

ANÁLISE DE LAJE PROTENDIDA A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO DE CABOS

ÍTALO LINHARES SALOMÃO^{1*}, ÍCARO RODRIGUES MARQUES²

¹Mestre em Estruturas Prof. Titular, UNIFOR, Fortaleza-CE, italosalomao@unifor.br;

²Graduando em Engenharia Civil, UNIFOR, Fortaleza-CE, icarormarques22@gmail.com;

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017
8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil

RESUMO: Sistemas estruturais em laje lisa, em alguns casos, necessitam da protensão para tornarem a solução viável, sendo aplicados esforços de compressão no sistema e balanceando o carregamento externo. O comportamento estrutural de elementos protendidos pode variar de acordo com o traçado e a distribuição dos cabos em planta. O presente estudo realiza análises comparativas entre possíveis disposições de armaduras ativas, propondo três disposições de cabos: concentrados, distribuídos nos eixos x e y e concentrados em uma das direções e distribuídos na outra. As disposições são analisadas quanto a sua eficiência e economia, onde o modelo idealizado foi um sistema de laje retangular em concreto, protendido por cabos não aderentes. Analisando-se o sistema pelo método dos elementos finitos avaliou-se os estados limites último e de serviço, com base na NBR 6118:2014, gerando uma análise comparativa do comportamento estrutural. Concluiu-se que o modelo de cabos concentrados em uma das direções e distribuídos na outra apresentou maior eficiência quanto ao comportamento estrutural quando comparado aos outros.

PALAVRAS-CHAVE: Laje Protendida. Distribuição dos Cabos. Protensão.

ANALYSIS OF PRESTRESSED SLAB FROM CABLE DISTRIBUTION

ABSTRACT: Structural systems of flat slabs, in some cases, require the post-tension to make the solution viable, applying compressive stresses in the system and balancing the external loading. The structural behavior of post-tensioned elements can vary according to the layout and profile of the tendons. This study makes comparative analyzes of possible arrangements of prestressed armor, proposing three tendon arrangements: concentrated, distributed on the x and y axes and concentrated in one direction and distributed in the other. The layouts are analyzed regarding their efficiency and economy, where the idealized model is a rectangular slab system in concrete, prestressed by non-adherent cables. Analyzing the system by the finite element method, the final state and the service state were evaluated based on NBR 6118:2014, resulting in a comparative analysis of the structural behavior. In conclusion, the model of cables concentrated in one direction and distributed in the other showed to be more efficient in structural behavior when compared to the others.

KEYWORDS: Prestressed Slab, Distribution of Tendons. Prestressing.

INTRODUÇÃO

O processo de protensão vem ganhando um destaque mais elevado nas últimas décadas, pois este possibilita atender algumas condições de projeto que, para um processo convencional utilizando armaduras sem protensão, torna-se oneroso e às vezes inviável. Essa solução é definida por Pfeil (1980) como um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob diversas condições de carga. Passa-se então a realizar essa solução em estruturas mais requeridas.

Dentro do estudo do concreto protendido, pode-se também observar a grande variação de eficiência e conseqüentemente econômica adquirida a partir da simples mudança de distribuição e traçado longitudinal da armadura ativa. Neste trabalho será visto as alterações na eficácia da estrutura entre três tipos de disposição dos cabos em uma laje, distribuídos nas duas direções, concentrado nas duas direções, ou ambas as soluções mescladas.

