



Protensão Externa, Fibra de Carbono e Treliça Protendida em Laje Cogumelo

**Jorge Martins Sarkis, Paulo Jorge Sarkis, Cássio Henrique Brasil, Mateus Rigon Moro,
Thiago Mottecy Piovezan, Leonardo Borges Vargas, Felipe Pienis Adams¹**

¹ Sarkis Engenharia Estrutural / contato@sarkisengestrutural.com.br

Resumo

Na fase de execução de uma obra para uso comercial, foi detectada a necessidade de reforçar a estrutura devido a inconsistências no projeto estrutural original. A estrutura original foi concebida em laje cogumelo ou laje lisa protendida com pilares circulares com alguns capitéis e vãos variáveis de até 17 metros. O projeto de reforço consistiu em aproveitar o espaço livre até o teto rebaixado, previsto no projeto arquitetônico, para colocar treliças de aço simplesmente apoiadas nos pilares e solidárias com a laje, tipo treliça mista. Dessa forma, foi mobilizada a resistência à compressão do concreto no banzo comprimido. Para o banzo inferior, tracionado, foram projetados cabos protendidos, permitindo, assim, que as treliças fossem leves e compatíveis com o espaço disponível. Ancorados nessas treliças e nas vigas de periferia, foram projetados cabos de protensão que, com desviadores na parte central, aplicavam carga de baixo para cima até compatibilizar as solicitações resultantes com a resistência da estrutura original. Mantas coladas e lâminas inseridas de fibra de carbono foram dimensionadas para completar a necessidade de armadura passiva positiva e negativa, respectivamente. Como foram detectadas, durante os trabalhos, diferenças entre o projeto original e a obra real, optou-se por aplicar prova de carga por regiões da obra, após a conclusão dos reforços. A prova de carga seguiu o critério da ABNT NBR 9607 (ABNT, 2019). Os resultados foram monitorados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria e todos os resultados de deformações ficaram bem abaixo dos limites da norma e dos valores teóricos determinados no modelo analisado.

Palavras-chave

Reforço estrutural; Protensão externa em lajes; Treliça protendida; Fibra de carbono; Laje cogumelo protendida, Prova de carga.



Introdução

Um moderno projeto arquitetônico destinado à sede regional de uma organização bancária previa grandes espaços livres em todos os quatro pavimentos. No pavimento subsolo, destinado à garagem, o pé direito convencional não comportava o uso de vigas muito altas. Nos pavimentos superiores, as distâncias entre lajes previam forro rebaixado para permitir a passagem de instalações, especialmente para ar-condicionado, e um pé direito livre bem elevado na obra pronta.

A estrutura original foi concebida em laje lisa protendida, sem vigas, apoiada em pilares com e sem capitéis. Ao final da construção, com a estrutura praticamente concluída, começaram a aparecer patologias caracterizadas por grandes flechas e fissuras.

Duas consultorias contratadas pela construtora e uma contratada pelo proprietário da obra identificaram insuficiência no projeto estrutural e a necessidade de se proceder um reforço para continuidade da obra e uso do prédio. Também foi recomendado e executado um escoramento emergencial para interromper a progressão dos danos e o acesso seguro para os serviços de investigação e reforço. Três propostas abrangentes de reforço foram analisadas pela consultoria especializada do proprietário, considerando custos e atendimento do projeto arquitetônico original.

A solução escolhida e executada combinou vários recursos de reforço estrutural, compatíveis com a morfologia de cada região da obra e com o projeto estrutural original.

A foto da Figura 1 mostra a combinação de treliças, protensões externas e mantas de fibra de carbono usadas no reforço da estrutural.



Figura 1 – Foto dos cabos e desviadores para protensão externa da laje

Projeto Estrutural Existente

O projeto original se desenvolvia com o modelo clássico de laje protendida de entrepiso sem vigas. Em planta baixa, o prédio apresentava uma forma retangular preponderante muito alongada com retângulos laterais no subsolo e no térreo. A cablagem principal estava disposta paralela ao lado maior do retângulo principal e apoiada nos pilares espaçados. No sentido ortogonal se desenvolviam os cabos distribuídos em toda a superfície e apoiados na cablagem principal. A Figura 2 reproduz parte de um dos pavimentos (cobertura do térreo na região do auditório) bem representativo dos demais pavimentos.

