

ARMADURA MÍNIMA PASSIVA EM LAJES PROTENDIDAS ADERENTES E NÃO ADERENTES PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS

Daniel Vinicius Benin¹

Marcelo Silveira²

Fábio Albino de Souza³

¹ FURB / Benin Engenharia Estrutural / danielbenin@terra.com.br

² UNIFOR / Diretor MD Eng. Associados // marcelo@md.eng.br

³ Unicamp / IDD/ EBPX / Departamento de Estruturas – DES / fabio@ebpx.com.br

Resumo

Com base na construção civil contemporânea, em função das características de mercado em constante evolução, gradativamente, tem-se procurado um melhor desempenho dos materiais e sistemas construtivos, o sistema de protensão para lajes viabiliza que projetistas trabalhem de maneira mais arrojada e com maior liberdade arquitetônica, vãos maiores, atendendo a necessidade do mercado atual. Com o intuito de estudar as características e a otimização do dimensionamento de lajes protendidas, o presente trabalho apresenta o dimensionamento das armaduras mínimas de uma laje protendida de uso residencial comparando o consumo de material no uso de pós tração aderente e não aderente com concreto do grupo I de resistência a compressão C30 e C50 de acordo com a NBR 6118, apresentando também uma breve análise deste parâmetro na norma norte americana ACI 318:2019, onde o uso da protensão em lajes é difundido em proporções muito maiores às do mercado Brasileiro. Através da utilização do software ADAPT Floor-Pro, utilizando um modelo de laje fictício com a carga de uso residencial da NBR 6120:2003 com vãos modulados característicos de projetos residenciais de 7,5m por 8,0m, foram adicionadas as armaduras ativas para atender as principais premissas da NBR 6118:2014, extraíndo os esforços solicitantes e as tensões em serviço para a análise da armadura positiva. Totalmente contrário ao ACI, a NBR apresentou um acréscimo na taxa de armadura passiva positiva necessária com o aumento da resistência característica a compressão do concreto.

Palavras-Chave: Laje Protendida; Armadura Mínima Positiva; NBR 6118:2014.

Abstract

Based on present-day civil construction, due to constantly evolving market characteristics, a better performance of materials and constructive systems has been sought, the system of post-tensioning enables designers to work in a more daring way, with greater architectural freedom and spans, meeting the needs of today's construction markets. In order to study the characteristics and the optimization of the post tensioned slabs design, this article shows the design of the minimum rebar needed for a slab with residential loads, comparing the amount of material needed for bonded and unbonded post tensioned system with concretes of Group I of compression resistance, C30 and C50, according to NBR 6118. The article also presents a brief analysis of this parameter in the American code ACI 318, where the use of post tension in slab is widespread in much larger proportions than in the Brazilian market. Through the use of ADAPT Floor-Pro software, using a fictitious slab model, with residential loads according to NBR 6120:2003, with spans on a basis of 7,5x8 meters long, it was add post tensioned cables in order to achieve the minimum requires of NBR 6118:2014, extracting the stresses in service for positive bending reinforcement analysis. Totally different from ACI, NBR shows an increase in the rate of positive rebar needed when the resistance of the concrete is increased.

Key-words: Post-tensioned slab; minimum rebar; NBR 6118:2014.

Introdução

Com o aumento gradual do custo de mão de obra no mercado brasileiro de construção civil, a busca por soluções e métodos mais eficientes acirra-se cada vez mais. A fim de obter maiores vãos e flexibilidade arquitetônica, a alternativa encontrada pelo mercado nas últimas décadas foi o desenvolvimento do sistema construtivo utilizando lajes lisas sem a utilização de vigas nas ligações com os pilares, que se tornou mais viável através do uso da protensão. A difusão através de uma otimização do custo do sistema construtivo no Brasil encontra uma barreira na NBR 6118 na comparação ao ACI 318, que permite a eliminação de utilização de armadura passiva positiva dependendo das tensões de tração em que a laje é submetida em serviço. Este trabalho tem o intuito de obter valores quantitativos de armadura mínima necessária na NBR 6118 em comparação ao ACI 318, em uma laje de uso residencial, utilizando o sistema aderente e não aderente de protensão com concretos do grupo I de resistência a compressão (até C50). As lajes lisas protendidas apresentam um modelo de execução mais limpo e ágil, barateando o custo de mão de obra e dando mais versatilidade e liberdade ao projeto. Porém, algumas vezes esta economia não é viabilizada devido ao maior custo de material. Para (EMERICK, 2002), há vantagens evidentes das lajes protendidas com pós tração que valem ser ressaltadas para o desenvolvimento do estudo;

- Possibilidade de vencer vãos maiores com lajes mais esbeltas, consequentemente mais liberdade arquitetônica e possibilidade de redução do número de pilares.
- Diminuição da espessura da laje sem a necessidade do uso de vigas, resultando uma altura total menor, diminuindo também as cargas na fundação, ou, se possível, um número maior de pavimentos com uma altura fixada;
- Viabilidade Econômica em relações a outros métodos construtivos em vãos superiores a 7 metros.

