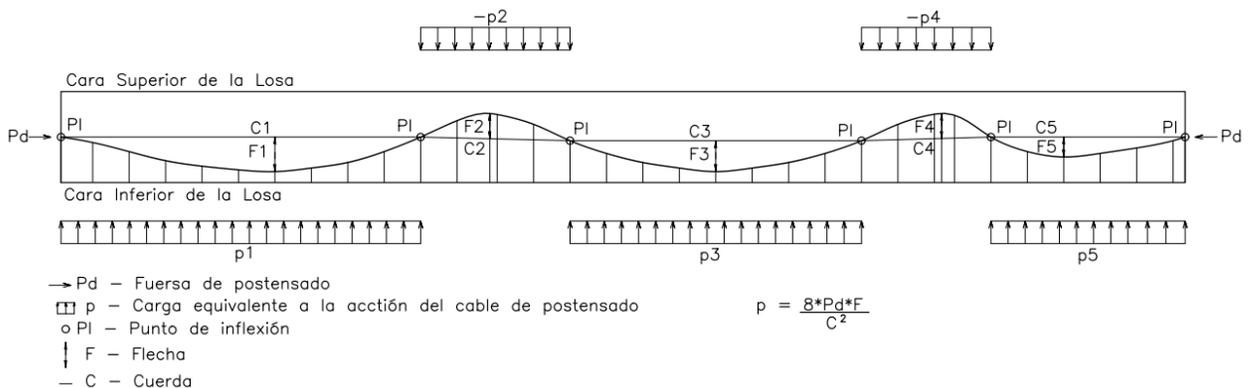


Figura 3. Reproducción de un tramo del trazado de un cable original.

Las cerchas y vigas metálicas de refuerzo fueron consideradas en el modelo mediante la inserción de las propiedades homogeneizadas de las secciones mixtas acero-hormigón en las barras equivalentes de la malla de los niveles. El dimensionamiento de estos elementos de acero fue iterativo: la modificación de las rigideces de las barras en el modelo provocaba variaciones en los esfuerzos actuantes en dichos elementos, lo que requería el ajuste de las secciones transversales y, en consecuencia, de las rigideces. Por otro lado, los pilares metálicos fueron incorporados con sus propiedades individuales directamente en el modelo.

La simulación y análisis de la estructura se realizaron por etapas. En primer lugar, la estructura fue modelada tal como construida, considerando los cables de postensado mediante la inserción de sus cargas equivalentes. En esta etapa se buscó reproducir el comportamiento y los esfuerzos actuantes en la estructura. Concluida esta fase, en la siguiente etapa se incorporaron las cerchas, las vigas y los pilares metálicos al modelo, repitiéndose el procesamiento para cada ajuste de rigidez de las barras hasta que los esfuerzos en los elementos no se alteraran significativamente. Finalizado el análisis iterativo, se procedió a la tercera etapa, que consistió en la consideración del postensado externo ascendente con desviadores en la cara inferior de las losas. La inclusión de ese refuerzo fue realizada mediante la aplicación directa de fuerzas verticales ascendentes en la malla del modelo. La definición de la cantidad de cables y elementos de refuerzo fue realizada a partir del ajuste de las flechas de las losas en el modelo, con el objetivo de llevarlas a los límites aceptables establecidos en las normativas. Durante este ajuste también se evaluaron los esfuerzos en los elementos metálicos de refuerzo, realizando ajustes en sus dimensiones, cuando fue necesario.

Finalmente, considerando los elementos metálicos de refuerzo y el postensado externo, se evaluaron los esfuerzos en las losas, vigas y pilares, confrontando los esfuerzos actuantes con los esfuerzos resistentes. Cuando los esfuerzos solicitantes superaban la capacidad resistente de las armaduras originalmente instaladas en los elementos, se calculó el complemento de armadura mediante la inserción de elementos de fibra de carbono.

En estas simulaciones también se utilizó el software Adapt Floor Pro 2018. Algunos de los resultados de estos modelos se presentan en este artículo, después de la exposición de las soluciones de refuerzo aplicadas.

