

ARMADURA PASSIVA MÍNIMA EM LAJES LISAS MACIÇAS PROTENDIDAS COM CORDOALHAS ENGRAXADAS

Marcus Thompsen Primo¹

¹ IDD / URI-Campus Santo Ângelo / PROTEN / marcus@protenengenharia.com

Resumo

Apesar de ser largamente utilizada e desenvolvido em países como Estados Unidos, a protensão ainda está em fase inicial no Brasil, sendo pouco utilizada nas construções. O número de projetistas com conhecimento para desenvolver este tipo de projeto ainda é muito pequeno, além disto são poucas as publicações nacionais sobre o assunto. Em relação a pavimentos com lajes lisas maciças em concreto protendido com cordoalhas engraxadas, ainda é mais escasso o material.

Neste trabalho apresenta-se o assunto de pavimentos executados com lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, dando ênfase ao dimensionamento de armaduras passivas mínimas. São verificados os critérios adotados pelas normas brasileiras, especificamente a NBR 6118, e a norma americana ACI 318. É feito uma revisão sobre o assunto, buscando identificar as diferenças entre as considerações de cada norma. São tratadas as situações de armadura passiva para os casos de protensão limitada e completa, verificando até que ponto a armadura mínima recomendada pode ser utilizada como armadura resistente a esforços de tração que ocorrem no elemento. Desta forma pretende-se fornecer subsídios aos projetistas, no que se refere ao dimensionamento de armadura passivas mínimas em lajes lisas protendidas, e contribuir com a disseminação do sistema no país

Palavras-chave: Concreto protendido; Laje lisa protendida; Cordoalhas engraxadas; Armadura mínima.

Abstract

Although being widely used and developed in countries such as the United States, prestressing is still in its early stages in Brazil, being little used in construction. The number of designers with knowledge to develop this type of project is still very small, and there are few national publications on the subject. For floors with solid flat slabs in prestressed concrete with unbonded strands, the material is even scarcer.

This paper presents the subject of pavements made with flat slabs and unbonded strands, emphasizing the design of minimum bonded deformed longitudinal reinforcement. The criteria adopted by Brazilian standards, specifically NBR 6118, and the American standard ACI 318 are verified. A review of the subject is made, seeking to identify the differences between the considerations of each standard. Bonded deformed reinforcement situations are addressed in the case of limited and complete prestressing, verifying to what extent the minimum recommended reinforcement can be used as reinforcement resistant to tensile stresses occurring in the element. In this way, it is intended to provide designers with subsidies regarding the design of minimum bonded reinforcement in prestressed flat slabs, and to contribute to the dissemination of the system in the country.

Keywords: Prestressed concrete; Prestressed flat slab; unbonded tendons; minimum reinforcement

Introdução

O estudo proposto tem por objeto as lajes maciças moldadas no local executadas em concreto protendido com cordoalhas engraxadas, sem a utilização de vigas. (lajes lisas). Este tipo de laje tem sido cada vez mais utilizado no Brasil, como uma opção viável econômica e tecnicamente em pavimentos de edificações residenciais, principalmente quando são aplicadas cordoalhas engraxadas não aderentes. Como todo processo que está em implantação e desenvolvimento, o corpo técnico fica carente de informações mais detalhadas e precisas sobre o assunto. Bem como as normas técnicas também carecem de ajustes e adaptações. Neste contexto as especificações de armaduras mínimas passivas a serem utilizadas em lajes é um ponto a ser considerado, visto que a determinação das mesmas pode ser um ponto confuso no dimensionamento e atendimento das normas técnicas. Sendo assim torna-se importante o desenvolvimento de um estudo que contribua no esclarecimento do dimensionamento deste tipo de armadura nas lajes lisas maciças protendidas com cordoalhas engraxadas. Visando tornar o sistema profundamente dominado pelos profissionais da área de estruturas não só em relação ao processo executivo como também ao processo de análise e dimensionamento. O melhor conhecimento do dimensionamento de armaduras passivas permite a utilização adequada e racional deste tipo de material (aço para concreto armado), em detrimento do aço ativo (cordoalhas), utilizado na protensão. A redução das taxas de armadura passiva no sistema de lajes lisas protendidas, vai de encontro ao objetivo do concreto protendido, que é introduzir no concreto um estado de tensões (compressão), de tal forma que teoricamente seja dispensada a armadura passiva para combater a tração. Torna-se importante verificar os critérios utilizados em normas estrangeiras e estabelecer uma comparação com os critérios adotados nas normas brasileiras.