Lajes Protendidas

A execução de projetos com lajes protendidas ganhou força através do uso de cordoalhas engraxadas não aderentes, executadas nos Estados Unidos desde o final da década de 50. Para Loureiro (2006) os milhões de metros quadrados já construídos comprovam o excelente desempenho deste método. Ressalta-se que somente a partir de 1997 o método foi difundido no Brasil, através da fabricação das cordoalhas pela Belgo Mineira, seguindo as especificações do PTI – Post Tensioning Institute, dos Estados Unidos. Cholfé e Bonilha (2015) apontam alguns fatores que influenciaram no desenvolvimento do CP em território nacional, como o refinamento dos processos de cálculo devido aos avanços na análise estrutural computadorizada, onde simulações podem ser feitas de formas cada vez mais complexas e sofisticadas; a integração dos projetos arquitetônicos, estruturais, hidráulicos e elétricos através da modelagem em sistemas Building Information Model (BIM) e por fim a normatização do projeto de estruturas em CA e CP feita pela NBR 6118:2014 de forma moderna e compatível com outros códigos internacionais. O sistema construtivo de lajes em concreto protendido possui algumas variantes, sejam elas nervuradas, alveolares ou maciças, admitindo ainda serem apoiadas em vigas, diretamente nos pilares com ou sem capiteis. Todos os sistemas possuem aplicações que apresentam vantagens e desvantagens específicas, aliados a um ótimo desempenho. Alguns sistemas são mais utilizados do que outros, seja devido à viabilidade econômica ou por consequência do projeto arquitetônico. Os principais sistemas estruturais

utilizados para lajes protendidas, segundo Emerick (2005, p. 33), são as lajes lisas sem engrossamento na região dos pilares e com engrossamento na região dos pilares, denominados capiteis,

Espessura das lajes protendidas

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 74), menciona espessuras mínimas para lajes no seu item 13.2.4.1, sendo de importância para o estudo os seguintes limites:

- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com mínimo de $\frac{\ell}{50}$ para lajes de pisos contínuos;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

Segundo Schmid (2009, p. 9) a esbeltez (L/h) superior a 40 exige comprovação da segurança em relação aos Estados Limites de Utilização, de Deformações e Vibrações excessivas. A Figura 1 apresenta uma comparação de esbeltez que podem ser atingidas por diferentes sistemas de laje lisas em concreto armado e protendido com sobrecarga de até 3 kN/m².

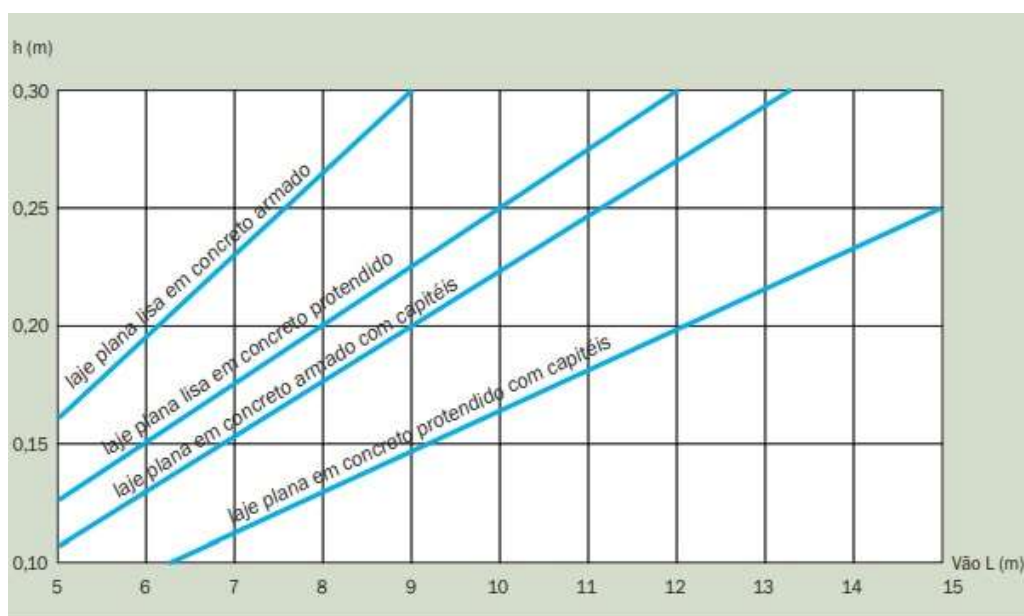


Figura 1 - Relação vão espessura de lajes planas.(Schmid, 2009)