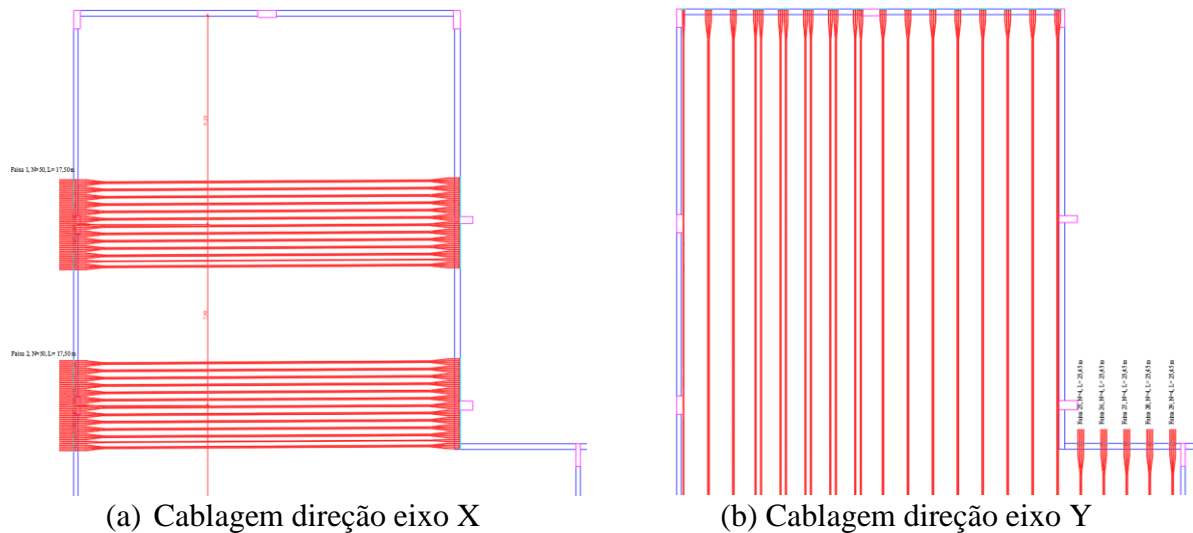


Figura 2 – Planta do projeto original - trecho de cobertura do auditório.

No desenvolvimento do modelo estrutural pelo programa MIX (2011) para análise da estrutura original e do efeito dos reforços aplicados posteriormente, todas as protensões, existentes ou novas, foram consideradas como carregamento externo. A carga externa foi considerada conforme a NBR 6120 (ABNT, 2019). O traçado de cada cabo do projeto original (cordoalha de 12.7 em bainha engraxada CP 190 RB) foi dividido em trechos entre pontos de inflexão. Em cada trecho foi aplicada carga na estrutura de acordo com o comprimento do trecho (corda) e o afastamento do ponto central (flecha), conforme apresentado na Figura 3, como o procedimento apresentado por SARKIS (2016). Como a protensão original já tinha mais de dois anos quando foi aplicado o reforço, a protensão original de 15 tf por cabo foi considerada com 12 tf levando em conta, simplificada, o conjunto das perdas.