MATERIAIS E MÉTODOS

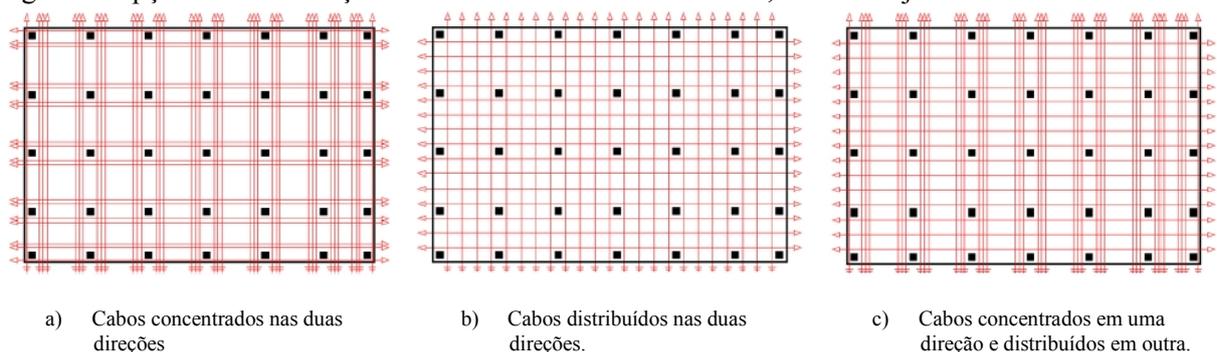
Os cabos aderentes consistem em um tubo previamente corrugado, preenchido por cabos e nata de cimento após a protensão, tornando-o aderente ao concreto. Esses cabos trabalham diretamente ligados ao concreto, o que em caso de rompimento, faz com que a força de protensão não se dissipe totalmente do elemento. As monocordoalhas engraxadas por sua vez consistem em um conjunto de fios inseridos em uma bainha plástica engraxada com o objetivo de diminuir o atrito existente. Este método apresenta facilidade quanto à manutenção e execução por ser flexível e leve, além de possibilitar o recabeamento e conseqüente reprotensão para o caso de rompimento. Para o estudo optou-se pela análise das distribuições de cabos não aderentes.

Moura (2002) diz que para efeito de cálculo, podem ser utilizados dois métodos de esforços em estruturas protendidas: método indireto, baseado na representação da protensão através de uma carga equivalente; o método direto: protensão como um conjunto de esforços solicitantes iniciais.

Para o primeiro método supracitado, T.Y. LIN (1981) expõe uma porcentagem ideal a se balancear, para que, toda a carga excedente, seja absorvida pela armadura passiva. Aalami (2003) indica um percentual de balanço entre 60% e 80% da carga permanente em lajes, e entre 80% e 110% em vigas.

Em lajes, além do perfil do cabo, outro fator importante a ser discutido é sua disposição ao longo da superfície. A configuração pode ser feita de duas maneiras, distribuída na laje (espaçada a um valor mínimo calculado a partir da compressão mínima a ser utilizada para admitir o concreto protendido), ou concentrada. Esses dois métodos podem ser mesclados nas direções X e Y da laje, podendo ser feito, concentrado/concentrado, distribuído/distribuído ou concentrado/distribuído como mostra a (Figuras 1).

Figura 1. Opções de distribuição de cabos em coordenadas X e Y, em uma laje.



Em geral, é necessário fazer a verificação das tensões nas bordas inferior e superior do concreto em todas as faixas (áreas tributárias) de cálculo determinadas pelo projetista. Essas faixas delimitadas pelo engenheiro situam-se entre duas linhas de suporte e compreendem as faixas ao qual serão distribuídas as cargas aos apoios, se assemelhando a área de influência. De acordo com Montanari (1981), os processos de verificações dessas tensões compreendem em tensões normais e de cisalhamento.