2.3 Refuerzo con estructura metálica en la losa del nivel de planta baja

En el caso del subsuelo de la edificación (losa del nivel de planta baja), dado que este nivel está destinado a garajes, la altura libre es menor y, por tanto, no permitía el uso de cerchas ni postensado externo. El refuerzo proyectado para esta losa contempló la colocación de nuevos pilares, con fundaciones mediante pilotes de hormigón hincados. En los pilares existentes y nuevos, se instalaron perfiles de acero conectados a través de placas insertadas en la losa, garantizando así el funcionamiento como viga mixta, dimensionada de acuerdo con la ABNT NBR 8800:2008, y considerando el estado de carga existente, según Sarkis (2001). En la Figura 4 se presenta parte de la nueva distribución de pilares y vigas de acero en el subsuelo de la edificación. En esta figura también se observan las mantas de fibra de carbono adheridas para suplir la falta de armaduras pasivas en la losa.

Las vigas fueron puestas en carga mediante un proceso de izado (macaqueo) contra la losa del nivel de planta baja, utilizando la propia flexibilidad de la viga como elemento de activación. Se colocaron calzos formados por chapas y láminas de acero entre la viga de acero deformada y las placas insertadas en la losa. Al liberar el sistema de macaqueo, las vigas tendían a retornar a su posición indeformada, reaccionando contra la losa y recibiendo parte de la carga. En la Figura 5 se ejemplifica la ejecución del sistema de macaqueo.

Los pilotes hincados se ejecutaron inicialmente como pilotes excavados, utilizando equipos de pequeño porte, compatibles con la altura libre reducida del pie derecho del subsuelo. Una vez agotada la capacidad de excavación del equipo, el pilote se concretaba y se finalizaba la hinca con gatos hidráulicos hasta alcanzar la resistencia necesaria para un pilote tipo “mega”, conforme a la ABNT NBR 6122:2019. En la Figura 6 se presenta el proceso de prensado de uno de los pilotes de fundación que soporta los pilares metálicos.



Figura 4. Pilares y vigas metálicas del refuerzo en el subsuelo.



Figura 5. Operarios realizando el macaqueo de una de las vigas metálicas del refuerzo en el subsuelo.



Figura 6. Prensado de un pilote de fundación.

2.4 Refuerzo con postensado externo en las losas de los demás niveles

2.4.1 Cerchas metálicas postesadas

En los niveles superiores, el proyecto arquitectónico preveía un cielo raso falso con espacios de 90 cm a 110cm destinados al paso de instalaciones. Este espacio fue aprovechado para la colocación de cerchas de acero, siguiendo la posición de los cables concentrados del proyecto estructural original.

Una cercha tradicional adecuada para los vanos y cargas actuantes, pero limitada por la altura disponible entre el cielo raso falso y la losa, resultó inviable debido a los costos y dimensiones de las secciones necesarias. La solución adoptada fue soldar y empotrar el cordón superior de la cercha a la losa, haciendo que funcionara como una cercha mixta. De este modo, la losa pasó a desempeñar el papel de cordón comprimido. La Figura 7 presenta una de las cerchas empotradas a la losa superior, que pasó a funcionar como cercha mixta.

De forma similar a lo hecho con las vigas del nivel de planta baja, las cerchas fueron puestas en carga mediante el proceso de macaqueo contra la losa superior. Al liberar los gatos, las cerchas tendían a retornar a su posición indeformada, reaccionando contra la losa y recibiendo parte de su carga.

En el cordón inferior, la fuerza de tracción fue mitigada mediante el uso de postensado horizontal junto a la cara inferior de la cercha. En algunas cerchas se añadió postensado externo en el centro del vano con cables inclinados. La Figura 8 ilustra el postensado del cable horizontal, reforzando el cordón traccionado.



Figura 7. Cerchas metálicas en la región del auditorio (losa del piso del segundo nivel).



Figura 8. Aplicación del postensado en la cercha con gato hidráulico.