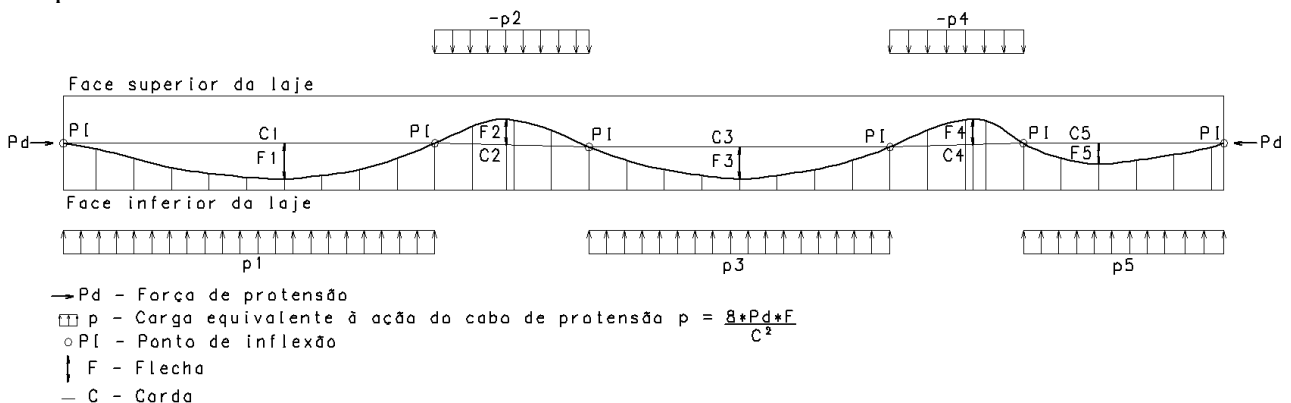


Figura 3 – Reprodução de trecho do traçado de um cabo original.

Como armadura passiva, o projeto original contemplava uma malha positiva em toda a extensão Q196 da Gerdau, que resultou em seção inferior à mínima para a espessura de 25 centímetros da laje. Para completar a resistência da seção mínima foi projetado reforço com manta de fibra de carbono com a qualidade apresentada em S.P. CLEVER BRASIL LTDA (2016) disposta na direção da cablagem distribuída, considerada direção principal. Na direção ortogonal, a malha de armadura passiva do projeto original era suficiente, pois a NBR 6118 (ABNT, 2014) reduz pela metade a armadura mínima na direção secundária das lajes.

A foto da Figura 4 mostra o conjunto de mantas de fibra de carbono utilizado na laje do quarto pavimento.

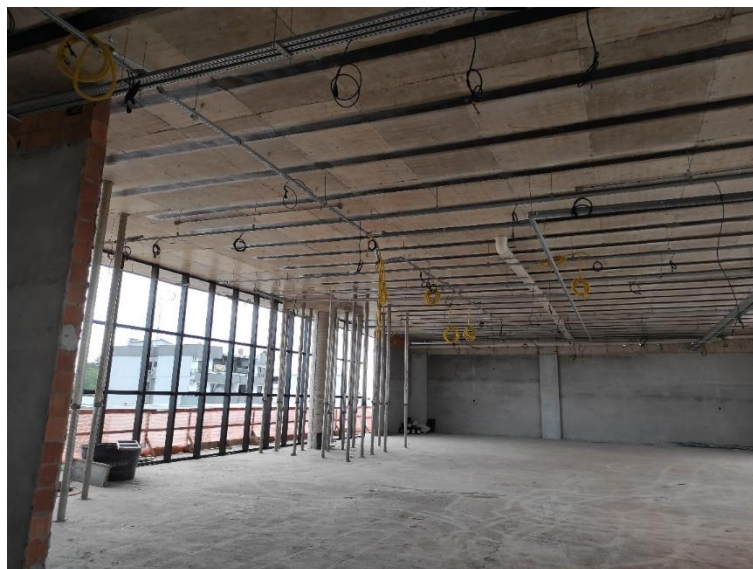


Figura 4 – Foto ambiental mostrando as mantas aplicadas.

Reforço do Térreo, Área do Subsolo

Como o subsolo é destinado à garagem, o pé direito era menor e não comportava treliças e protensão externa. O reforço projetado previu a colocação de novos pilares, com fundação em estacas mega. Nos pilares existentes e novos, foram colocados perfis de aço conectados com placas chumbadas na laje, garantindo o funcionamento de viga mista conforme NBR 8800 (ABNT, 2008) e considerando o estado de carregamento já existente conforme SARKIS (2001).

A foto da Figura 5 mostra a nova distribuição de pilares e viga de aço do subsolo.