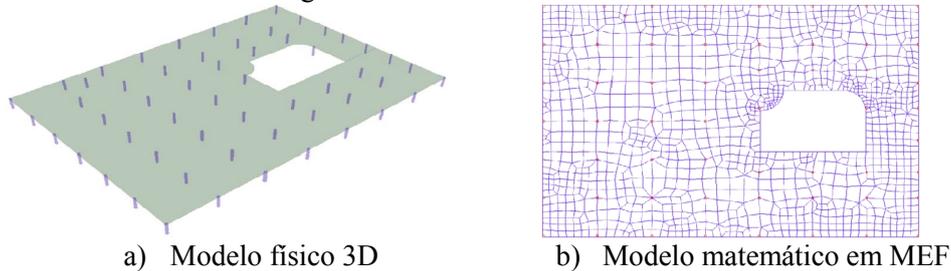
Ao se projetar uma peça em concreto armado, tem-se em mente, de acordo com Buchaim (2007), um nível mínimo e máximo de tensões a ser incrementado na estrutura, ou seja, o sistema para ser considerado protendido com um nível de fissuração baixa ou nenhuma, tem que atingir uma compressão mínima. Essa tensão de compressão é calculada em função do f_{ck} , resistência característica do concreto aos 28 dias. O mesmo se aplica ao aço de protensão, aonde existe um valor mínimo e máximo, ambos em função da ruptura ou do limite de escoamento convencional.

Para o estudo comparativo entre as diversas disposições dos cabos na laje, o sistema idealizado foi uma laje de aproximadamente 48,5x70 metros, em concreto maciço, com espessura de 18,3 centímetros, onde não houve a utilização de vigas, sendo toda a carga da laje transmitida diretamente para os 57 pilares de 40x40 centímetros, como apresentado na (Figura 2a).

Sendo adotado o método dos elementos finitos (MEF) para discretização da laje, método este que apresenta maior acurácia se comparado ao dos quadros equivalentes. Neste método é necessário realizar a discretização da laje através de elementos quadrangulares que serão interligados entre si e

transmitirão as cargas provenientes da laje para os pilares. Essa divisão tem como objetivo o cálculo do comportamento isolado de cada elemento, sendo a partir daí, transmitido as resultantes de uma para outra até chegar ao apoio, e tendo no final, as especificações de cada pedaço da laje. A (Figura 2b) mostra a divisão das células no nosso caso.

Figura 2. Modelo do estudo de caso



Adotou-se classe de agressividade II, f_{ck} de 30MPa, coeficiente de Poisson de 0,20, peso específico do concreto de 2500kg/m³ e seu coeficiente de dilatação igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Para o módulo de elasticidade, sendo este obtido como indicado na NBR 6118:2014, um valor de 30672,5MPa. Devido este ser um estudo comparativo, foi estabelecido que todas as propriedades dos materiais fossem iguais para todos os modelos.

Para o aço simples, ou armadura passiva, os valores fixados para o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento do aço são respectivamente de 210GPa e 500MPa. A armadura ativa apresenta módulo de elasticidade igual a 190GPa, resistência de escoamento convencional no valor de 1700MPa, e a força final a qual o cabo deverá ser protendido de 118KPa.

As cargas adotadas são 300kgf/m² permanente e 600kgf/m² variável em toda a extensão da laje. Com o intuito de se obter o caso mais desfavorável de carregamento, foram adotadas as seguintes combinações na fase inicial (1,00 x Peso Próprio + 1,15 x Protensão), no estado limite último (1,40 x Peso Próprio + 1,40 x Carga Permanente + 1,40 x Carga Variável + 1,00 x Hiperestático) e de serviço (1,00 x Peso Próprio + 1,00 x Carga Permanente + 1,00 x Carga Variável + 1,00 x Protensão).

Após a definição das características dos materiais e das combinações de carga, é necessário determinar através das linhas de suporte, as áreas tributárias nas direções x e y separadamente. Esse processo tem como objetivo o estabelecimento da trajetória dos carregamentos e sua área de influência designada para cada apoio. As (Figura 3a) e (Figura 3b) mostram a laje com o traçado das linhas de suporte na direção x e y respectivamente, e a (Figura 4a) e (Figura 4b) mostram as áreas tributárias no eixo das abscissas e das ordenadas.

Figura 2. Linhas de suporte.