2.4.2 Protensão externa com desviadores

Perpendicularmente a las cerchas metálicas, se ejecutó el postensado externo de las losas. Este postensado consistió en cables con anclaje pasivo fijado a la losa junto al cordón superior de las cerchas, y anclaje activo en desviadores instalados en el vano de la losa, con el fin de facilitar el uso de los gatos de postensado. Para la definición del espaciamiento de estos cables de postensado externo, el modelo estructural fue alimentado iterativamente con cargas externas correspondientes al trazado de cada tipo de cable, hasta que las tensiones en los bordes de las barras de la discretización en malla quedaran dentro de los límites normativos de tensión. La Figura 9 ejemplifica el postensado externo de las losas.



Figura 9. Postensado externo en la losa de cubierta del auditorio.

2.5 Refuerzo con manta de fibra de carbono.

Como armadura pasiva positiva, en la cara inferior de las losas, el proyecto estructural original contemplaba una malla a lo largo de toda la extensión Q196 (malla cuadrada, con barras de 5 mm de diámetro espaciadas cada 10 cm, resultando en un área de acero de $1,96 \text{ cm}^2/\text{m}$), lo que condujo a un área de acero inferior al mínimo requerido para un espesor de losa de 25 cm. Para completar la resistencia de la sección con el área mínima, se proyectó un refuerzo con manta de fibra de carbono, dispuesta en la dirección de los cables distribuidos. En la dirección ortogonal, la malla de armadura pasiva del proyecto original era suficiente, ya que la ABNT NBR 6118:2014, norma vigente en el momento del desarrollo del proyecto estructural, reducía a la mitad el área mínima de armadura en la dirección secundaria de las losas. En la Figura 10 se presenta el conjunto de mantas de fibra de carbono utilizadas en la losa del segundo nivel.



Figura 10. Mantas de fibra de carbono aplicadas en la losa del segundo nivel.

Este tipo de refuerzo con manta de fibra de carbono adherida en la cara inferior fue aplicado en las losas de los distintos niveles de la edificación.

2.6 Refuerzo con lámina de fibra de carbono insertada

En algunas regiones de la losa, donde el análisis indicó la actuación de momentos flectores negativos, principalmente sobre las cerchas metálicas instaladas, fue necesario añadir armaduras negativas. En estos casos, se dio preferencia al uso de láminas insertadas de fibra de carbono (*cut in*), tal como se ilustra en la Figura 11.



Figura 11. Ejemplo de aplicación de la fibra de carbono insertada (*cut in*).

Este refuerzo con láminas insertadas de fibra de carbono fue aplicado en las losas del segundo, tercer y cuarto nivel de la edificación.

2.7 Refuerzo de los pilares de hormigón

El análisis estructural también indicó la necesidad de reforzar algunos pilares de la estructura. Se adoptaron dos tipos de refuerzo. En los pilares circulares se añadieron, en sentido longitudinal, perfiles metálicos en forma de T, solidarizados al hormigón mediante adhesivo epóxico estructural, como se muestra en la Figura 12. En cambio, en los pilares rectangulares del nivel subterráneo, los refuerzos consistieron en mantas de fibra de carbono adheridas transversalmente (confinando) y ángulos metálicos adheridos longitudinalmente a lo largo de las aristas, tal como se muestra en las Figuras 13 y 14.



Figura 12. Refuerzo de pilar circular con perfiles metálicos.



Figura 13. Ángulos de refuerzo adheridos en pilar rectangular.



Figura 14. Mantas de fibra de carbono adheridas, confinando pilar rectangular.

2.7 Análisis estructural de los refuerzos metálicos

Previo a la ejecución de los refuerzos y a la fabricación de las cerchas y elementos metálicos, se realizó el análisis de los refuerzos con postensado externo (cerchas y cables con desviadores) para las losas de los niveles. Dicho análisis se llevó a cabo en el software Adapt Floor Pro 2018.

Los nuevos cargamentos utilizados en los análisis, la posición de las cerchas de refuerzo y la ubicación de las vigas de postensado externo fueron indicados por el proyectista del refuerzo estructural e incorporados al programa.