Figura 5 – Foto ambiental mostrando pilares e vigas metálicas do subsolo.

As estacas mega 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 a NBR 6122 (ABNT, 2019).



A foto da Figura 6 mostra o esquema de cravação e acompanhamento de uma estaca mega.



Figura 6 – Foto mostrando a cravação de uma estaca.

Reforço com Treliças Mistas Protendidas

Nos pavimentos superiores, o projeto arquitetônico previa forro falso com espaços de 90 cm a 110 cm para passagem de instalações. Esse espaço foi aproveitado para colocação de treliças de aço acompanhando a posição da cablagem principal 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 pelo programa desenvolvido pela STABILE ENGENHARIA LTDA.

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 foto da Figura 7 mostra a treliça chumbada na laje superior, passando a funcionar como laje mista.



Figura 7 – Foto ambiental mostrando as treliças sobre o auditório.



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.

Na foto da Figura 8 está ilustrada a protensão do cabo horizontal reforçando o banzo tracionado.



Figura 8 – Foto mostrando macaco aplicando protensão na treliça.

Projeto com Protensão Externa de Lajes

Acompanhando a cablagem distribuída ortogonal do projeto original, foram projetadas várias linhas de cabos com desviadores afastados da laje no centro do vão ou nos terços do vão. Esses cabos tinham ancoragem passiva das extremidades nas treliças e nas laje ou nas vigas de concreto da periferia. Na outra extremidade, a ancoragem ativa, era nos desviadores, para facilitar o manuseio dos macacos. 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 foto da Figura 9 está ilustrada a aplicação da protensão externa com um desviador.

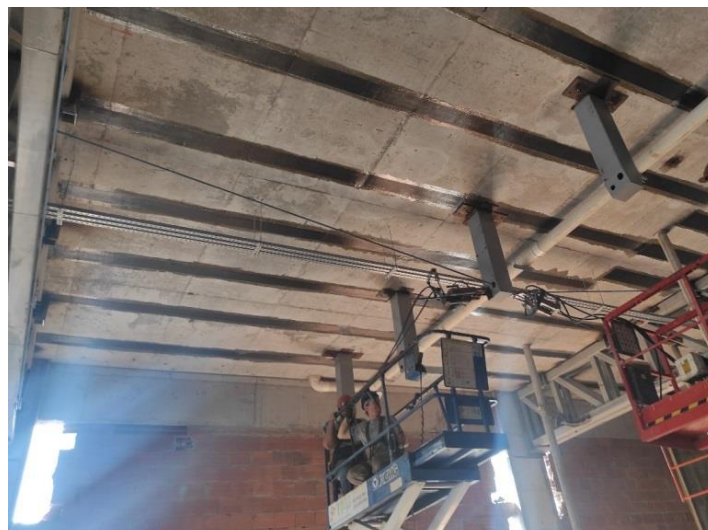


Figura 9 – Foto mostrando a aplicação da protensão externa com um desviador.



Na foto da Figura 10 está ilustrada a aplicação da protensão externa com dois desviadores.

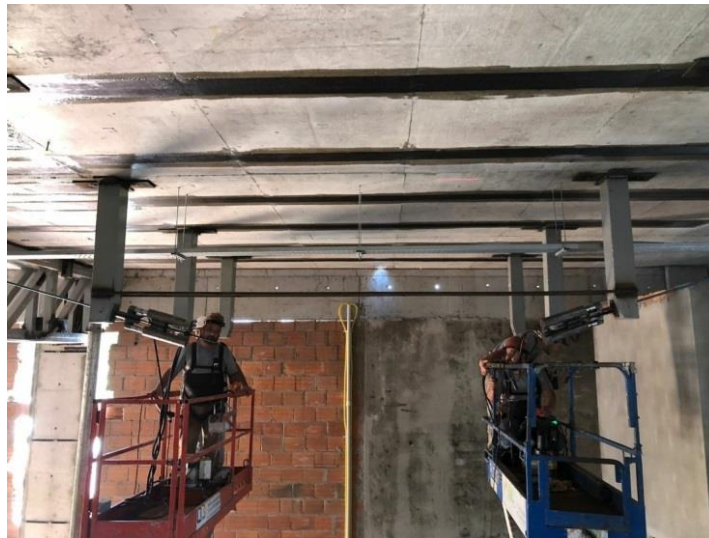


Figura 10 – Foto mostrando a aplicação da protensão externa com dois desviadores.