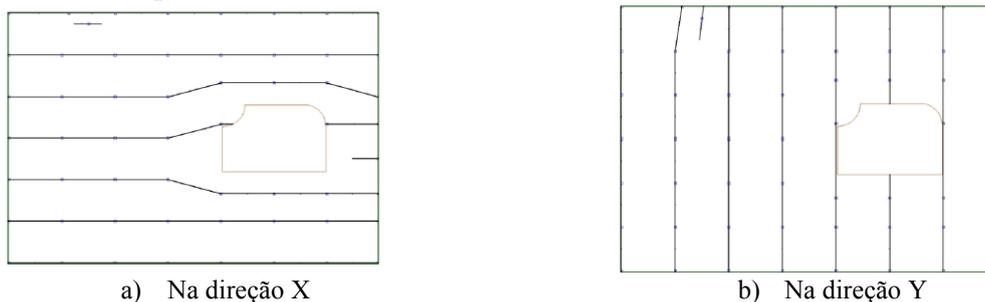
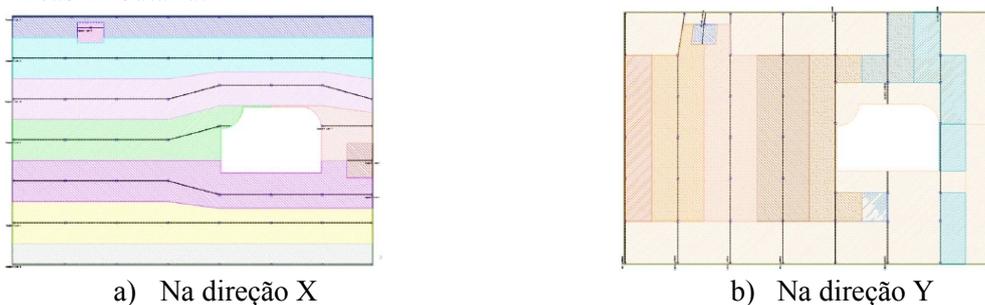


Figura 3. Áreas Tributaria.

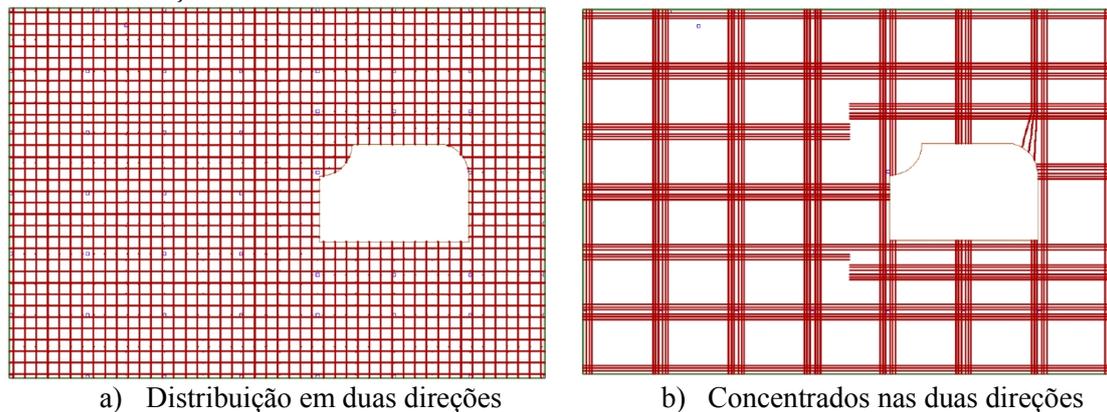


RESULTADOS E DISCUSSÃO

A protensão com cabos distribuídos em duas direções, caso 1, apresenta elementos equidistantes espalhados nas direções X e Y da laje, formando um malha quadrática. Uma possível complicação devido à adoção desta distribuição é a interferência entre cabos, porém, para efeitos construtivos, há a vantagem quanto ao posicionamento destes.