Traçado das armaduras ativas em planta

O arranjo em planta dos cabos de protensão é um dos critérios que deve ser analisado pelo projetista. É possível obter diversas combinações e/ou análises corretas que trazem resultados diferentes, porém algumas premissas básicas devem ser obedecidas de acordo com a NBR 6118:2014 encontradas nos itens 20.3.2.1 à 20.3.2.6:

- O espaçamento máximo no traçado distribuído deve ser de no máximo seis vezes a espessura da laje, não devendo ultrapassar 120 cm.
- Feixes de cabos podem ser constituídos de até 4 monocordoalhas engraxadas.
- Pelo menos um cabo passando dentro das armaduras longitudinais dos apoios em cada direção pode prescindir de armadura passiva negativa contra colapso progressivo.

- Entre cabos ou feixes de cabos, ou entre cabos e armaduras passivas, deve ser mantido um espaçamento mínimo de 5 cm.
- Na seção da laje correspondente ao cabo ou agrupamento de cabos, a quantidade de cabos deve resultar em uma tensão de compressão média igual ou superior a 1 MPa, considerando-se a força efetiva do cabo após todas as perdas.

O traçado mais utilizado atualmente em lajes lisas e cogumelos de acordo com (LOUREIRO, 2006), é o de cabos concentrados em uma direção nas faixas dos apoios, e distribuídos igualmente na laje na direção perpendicular conforme esquema “B” da Figura 2. Segundo ele, a principal vantagem deste arranjo é que “não existe interferência nos cruzamentos dos cabos, com exceção de um cabo distribuído que é colocado abaixo dos cabos concentrados sobre os apoios. Para facilitar a execução, é comum juntar-se duas, três ou quatro cordoalhas para formar um cabo.” (LOUREIRO, 2006, p. 1754).

Podem ser utilizados também, traçados concentrados nas faixas de apoio nas duas direções conforme esquema “A” da Figura 2. Isto facilita a montagem porém não é tão eficiente na distribuição dos esforços.

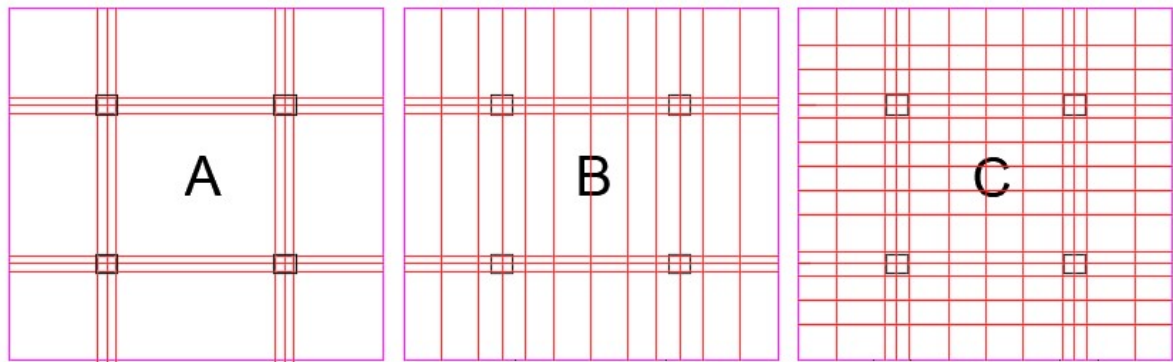


Figura 2- Principais distribuições de cabos em planta esquematizados. (Autor, 2019)

O ACI 423 (ACI, 1983 *apud* EMERICK, 2005, p. 39) traz a seguinte recomendação para a distribuição dos cabos em planta conforme esquema “C” da Figura 2, concentrando e distribuindo os cabos nas duas direções, sendo nas linhas dos apoios 65 a 75% dos cabos, e distribuído entre as concentradas 25 a 35%.

Níveis de Protensão

Segundo a NBR 6118:2014, a protensão pode existir nos níveis a seguir, respeitando suas respectivas verificações de estados limites:

- Protensão parcial: Para combinações frequentes de ações é respeitado o Estado Limite de Formação de Fissuras com abertura característica menor ou igual a 0,2 mm.
- Protensão limitada: Para combinações quase permanentes de ações é respeitado o Estado Limite de Descompressão e para combinações frequentes de ações, é respeitado o Estado Limite de Formação de Fissuras.
- Protensão completa: Para combinações Frequentes de ações é respeitado o Estado Limite de Descompressão e para combinações raras o Estado Limite de Formação de Fissuras.