Considerações de armaduras passivas segundo NBR 6118:2014 e ACI 318/19

- **Limites estabelecidos pelo ACI 318/19**

De acordo com as recomendações do ACI 318/19, os elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, e consequentes tensões de tração e compressão, devem ser classificados em três categorias: U (uncracked members), C (cracked members) e T (transition members). Esta classificação está baseada nos limites de resistência do concreto utilizado no elemento. No quadro 01, tem-se os valores limites e a correspondente classe.

Quadro 01: Classificação dos elementos protendidos submetidos à flexão de acordo com f_t .

Comportamento assumido	Classes	Limites de f_t
Uncracked (não fissurado)	$U^{[1]}$	$f_t \leq 7,5\sqrt{f'c}$
Transition between uncracked and cracked	T	$7,5\sqrt{f'c} < f_t \leq 12\sqrt{f'c}$

(transição entre não fissurado e fissurado)		
Cracked (fissurado)	<i>C</i>	$ft > 12\sqrt{f'c}$

^[1] Lajes bidirecionais protendidas devem ser projetadas como Classe U com $ft \leq 6\sqrt{f'c}$
Os valores de $f'c$ devem ser informados em *Psi*.

As classes apresentadas no quadro 01, aplicam-se tanto para sistemas de protensão aderente como não aderente. Observa-se também que os sistemas em lajes com distribuição de esforços em duas direções e, portanto, analisadas desta maneira, devem ser projetadas como classe *U* e com $ft \leq 6\sqrt{f'c}$.

A partir desta condição do ACI, o dimensionamento das lajes protendidas em duas direções, sejam com cordoalhas aderentes ou engraxadas, devem assumir comportamento não fissurado.

As tensões limites admissíveis para o concreto no ato da protensão são indicadas nos quadros 02 e 03, não considerando as perdas ao longo do tempo.

Quadro 02: Tensões limites de compressão no concreto no ato da protensão.

Posição de análise	Limites de tensão de compressão no concreto (<i>psi</i>)
Extremidade de barras simplesmente apoiadas	0.70 $f'ci$
Todas demais situações	0.60 $f'ci$

Onde f_{ci} é a tensão no concreto no ato da protensão. (em *psi*)

Quadro 03: Tensões limites de tração no concreto no ato da protensão.

Posição de análise	Limites de tensão de tração no concreto (<i>psi</i>)
Extremidade de barras simplesmente apoiadas	$6\sqrt{f'ci}$
Todas demais situações	$3\sqrt{f'ci}$

Onde f_{ci} é a tensão no concreto no ato da protensão. (em *psi*)

Os limites apresentados no quadro 03, podem ser ultrapassados nos pontos onde a armadura passiva de reforço tracionada resiste às forças totais de tração no concreto, calculadas assumindo a seção não fissurada.

Para os elementos estruturais considerados nas classes *U* e *T* as tensões de compressão no concreto nas fibras extremas, sob carregamento de serviço, e considerando todas as perdas, não deve exceder os limites apresentados no quadro 04.

Quadro 04: Tensões de compressão limite no concreto sob carregamento de serviço

Condições de carregamento	Limites de tensão de compressão do concreto (<i>psi</i>)
Protensão mais carregamento quase permanente	0.45 $f'c$
Protensão mais carregamento total	0.60 $f'c$

De acordo com as tensões atuantes no concreto sob ação de protensão, é possível determinar a necessidade ou não de armadura de reforço, além da necessidade e quantidade de armadura mínima. Para as lajes protendidas a taxa de compressão mínima deve ser 125 *Psi* (0,86 Mpa), em todas as seções de análise da laje. Este valor deve ser obtido a partir da força de protensão das cordoalhas, após o computo de todas as perdas, atuante sobre o concreto na região de interesse.

A armadura passiva mínima para lajes protendidas, $A_{s,min}$, deve estar posicionada nas regiões de tração no concreto e em quantidade de acordo com o quadro 05.

Quadro 05: Armadura passiva mínima $A_{s,min}$ em lajes armadas em duas direções com cordoalhas aderentes ou não-aderentes

Região	Tensão de tração no concreto (f_t) após todas as perdas (<i>Psi</i>)	$A_{s,min}$ (in ²)	Observações
Momentos positivos	$f_t \leq 2\sqrt{f'_c}$	Não necessário	(a)
	$2\sqrt{f'_c} < f_t \leq 6\sqrt{f'_c}$	$\frac{N_c}{0,5 f_y}$	(b) ^{(1) (2)}
Momentos negativos nos apoios	$f_t \leq 6\sqrt{f'_c}$	$0,00075 A_{cf}$	(c) ⁽²⁾

⁽¹⁾ O valor de f_y não deve exceder 60.000 *psi* (413,96 Mpa).