Para la modelación se consideró:

- a) Con el objetivo de simular las cerchas de refuerzo, se introdujeron en el modelo vigas de hormigón con rigidez equivalente a las cerchas metálicas;
- b) Los cargamentos debidos al refuerzo con cerchas metálicas y desviadores fueron introducidos en el programa como cargas puntuales en puntos específicos, con sentido contrario al peso propio de la losa (hacia arriba), para simular el efecto del refuerzo;
- c) El peso propio de las vigas de hormigón fue excluido de los análisis. Se modelaron las vigas considerando los extremos como articulados respecto al eje de mayor inercia de la sección transversal. También se liberó la rotación en torno a su eje longitudinal, permitiendo así que la losa trabajara sin restricciones;
- d) Las combinaciones de carga adoptadas en el análisis siguieron los lineamientos de la ABNT NBR 6118:2014, como se detalla a continuación:
 - Esfuerzos (ELU): 1,4 PP + 1,4 SC + 1,0 Hiperestáticos + 1,0 Refuerzo
 - Flechas elásticas (ELS – Combinación Cuasi Permanente): 1,0 PP + 1,0 Postensado + 0,4 SC + 1,0 Refuerzo
- e) También se consideraron, para visualización de los desplazamientos con fines de verificación, otras dos combinaciones:
 - Flechas elásticas (Refuerzo + PP losa): 1,0 Peso Propio + 1,0 Refuerzo;
 - Flechas elásticas (Refuerzo + PP losa + Postensado): 1,0 Peso Propio + 1,0 Postensado + 1,0 Refuerzo

En este artículo se presentan los resultados del análisis únicamente para la losa del segundo nivel, correspondientes al momento flector y a las flechas. En la Figura 15 se muestran las curvas de isovalores del momento flector en la losa en la dirección y (M_{xx} representa el momento que causa flexión en torno al eje x, es decir, el momento en la dirección y).

Por su parte, la Figura 16 presenta las curvas de isovalores de los desplazamientos verticales en la losa (en mm) para las diferentes combinaciones de carga.

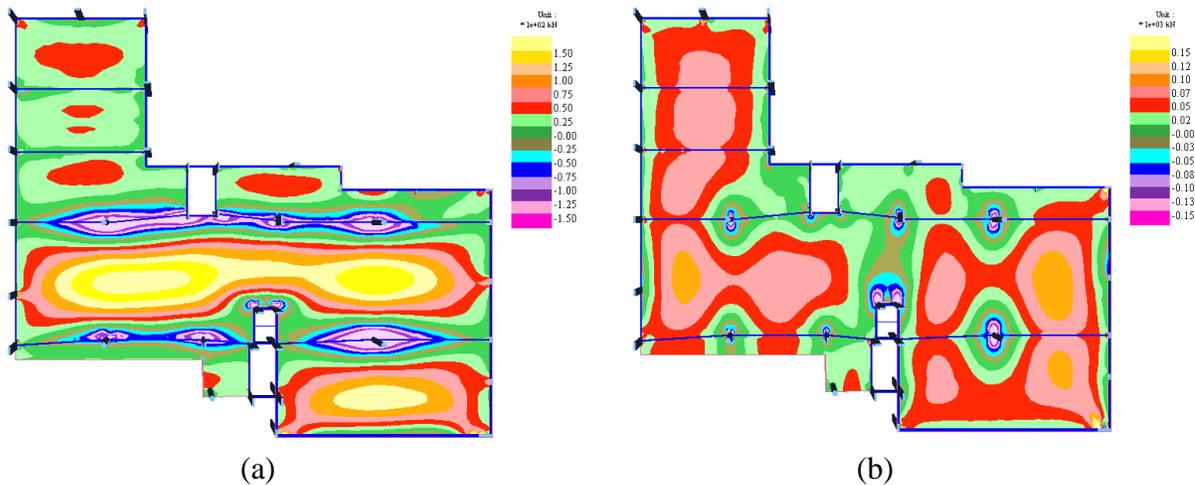


Figura 15. (a) Momentos flectores, M_{xx} , en 10^2 kN.m/m, en la dirección y (vertical); (b) Momentos flectores, M_{yy} , en 10^2 kN.m/m, en la dirección x (horizontal).