Reforço com Fibra de Carbono

A armadura passiva original era uma malha soldada. Como a sua seção era inferior à mínima especificada em norma, foi feito um reforço geral na armadura positiva em uma direção, lembrando que na direção transversal das lajes a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite a redução da seção mínima. O reforço foi feito com manta de fibra de carbono em resistência equivalente.

Além de completar a armadura mínima da norma, foi considerada também a resultante das tensões de tração nos locais onde a armadura mínima não era suficiente (Ver figura 4).

Em alguns trechos, sobre as treliças, foi necessário reforçar ou colocar armadura negativa. Nesses casos deu-se preferência para o uso de lâminas inseridas de fibra de carbono, como está ilustrado na foto da Figura 11.



Figura 11 – Foto mostrando colocação de fibra inserida.



Prova de Carga

Durante a execução dos reforços foram identificadas algumas situações em que o cabo original estava fora de posição, muito próximo das faces da laje. Essa situação provocou a necessidade de alguns cuidados extras na execução dos reforços. Ao final, para superar essas indefinições sobre a estrutura real original, optou-se por realizar dezessete provas de carga de acordo com a recente norma NBR 9607 (ABNT, 2019), como está ilustrado nas fotos das Figuras 12 e 13.

Na Figura 12 o carregamento obtido com placas de piso elevado.



Figura 12 – Foto do carregamento de uma laje.

Na Figura 13 o dispositivo para medição das flechas no ponto definido no modelo estrutural.



Figura 13 – Foto do defletômetro.



Os resultados da prova de carga do térreo, reforçada com novos pilares e vigas mistas, foram muito favoráveis. As deformações ficaram bem abaixo do calculado ou do limite da norma, em torno de 20% do calculado, resultando inclusive na redução do número de prova de carga inicialmente projetado. Nos pavimentos com protensão externa as flechas chegaram até 30% do calculado. Na cobertura da área técnica, que foi reforçada apenas com fibra de carbono, chegou a 90% do calculado.

Conclusão

Ao final foram preservados os principais aspectos e espaços previstos no projeto arquitetônico. As avançadas marquises externas e as pérgolas foram totalmente reprojatadas em estrutura de aço revestida ACM.

As fotos do auditório com as treliças e cablagem antes da conclusão e depois do acabamento dão uma ideia do resultado. As fotos 14, 15 e 16 ilustram o atendimento da arquitetura da obra.



Figura 14 – Foto do teto do auditório antes do forro falso.



Figura 15 – Foto do teto do auditório depois do forro falso



Figura 16 – Foto da marquise de aço depois de revestida

Referências

MIX, Sistema de Análise Estrutural – Manual de uso – São Paulo – 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 6120 – Carga para Cálculo de Estruturas de Edificações, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 6122 - Projeto e Execução de Fundações, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 9607 – Prova de Carga Estática em Estruturas de Concreto – Requisitos e Procedimentos, 2019.

SARKIS, P. J. – Recuperação e Reforço de Pontes com Protensão Externa. 2016. Acessado em 1º de março de 2023. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=dF1vhR7Hxbo&list=PLMAtwHzjmH0C_AsAIYJ3CDsnZoWkXXwDh>

SARKIS, J. M. – Vigas Reforçadas Sob Carregamento: Um Método para Simulação Matemática – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – 2001.

S.P. CLEVER BRASIL LTDA – Reinforcement ARMO Flexion EC Fr Manuel d'Utilisation – São Paulo, 2016.

STABILE ENGENHARIA LTDA – Manual “on line” do mCalc 3D 5.0 – Disponível em <https://www.stabile.com.br/manuais/mCalc%203D%205.pdf>.