⁽²⁾ Para lajes com cordoalhas aderentes, é permitido reduzir o valor de $A_{s,min}$ da área de cordoalhas aderentes localizadas na região de computo de N_c , para os momentos positivos, ou para a largura de contribuição da laje nos momentos negativos.

Para o quadro 05, são feitas as seguintes observações:

O valor de N_c (em lb) é determinado a partir das forças atuantes na seção transversal de concreto, devido a protensão, para o carregamento de serviço e após todas as perdas, para a seção não fissurada.

A_{cf} (in^2) é a área de concreto da tributária sobre o pilar, observando a maior das áreas nas duas direções. $A_{cf} = (b + 3h)h$

f_y (psi) é a tensão de escoamento do aço passivo a ser utilizado como reforço.

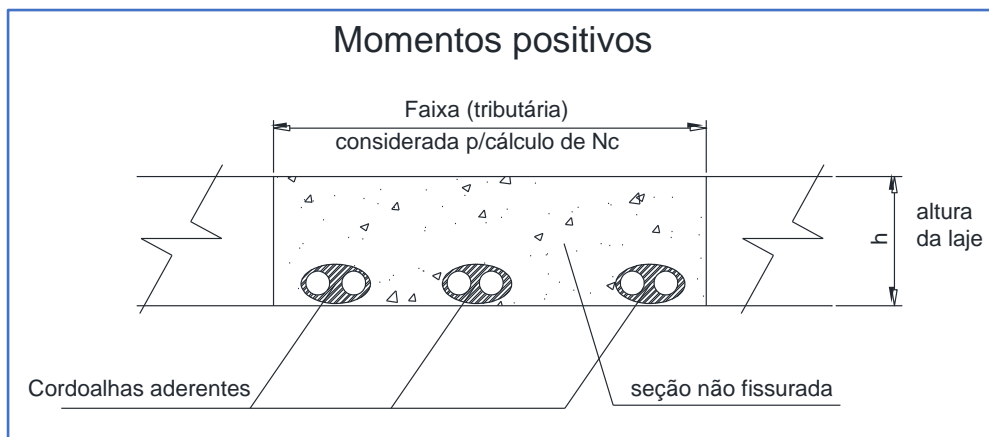


Figura 01: Região considerada para momentos positivos.

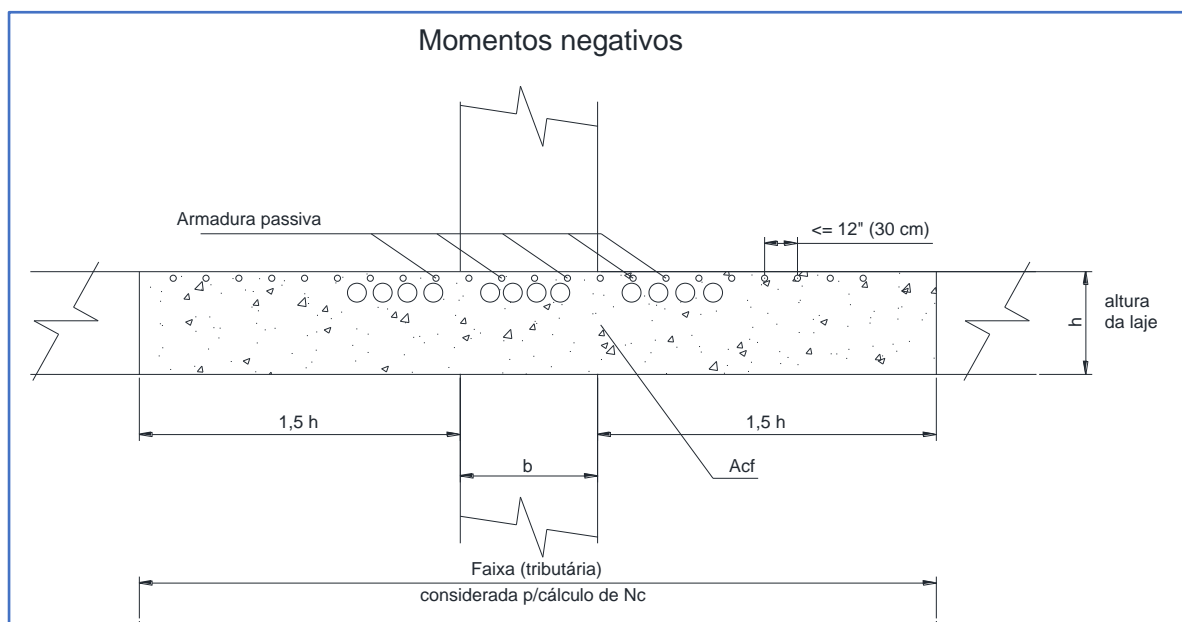


Figura 02: Região considerada para momentos negativos.