A análise do caso 1 desenvolveu-se partindo de um estudo preliminar, onde se determinou uma espessura e quantidade de cabos, sendo, também, realizada uma verificação das flechas. Os resultados dos deslocamentos obtidos apresentaram valores excessivos, o que poderia ser solucionado através de dois modos: aumento de armaduras ativas na região ou aumento da espessura da laje, sendo este adotado para o caso. Assim, com uma nova espessura, de 30 cm, obteve-se 22 cabos. Na (Figura 6a) é apresentada a distribuição dos cabos na laje, onde cada linha vermelha representa um feixe, com duas monocordoalhas.

Figura 4. Distribuição de cabos - casos: 1 e 2.



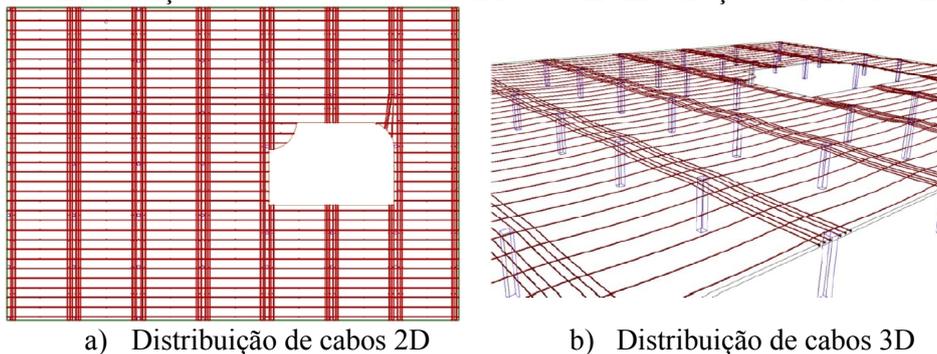
Para o novo arranjo do caso 1, o valor máximo encontrado para flechas foi de 3,73 cm, valor aceitável para deformação lenta (NBR 6118:2014). Analisando os resultados obtidos para tensões nas fibras superiores e inferiores, constata-se que nas seções transversais há um nível de tensão excedente nos apoios, variando em torno de $5,0\text{N/mm}^2$ e com pico no primeiro e último apoio (aproximadamente $7,0\text{N/mm}^2$), excedendo o limite aceitável de $2,5\text{N/mm}^2$. No caso da fibra inferior, apenas os vãos da extremidade apresentaram valores de nível inadmissível de tensões ($5,5\text{N/mm}^2$). Nas seções longitudinais, os níveis encontrados revelaram-se dentro dos limites aceitáveis. Com o intuito de solucionar, as tensões excedentes, adotou-se o uso de armaduras passivas.

No estudo do caso 2, protensão com cabos concentrados em duas direções, optou-se por concentrar as armaduras ativas próximas aos pilares nas duas direções, assim, formando uma zona de máxima eficiência. Quanto à espessura da laje adotou-se um valor de 30 cm, determinando-se a quantidade de 22 cabos. A (Figura 6b), apresenta a distribuição dos cabos na laje, onde cada linha vermelha representa um feixe, onde os mais próximos aos pilares são formados por 5 monocordoalhas e os seguintes por 3 monocordoalhas cada.

Para o caso 2 ao se verificar as flechas, constatou-se um valor máximo de 3,53 cm, o qual está de acordo com valores aceitáveis pela NBR 6118:2014. Quanto às tensões na seção longitudinal observaram-se valores de picos de $6,0\text{N/mm}^2$ e nos vãos centrais de aproximadamente $3,0\text{N/mm}^2$, na fibra superior, e na inferior, valores excedentes de tensão oscilando em torno de $4,0\text{N/mm}^2$, nos vãos entre os dois apoios da extremidade. Já na seção transversal, a laje apresenta um excedente de 1N/mm^2 em uma de suas extremidades na borda superior. Para combater os valores de tensões excedentes fez-se necessário o uso de armaduras passivas para ambas as fibras, observando-se a necessidade de utilização de uma malha quadrática em toda a laje.