Um elemento estrutural completamente protendido não apresenta tensões de tração sob condições de serviço. Já um elemento dimensionado com protensão parcial ou limitada pode até sofrer tração, porém fica restrito pela fissuração do concreto em situações de serviço (CAUDURO, 2002). A protensão completa foi, por muitos anos, o objetivo de toda a construção em concreto protendido a fim de evitar as tensões de tração e fissuras. No entanto, para Emerick (2005), foi justamente a protensão parcial um dos elementos que viabilizou o processo construtivo em lajes, por permitir um aproveitamento mais racional dos materiais, dosando mais convenientemente as taxas de armaduras ativas e passivas da seção.

A NBR 6118:2014 apresenta uma exceção para o projeto de lajes lisas ou cogumelos protendidas. Na nota 3 da tabela 13.4, item 13.4.2, lê-se que “no projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.”

Tabela 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura segundo NBR 6118:2014

PROTENSÃO	VERIFICAÇÃO 1	VERIFICAÇÃO 2
PARCIAL	ELS-W $W_k \leq 0,2\text{mm}$	ELS-F Combinação Frequente
LIMITADA	ELS-F Combinação Frequente	ELS-D Combinação quase permanente
COMPLETA	ELS-F Combinação rara	ELS-D Combinação frequente

Esta nota foi adicionada na revisão de 2014, facilitando e gerando uma economia nos projetos de lajes lisas e cogumelo protendidas, visto que, para atingir o ELS-D, são necessárias mais cordoalhas e se aproveita menos a armadura complementar mínima.

Armadura positiva mínima NBR 6118:2014

As armaduras passivas utilizadas em Concreto Protendido (CP) são geralmente formadas por vergalhões, os mesmos utilizados em estruturas de Concreto Armado (CA), e são chamadas de convencionais ou suplementares (PFEIL, 1988). Assim, possuem a mesma nomenclatura dada para as armaduras utilizadas em concreto armado pelas siglas CA, seguido de sua resistência característica ao escoamento (f_{yk}) em kN/cm², os aços usualmente utilizados são os CA-50 e CA-60.

As armaduras passivas são utilizadas para melhorar o desempenho e a ductilidade à flexão, assim como controlar a fissuração, a NBR 6118:2014 prevê valores mínimos de armadura passiva positiva para lajes de concreto armado, concreto protendido com cordoalha aderente e não aderente armada nas duas direções conforme Tabela 2 apresentada abaixo.

Tabela 2- taxa de armadura passiva mínima positiva para lajes bidirecionais conforme NBR 6118:2014

	CA	CP ADERENTE	CP NÃO ADERENTE
ARMADURA MINIMA	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5\rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$

Onde:

ρ_s = taxa de armadura passiva da seção

ρ_p = taxa de armadura ativa da seção

ρ_{min} = definido na tabela 3

Onde a taxa mínima de armadura de flexão, para seções retangulares, é apresentada em função do f_{ck} do elemento, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - taxa mínima de armadura de flexão - seção retangular NBR 6118:2014

f_{ck}	20	25	30	35	40	45	50
ρ_{min}	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208

Armadura mínima ACI 318

Conforme (AALAMI, 2001) e (LOUREIRO, 2006), o ACI 318 possibilita não utilizar armadura mínima passiva positiva, desde que a tensão de tração em serviço máxima não ultrapasse $(1/6) \sqrt{f_{ck}}$.

Caso a tensão de tração em serviço ultrapasse o valor, se tratando de lajes armadas nas duas direções, deverá então ser adicionado armadura positiva passiva, a quantidade é facilmente obtida através da equação

$$A_s = N_c / (0,5 * f_y) \quad (1)$$

Onde:

N_c = A força equivalente à cunha de tração na seção de concreto

f_y = Tensão de escoamento do aço CA, limitado em 420MPa.

Para lajes com protensão aderente, pode-se ainda descontar a área de armadura ativa da A_s encontrada na equação 1.

Estado limite último

A Verificação ELU na flexão (estádio III) é a consideração em que a estrutura não pode mais ser utilizada, ou seja, corresponde a um colapso ou deformação excessiva, as principais hipóteses que devem ser utilizadas no cálculo segundo (EMERICK, 2002) seriam:

- As deformações das fibras são proporcionais à sua distância a linha neutra.
- A intensidade e a posição da resultante de esforços no concreto na região comprimida pode ser deduzida a partir do diagrama simplificado de parábola-retângulo e o retangular equivalente
- A resistência a tração no concreto é totalmente desprezada após a fissuração.
- As armaduras ficam sujeitas as mesmas deformações unitárias que o concreto adjacente.