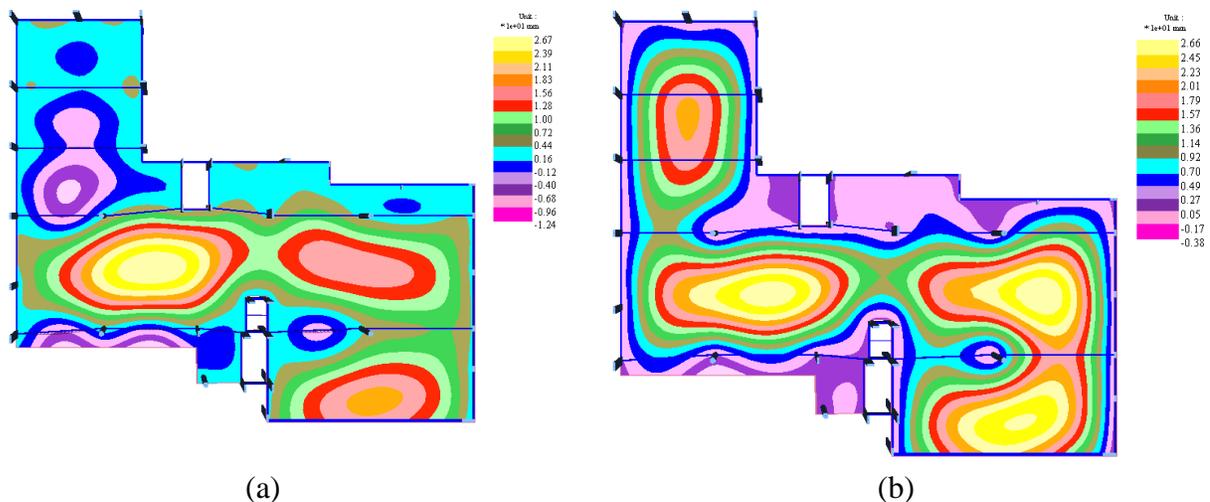


Figura 16. (a) Desplazamientos verticales en 10^1 mm, para la combinación casi permanente (flecha inmediata); (b) Desplazamientos verticales en 10^1 mm, considerando las cargas del peso propio de la losa + refuerzo con postensado externo (flecha inmediata).

Como se puede observar en el resultado de los análisis, los refuerzos metálicos con postensado externo contribuyeron de forma significativa a la reducción de los valores de momento flector en las losas, así como a la disminución de los desplazamientos verticales (flechas), llevándolos a valores dentro de los límites recomendados por la ABNT NBR 6118:2014.

2.8 Pruebas de Carga

A pesar de que la estructura con los refuerzos fue modelada numéricamente y de que el comportamiento observado durante la ejecución de los refuerzos fue coherente con los resultados

obtenidos en los modelos, se optó por realizar pruebas de carga en las losas para certificar la seguridad de la estructura reforzada. En total, se llevaron a cabo 17 pruebas de carga en los diferentes niveles, siguiendo las prescripciones de la ABNT NBR 9607:2019, tal como se ejemplifica en la Figura 17.