No caso 3 tem-se protensão com cabos distribuídos em uma direção e concentrados na outra. Adotou-se nas regiões concentradas os mesmos parâmetros estabelecidos para o caso 2 e nas distribuídas, espaçamentos respeitando a relação restritiva de 8 vezes a espessura da laje. É representada na (Figura 7) o esquema de distribuição de cabos e uma vista esquemática do método.

Figura 7. . Distribuição de cabos - caso: concentrados em uma direção e distribuído na outra.



Os resultados encontrados para as flechas máximas, para o caso 3, foram de 3,75 cm na região de periferia a direita do furo. Os valores obtidos nesse último método giram em torno de 6,5 a 7,0N/mm², com pico nos vãos extremos de 10N/mm² na fibra superior, e 3,5 a 4,0N/mm² na inferior. Na seção longitudinal as tensões obtidas apresentam-se dentro dos valores exigidos (NBR 6118:2014). Quanto à utilização de armaduras passivas, as negativas assumem valores consideráveis, porém semelhante aos demais, já a armadura positiva, que se caracteriza, no caso, por uma da malha quadrática em toda a laje apresenta menor seção de aço em relação aos outros casos apresentados.

CONCLUSÕES

Ao se comparar o caso 1 e caso 2 pode-se perceber que, para as flechas, mesmo o caso 2 apresentando melhor eficiência, ambos encontram-se dentro dos limites aceitáveis por norma (NBR 6118:2014), tornando-os viáveis. Porém, quando se compara os limites de tensões no concreto, observa-se uma disparidade de valores significativos, destacando-se o caso 2. Vale ressaltar que para este, há obrigação de se utilizar armaduras passivas em grande quantidade, devido ao método subdividir a laje em diversas áreas interligadas pelas faixas de cabos concentrados. Já o caso 1, apresenta uma quantidade menor de armaduras passivas e o sistema trabalha como uma laje única.

Comparando os casos 1 e 3, percebe-se uma variação na deformação de aproximadamente 2 mm, assim, constata-se que, quanto a parâmetros de deformações, a eficiência dos três métodos são equiparáveis. Porém, ao se analisar as tensões, estas apresentam uma variação de aproximadamente 1,5 N/mm² na fibra superior nas regiões próximas aos apoios, destacando-se valores menores para o caso 1.

Para parâmetros construtivos e de consumo de armaduras ativas o caso 3 se sobrepõe ao caso 1, mesmo este apresentando menores valores de tensões, esta opção pela utilização do primeiro, se dá pelo mesmo apresentar um sistema bi apoiado, necessitando de armaduras apenas em uma direção e na outra apenas barras de distribuição, logo diminuindo o uso de cabos protendidos, facilitando a execução e otimizando o tempo de construção. Logo, estruturalmente a melhor solução é a laje protendida com cabos distribuídos nas duas direções. No entanto, se quisermos adequar uma solução estruturalmente eficaz, com economia e possibilidades de grandes vãos e pés direitos altos, pode-se então adotar a laje protendida com cabos distribuídos em um sentido e concentrados no outro.

REFERÊNCIAS

- AALAMI, Bijan O; JURGENS, Jennifer D. Guidelines for the design of post-tensioned floors. San Francisco: Concrete International, 2003.
- ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.
- BUCHAIM, Roberto. Concreto protendido: tração axial, simples e força cortante. Londrina: EDUEL, 2007.
- LIN, T. Y.; BURNS, Ned H. Design of prestressed concrete structures. San Francisco, 1981.
- MONTANARI, Hilio. Concreto protendido. São Carlos, 1981.
- MOURA, J.R.B. Recomendações para sistemas estruturais em edificações com a utilização de protensão com cordoalhas engraxadas. In XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2001.
- PFEIL, Walter. Concreto protendido: processos construtivos, perdas de protensão, sistemas estruturais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.