Basicamente para verificar a capacidade resistente de uma seção protendida é necessário verificar o equilíbrio da seção, exemplificado na Figura 3, através do equilíbrio da reação de compressão do concreto, com a reação de tração no aço protendido, caso a tração no aço protendido seja menor que a compressão no concreto, deve-se compensar com a adição de armadura passiva a fim de garantir o equilíbrio de compressão e tração. (EMERICK, 2002).

$$R_{cc} = R_{pt} + R_{st} \quad (2)$$

$$M_d = R_{cc}Z_1 + R_{st}Z_2 \quad (3)$$

Onde:

R_{cc} = Reação de compressão no concreto

R_{pt} = Reação de tração no aço protendido

R_{st} = Reação de tração no aço passivo

M_d = Momento de projeto

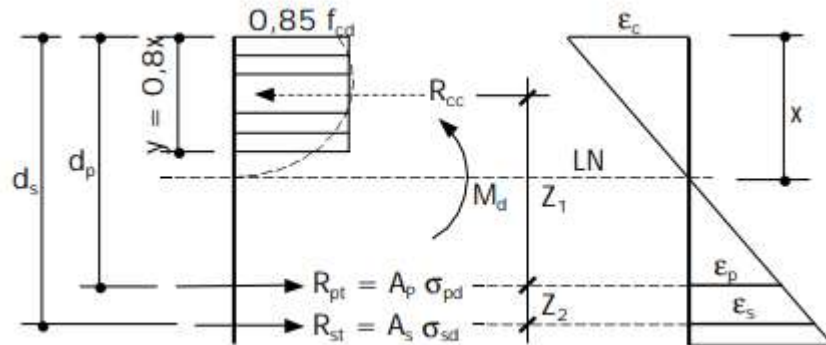


Figura 3- Seção de concreto protendido no Estádio III (EMERICK, 2002)

Combinações de carregamento e limite de tensão

Para a verificação do elemento com protensão limitada (nível 2) foram verificadas algumas combinações de carregamentos e seus respectivos limites de tensões de compressão e tração, de acordo com os Estados Limites de Serviço e Último, sendo as equações compostas de acordo com as tabelas 11.2 e 11.4 da NBR 6118:2014, nos seus itens 11.7.1 e 11.8.3.2 respectivamente.

$$C1 = 1,0 PP + 1,0 G + 0,4 Q + 1,0 P \quad (4)$$

$$C2 = 1,4 PP + 1,4 G + 1,4 Q + 1,0 HIP \quad (5)$$

Onde:

C1= Combinação frequente de ações ELS;

C2= Combinação para verificação do ELU na flexão;

G= Cargas permanentes;

HIP= Hiperestático;

Q= Cargas acidentais;

PP= Peso próprio;

P= Força de protensão.

Modelagem

Para o estudo em questão foram considerados os seguintes parâmetros de projeto:

- Classe de agressividade II- Urbana
- Aço CA-50 módulo de elasticidade 210GPa
- Cordoalha CP 190 RB ϕ 12.7mm com módulo de elasticidade 196GPa
- Força efetiva da cordoalha de 120KN.
- Carga acidental distribuída 1,5 KN/m² (uso residencial)
- Carga permanente distribuída 1,0 KN/m²

- Cobrimento: CA 20mm CP 30mm

É apresentado na Figura 4 um modelo para o presente estudo, de uma laje lisa maciça, com espessura de 20cm (L/40) e vãos de 7,5m x 8,0m com balanços de 2,0m. Os vãos adotados são comuns para edifícios residenciais visto que servem uma disposição de 3 vagas de garagem. Esta seria uma modulação em que o método construtivo se mostra mais eficiente e competitivo (SCHMID, 2009).