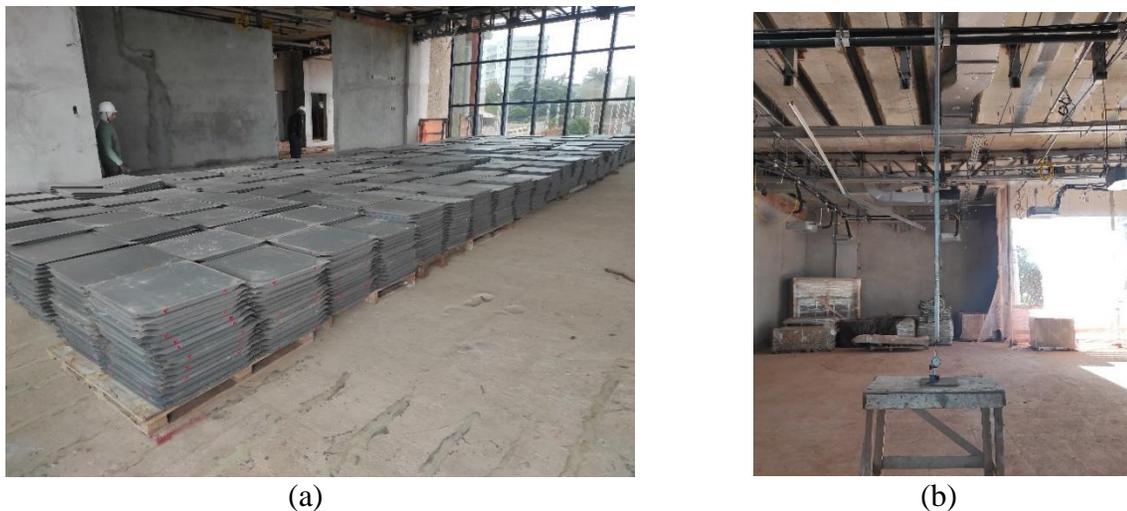


Figura 17. (a) Prueba de carga en una losa del segundo nivel (carga realizada con placas de piso elevado); (b) Dispositivo para medición de la flecha, en un punto definido en el modelo estructural.

La determinación del área a cargar y de la cantidad de carga aplicada en cada región fue realizada de modo que se reprodujeran en las losas los esfuerzos solicitantes equivalentes a los obtenidos en el Estado Límite Último (ELU). En la Figura 18 se ejemplifica la planta con el plan de pruebas de carga de las losas del tercer nivel. Estas pruebas de carga no fueron realizadas de forma simultánea. Las etapas de las pruebas de carga consistieron en la instalación del sistema de medición de deformaciones con las losas descargadas, el cargado progresivo de las áreas en incrementos del 25% por etapa, con la medición de deformaciones hasta su estabilización, prosiguiendo hasta alcanzar la carga total. La carga total fue mantenida durante 60 horas, con lecturas de deformación realizadas inmediatamente después de alcanzar la carga total, y luego a las 24, 48 y 60 horas. Finalmente, se realizó el descargue, con medición de deformaciones al 50% de la carga y después con la descarga total. La medición de las deformaciones residuales fue realizada inmediatamente después de la descarga y nuevamente a las 4 horas. Se destaca que la deformación de las losas fue medida en el centro del área cargada y en uno de los bordes, a lo largo del lado mayor, para determinar la deformación de la losa por la diferencia entre ambas lecturas. En la Tabla 1 se ejemplifican los resultados de la medición de la prueba de carga 1 en las losas del tercer nivel.

Tabla 01. Resultados de la prueba de carga 1 del tercer nivel.

PC1						
Área de la losa		75.00 m ²				
Carga total		29.9 tf				
Flecha límite según norma		42.8 mm				
Lectura inicial (cero de carga)		0.0 mm				
Hora	Día	Carga	Medición (mm)	Medición Viga (mm)	Diferencia (mm)	Observación
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 después de la descarga