Lajes armadas em uma direção

Os itens anteriores consideram lajes lisas analisadas e armadas em duas direções, no caso de lajes armadas em somente uma direção com cordoalhas engraxadas ou aderentes, a quantidade de armadura passiva a ser utilizada é dada por:

- Lajes armadas em uma direção com cordoalhas engraxadas
Para lajes dimensionadas em uma direção e com sistema não aderente, cordoalhas engraxadas, a armadura mínima a ser utilizada é dada por:

$$A_{s,min} \geq 0,004 A_{ct}$$

Onde:

A_{ct} é parte da área da seção transversal entre a face tracionada e o centroide da seção bruta.

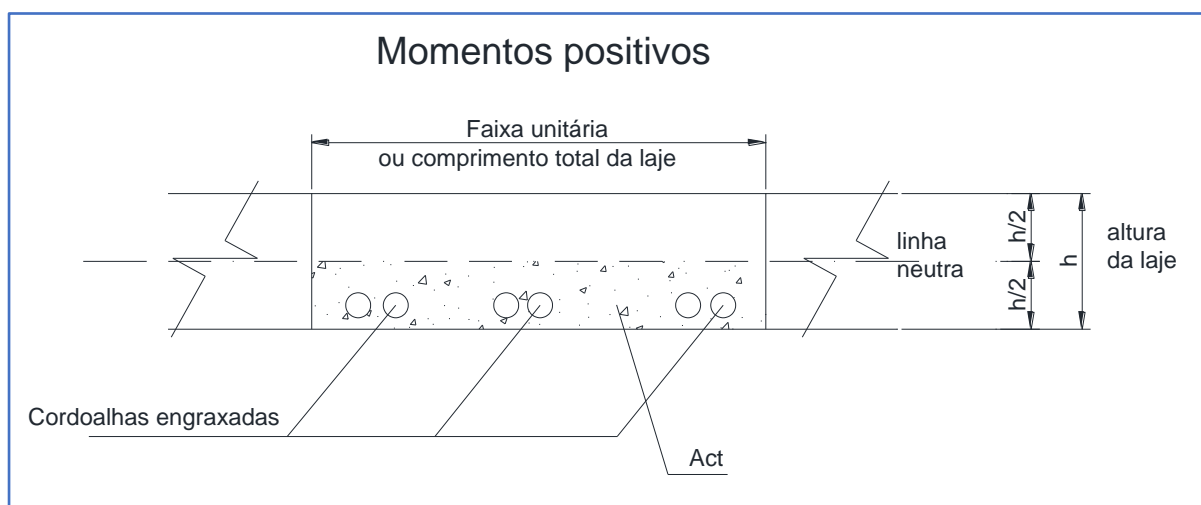


Figura 03: Região considerada para lajes armadas em uma direção.

- Lajes armadas em uma direção com cordoalhas aderentes.
Para lajes armadas em uma direção com protensão aderente, o valor total de armadura na seção transversal será dado pela somatória de A_s (armadura passiva) e A_{ps} (armadura de protensão, cordoalhas) e deve ser adequado para desenvolver uma carga fatorada total de pelo menos 1,2 vezes a carga de fissuração, calculada com base em f_r . Sendo f_r dado por:

$$f_r = 7,5 \lambda \sqrt{f'_c}$$

Onde:

λ é fator de ajuste para concretos leves. Adotado $\lambda=1$ para concretos normais.

- Lajes dimensionadas à flexão e cisalhamento com cordoalhas aderentes. Para lajes com cordoalhas aderentes e dimensionamento à flexão e cisalhamento, com carga atuante na seção duas vezes a carga de fissuração, a condição apresentada no tópico anterior não precisa ser satisfeita.

- Limites estabelecidos pela NBR 6118

A NBR 6118-2014 em seu item 19.3.3.2, coloca que para melhorar o desempenho estrutural em relação a sua ductilidade e melhor controle na distribuição de fissuras, é preciso que se adote armaduras mínimas passivas. Para as lajes protendidas com armadura ativa aderente ou não aderente os valores mínimos de armadura passiva são definidos no quadro 06 (tabela 19.1 da NBR 6118:2014).