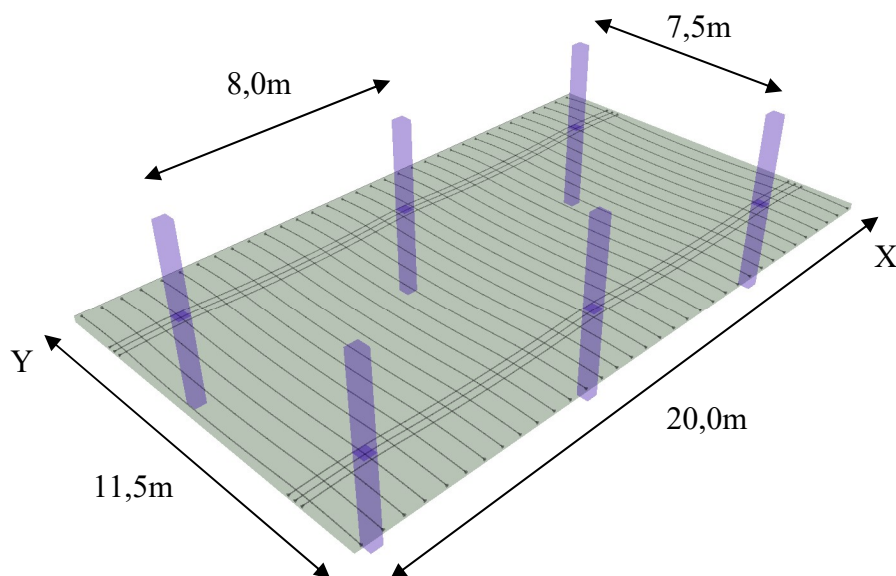


Figura 4- Modelagem no Software ADAPT Floor-Pro (Autor, 2019)

Serão objeto de análise dois modelos de laje, um com f_{ck} de 30MPa, o mínimo permitido pela NBR 6118:2014 para concreto protendido e a referida CAA, e outro com f_{ck} 50MPa, o máximo do grupo de resistência I da norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Na direção X da laje em estudo foi adotado uma concentração de cabos nos apoios. Para o pré-lançamento, o número de cordoalhas é calculado de forma a gerar uma tensão de compressão estimada na seção transversal da laje de 1 MPa. Este valor corresponde à pré-compressão mínima exigida pela NBR 6118:2014, no seu item 20.3.2.1. Considerando no projeto, para cada cordoalha, uma força efetiva final de 120kN (já estando incluído neste valor 20% de perdas totais), tem-se uma estimativa do número mínimo de cordoalhas.

$$n^{\circ} \text{ cordoalhas} = \frac{A_t * 1MPa}{P_{ef}} \quad (6)$$

Onde:

A_t = Área da seção transversal da faixa de laje a ser protendida em m².

P_{ef} = Força de compressão final de cada cordoalha em MN.

$$n^{\circ} \text{ cordoalhas direção } X = \frac{11,5 \times 0,20 \times 1}{120/1000}$$

$$n^{\circ} \text{ cordoalhas direção } X = 19,17$$

O número de cordoalhas determinado duas faixas concentradas contendo 10 CP 190 RB $\phi 12,7$ mm, separados em 1 feixe de 4 e dois feixes de 2.

Para a direção y, onde as cordoalhas serão lançadas distribuídas homogeneamente o mesmo processo é realizado. O cálculo da quantidade total na direção y segue o mesmo princípio, o total encontrado é de 33,33 cordoalhas sendo então distribuídas, foram adotadas 34 cordoalhas espaçadas a cada 59cm, a distribuição em planta pode ser visualizada a seguir na Figura 5