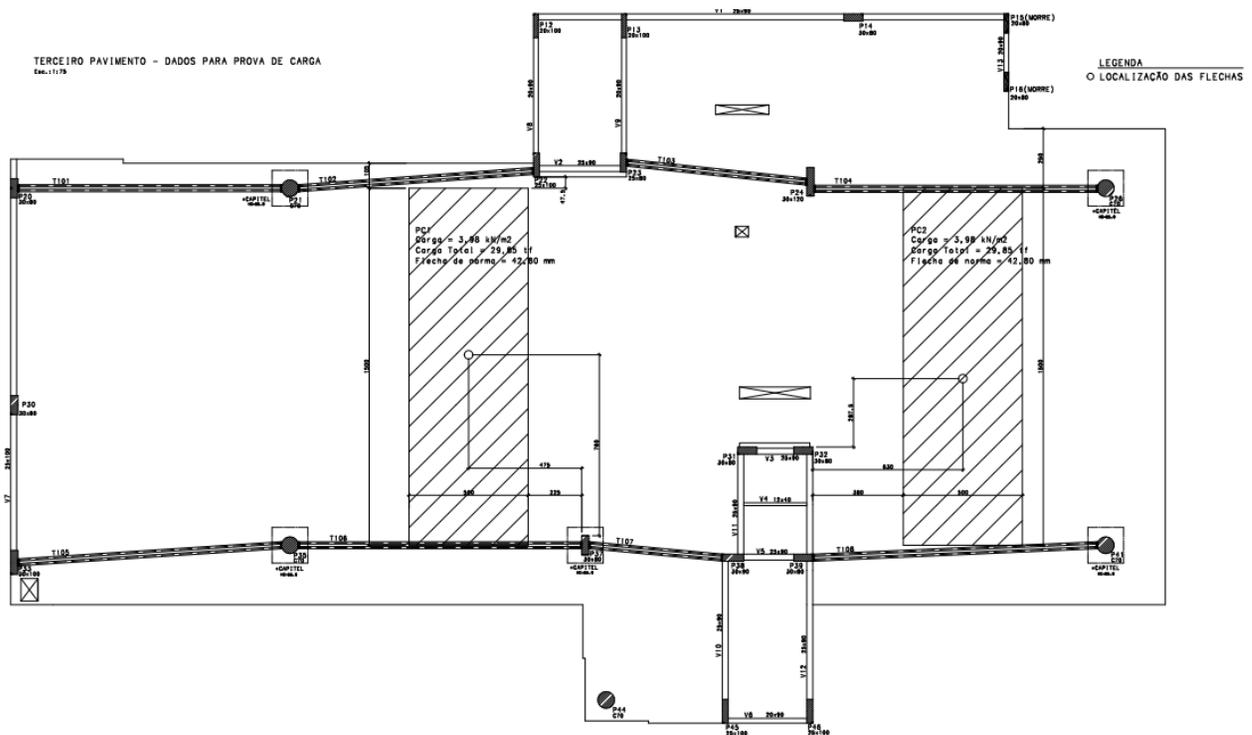


Figura 18. Plano de pruebas de carga en las losas del tercer nivel.

Los resultados de las pruebas de carga en el nivel de planta baja, reforzado con nuevos pilares y vigas mixtas, fueron muy favorables. Las deformaciones quedaron por debajo de lo previsto en el cálculo o del límite normativo, en torno al 20% de lo calculado. En los niveles con refuerzos metálicos con postensado externo, las flechas alcanzaron hasta un 30% de lo previsto. En la losa de cubierta del depósito de agua, que fue reforzada únicamente con fibra de carbono, sin elementos metálicos ni postensado, se observaron deformaciones que representaban el 90% de lo calculado. Es importante aclarar que esas flechas durante la prueba de carga se deben al cargamento aplicado en la prueba y no a las flechas acumuladas con las ya existentes en las losas. La determinación de las flechas totales no fue posible en algunos elementos debido a las variaciones de deformación sufridas por los elementos expuestos a la radiación solar directa (losas mayores del segundo nivel

y losas de la cubierta). En esos elementos, las deformaciones variaban en algunos centímetros a lo largo del ciclo diario por efecto de la insolación, lo que corrobora la afirmación de que estos elementos originalmente no disponían de la rigidez necesaria para el funcionamiento estructural adecuado.

Del mismo modo, la instalación de los refuerzos no tuvo como objetivo “eliminar” las flechas de las losas, sino simplemente reducirlas a los límites aceptables establecidos por la norma (ABNT NBR 6118:2014). La división de los grandes paños continuos de losa de cada nivel en elementos más pequeños se hizo por una cuestión de identificación y nomenclatura. La continuidad de los paños de losa provocaba que la disminución de las deformaciones en una región muchas veces resultara en el aumento en otras, haciendo que el proceso de ajuste de los refuerzos fuera complejo e iterativo.

3. CONSIDERACIONES FINALES

Al finalizar los trabajos de refuerzo de la estructura, se preservaron los principales aspectos y espacios previstos en el proyecto arquitectónico.

La evaluación de la estructura reforzada, tanto a través de modelos numéricos como mediante pruebas de carga, indica que las soluciones adoptadas cumplieron con el desempeño estructural requerido. Actualmente, la estructura se encuentra en uso, sin registro de anomalías. Aun así, se han realizado inspecciones periódicas con el fin de verificar el comportamiento estructural del conjunto.

Este comportamiento adecuado de la estructura solamente fue posible gracias a la combinación de diferentes técnicas de refuerzo aplicadas, junto con el seguimiento constante del comportamiento en comparación con los modelos numéricos desarrollados.

4. REFERENCIAS

- 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*”. 3º Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.