Quadro 06: Valores mínimos para armaduras passivas aderentes

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - \rho_p \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,67\rho_{min}$
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min} - \rho_p \geq 0,5\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - \rho_p \geq 0,5\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$\frac{A_s}{s} \geq 20\%$ da armadura principal $\frac{A_s}{s} \geq 0,9\text{cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{min}$		
Onde: $\rho_s = \frac{A_s}{b_w h}$ e $\rho_p = \frac{A_p}{b_w h}$			

Os valores de ρ_{min} são apresentados no quadro 07 (tabela 17.3 da NBR 6118:2014).

Quadro 07: Taxas mínimas de armaduras de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $\rho_{min}(a)$ (%)														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

(a) Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado.

$$\rho_{min} = \frac{A_s min}{A_c}$$

Para a situação de não utilização do quadro 07, a taxa de armadura mínima a ser utilizada deve ser determinada a partir do dimensionamento da seção para um momento fletor mínimo dado pela expressão:

$$M_{d,min} = 0,8 W_0 f_{ctk,sup}$$

Onde:

W_0 é o módulo de resistência da seção transversal bruta do concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,sup}$ é a resistência característica superior do concreto à tração.

Independente dos valores de ρ_{min} determinados, deve ser utilizada uma taxa mínima absoluta de 0,15%.

O item 19.3.3.2 da NBR 6118:2014 apresenta o caso particular de lajes lisas ou lajes-cogumelo, com armadura ativa não aderente (cordoalhas engraxadas), no qual a armadura negativa passiva sobre os apoios deve ter valor mínimo de:

$$A_s \geq 0,00075 h l$$

Onde:

h é a altura (espessura) da laje;

l é o vão médio da laje medido na direção da armadura a ser colocada.

Essa armadura deve cobrir a região transversal a ela, compreendida pela dimensão dos apoios, acrescida de 1,5 h para cada lado.

No dimensionamento de armaduras passivas, visando atender as recomendações da NBR 6118:2014, deve ser utilizado o estado limite último (ELU) no tempo infinito. Portanto no dimensionamento de lajes protendidas, a armadura ativa é dimensionada para solicitações de serviço e as armaduras passivas para solicitações de ruptura.

Considerações e conclusões.

A partir da apresentação das recomendações das normas NBR 6118:2014 e ACI 318/19 feitas ao longo deste trabalho, e buscando atender o objetivo de fornecer ao projetista de estruturas, com clareza, as recomendações em relação à armadura mínima passiva em lajes protendidas, com sistema aderente ou não aderente. Apresenta-se nos itens seguintes algumas diferenças e comparações entre as duas normas.

No que se refere a armadura passiva mínima positiva, o ACI permite para os casos de $f_t \leq 2\sqrt{f_c'}$ seja dispensado a utilização de armadura passiva mínima. Enquanto que a norma NBR 6118:2014, determina a utilização de taxa de armadura mínima absoluta de 0,15%, independente do caso.

A tabela 19.1 (NBR 6118:2014) apresenta valores de armaduras mínimas para elementos submetidos à flexão, sejam eles constituídos por armaduras ativas ou não. No caso de lajes lisas ou lajes-cogumelo com armadura ativa não aderente, a formulação da tabela em questão deve ser substituída pela formulação $A_s \geq 0,00075 h l$.

O ACI/19 apresenta formulações diferentes para determinação de armaduras mínimas de sistemas aderentes e não-aderentes.

Nas recomendações do ACI 318/19 o tratamento de armadura mínima para lajes em duas direções difere do tratamento para lajes em uma direção.

No sistema não-aderente a NBR 6118:2014 não faz distinção na armadura mínima positiva entre lajes armadas em uma ou duas direções.

Para melhor entendimento e comparação entre as duas normas, e até mesmo para utilização da norma ACI 318/19 de maneira prática, sugere-se a utilização da mesma na sua versão ACI 318M, onde as unidades apresentadas estão no sistema internacional (SI).

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Projeto e execução de estruturas de concreto - procedimento", NBR 6118/ 2014. Rio de Janeiro.

ACI, COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. ACI 318R. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2019.

BIJAN O. AALAMI (Estados Unidos). Adapt. Layout Of Post-Tensioning And Passive Reinforcement In Floor Slabs.Redwood: Adapt, 2001. 12 p. (P2-01).

LOUREIRO, Giordano José. Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas. In: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. Anais. São Paulo: Epusp, 2006. p. 1734 - 1755.

SGARBI, Maurício. Dimensionamento de Lajes Protendidas. In: WORKSHOP PROTENSÃO, 4., 2017, Florianópolis. Curso. Florianópolis: Inaep, 2017. p. 01 - 97.