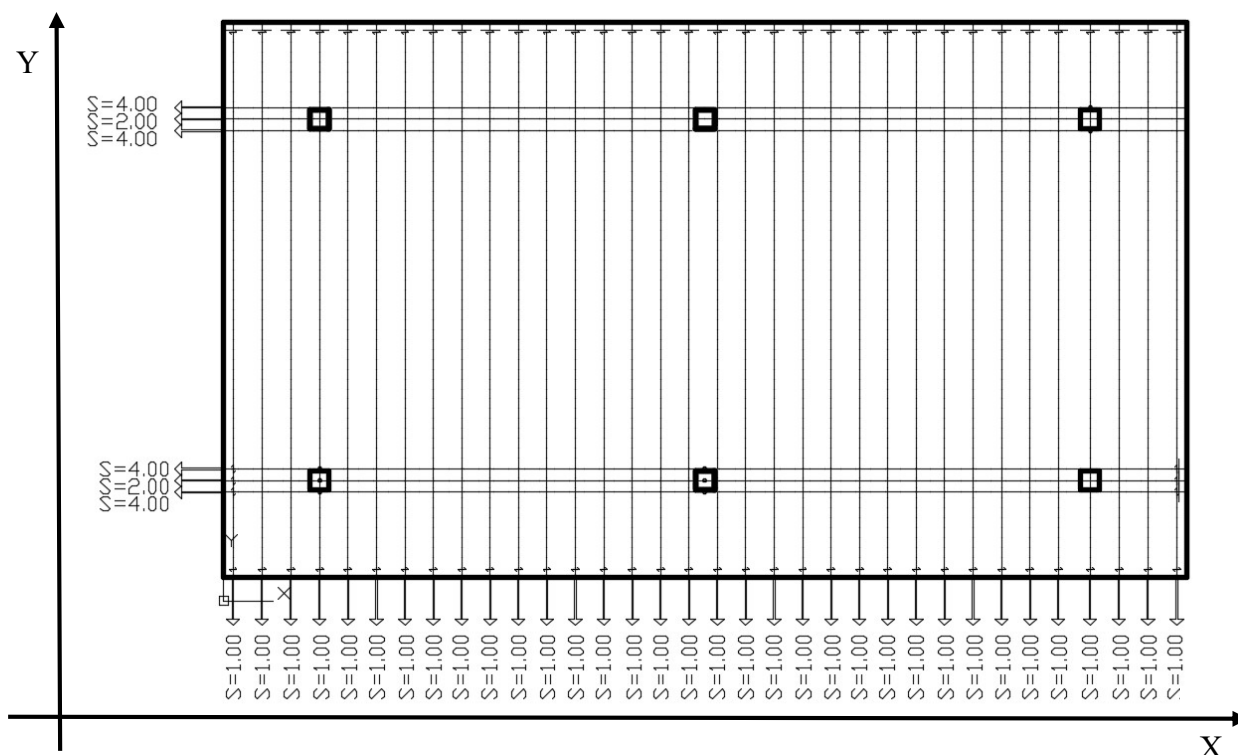


Figura 5 – Traçado dos cabos em planta (Autor, 2019)

A Figura 6 a seguir mostra a elevação das cordoalhas, foram dispostos de acordo com as indicações de referências como Emerick, Schmid. Resumidamente, a proposta é aproveitar a máxima excentricidade dos cabos, chegando ao limite do cobrimento, acompanhando o gráfico de momento. Ou seja, máxima excentricidade no meio dos vãos no ponto mais abaixo da seção transversal, e no ponto mais alto da laje sobre os apoios.

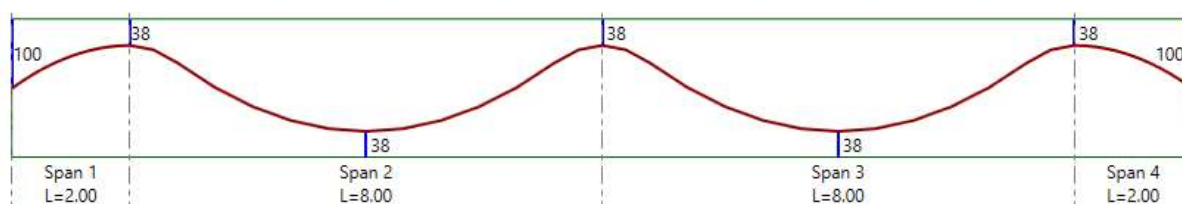
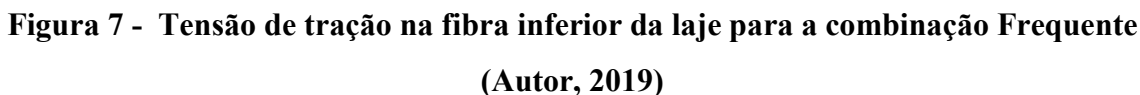


Figura 6 - Traçado dos cabos em elevação (Autor, 2019)

Análise dos resultados

Através da utilização do software ADAPT Floor-Pro foi possível extrair os principais esforços necessários para a verificação da armadura positiva necessária na laje protendida utilizando os critérios do ACI e da NBR 6118, que seriam a tensão de tração em serviço na laje e o momento fletor no ELU considerando-se os hiperestáticos apresentados. Não houveram grandes variações nestes esforços nos 4 modelos estudados, visto que foi adotado uma força efetiva única para cada cordoalha aderente e não aderente de 120KN.

A Figura 7 apresenta as tensões na fibra inferior da laje nas regiões tributárias dos dois sentidos, de apenas um dos modelos analisados a maior tensão de tração foi encontrada no meio do vão de 7,5m.



A Figura 8 apresenta os momentos fletores das respectivas tributárias da laje no ELU, a tributária central com 8m de largura apresentou um momento fletor máximo de 331 KN.m, ou 41,375 KN.m/m, já as tributárias adjacentes com largura de 6m cada uma, apresentaram momentos de 39,667 KN.m/m, o maior valor encontrado foi então adotado para realizar as verificações da seção nos modelos propostos no estudo.

Na Tabela 4 é apresentado o resultado das reações de compressão no concreto, reações de tração nas armaduras protendidas e as respectivas reações necessárias na armadura passiva para haver equilíbrio na seção para cada um dos 4 modelos.

Os modelos de 50MPa, pelo critério do ACI, não necessitariam de armadura passiva positiva de acordo com a verificação $(1/6) \sqrt{f_{ck}}$ visto que a tração em serviço = 1,04MPa, e o limite de tensão de tração em serviço para a isenção de armadura passiva seria de $(1/6) \sqrt{50} = 1,17\text{MPa}$. Já para os modelos de 30MPa foi necessário a aplicar a equação (1) para o cálculo de A_s necessário

Tabela 4- Resultado da verificação da seção protendida

	Rcc	Rpt	Rst	A_s Calculado	$A_{s,min}$ NBR 6118	A_s necessário ACI 318
ADERENTE 30 MPa	26,6t f	23tf	3,6tf	0,81 cm ² /m	1,5 cm ² /m	0 cm ² /m
ADERENTE 50 MPa	26tf	24,3tf	1,7tf	0,4 cm ² /m	2,08 cm ² /m	0 cm ² /m
NÃO ADERENTE 30 MPa	26,6t f	20,2	6,3tf	1,45 cm ² /m	2,16 cm ² /m	1,28 cm ² /m
NÃO ADERENTE 50 MPa	26tf	21,7tf	4,3tf	1,0 cm ² /m	3,32 cm ² /m	0cm ² /m

Tabela 5- Taxa de armadura passiva mínima positiva da seção de concreto (bidirecional)

	NBR 6118			ACI 318		
MODELO	30MPa	50MPa	VAR%	30MPa	50MPa	VAR%
CP NÃO ADERENTE	0,108% 2,16 cm ² /m	0,166% 3,32 cm ² /m	+53,5%	0,064% 1,28 cm ² /m	0%	-100%
CP ADERENTE	0,075% 1,5 cm ² /m	0,104% 2,08 cm ² /m	+38,7%	0%	0%	0%
CONCRETO ARMADO	0,101% 2,02 cm ² /m	0,14% 2,8 cm ² /m	+38,7%			

Na Tabela 5, são demonstradas as taxas de armadura necessária para a seção com maior momento solicitante, considerando como taxa de pretensão ρ_p 0,083%, referente a 1 ϕ 12.7mm a cada 59cm na direção y. As taxas de armadura mínima ρ_s foram encontradas através das equações da NBR 6118:2014 e ACI 318 encontradas, na Tabela 1 do estudo e na equação 1 variando de acordo com o f_{ck} e tipo de protensão.

Conclusão

Totalmente contrário ao ACI 318, a NBR 6118 apresentou nos modelos estudados um acréscimo na taxa de armadura passiva positiva mínima necessária com o aumento da resistência característica a compressão do concreto. Apresentando uma variação considerável de +53,5% de armadura passiva para uma laje com protensão não aderente, e de 38,7% a mais para uma laje com protensão aderente, quando aumentada a resistência característica a compressão do concreto de 30MPa para 50MPa.

O modelo não aderente com f_{ck} de 30MPa apresentou maior compatibilidade nos resultados da armadura positiva necessária das duas normas. Pelo critério do ACI seria necessário 1,28 cm²/m, enquanto no critério da NBR seriam necessários 2,16 cm²/m.

Pode-se perceber também que uma laje com as mesmas características, submetida aos mesmos esforços, sendo de concreto armado convencional bidirecional, ou seja, utilizando-se apenas aço CA-50, necessitaria de menos armadura passiva do que uma laje protendida não aderente bidirecional para atender os requisitos da norma brasileira, sendo que há a utilização de uma taxa de armadura CP-190, com quase quatro vezes mais resistência

Vale destacar que o sistema construtivo de laje lisa maciça possui alta produtividade, que deve ser considerado no orçamento da execução de uma estrutura e mesmo que as condições de cargas e vãos adotados para o presente estudo tenham convergido para que os resultados de armadura chegassem a um valor próximo ao mínimo necessário, a modulação e o carregamento apresentado são amplamente utilizado em projetos residenciais e são compatíveis com o encontrado em grande parte das obras no Brasil, o que acaba desincentivando ou até mesmo inviabilizando a utilização de lajes lisas maciças e consequentemente materiais de melhor desempenho como os concretos de alta resistência e as cordoalhas CP 190, CP 210, abrindo mão de uma qualidade maior na execução e na durabilidade das estruturas em diversas situações.

Referências

AALAMI, B. O. Nonprestressed Bonded Reinforcement in Post-Tensioned Building Design. ADAPT CORPORATION. Redwood City. 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, USA: [s.n.], 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: [s.n.], 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

CAUDURO, E. L. Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas. 2. ed. Belo Horizonte: Belgo Mineira, 2002.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. Concreto Protendido: Teoria e Prática. 2. ed. São Paulo: Pini, v. 1, 2015.

EMERICK, A. A. Projeto e execução de lajes protendidas. Brasília: [s.n.], 2002.

LOUREIRO, G. J. PROJETO DE LAJES PROTENDIDAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Fortaleza, Abril 2006. 1734-1755.

PFEIL, W. Concreto Protendido. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, v. I Introdução, 1988.

SCHMID, M. T. Lajes Planas Protendidas. Rudloff Industrial Ltda. São Paulo, p. 30. 2009.