

LAJE TRELIÇADA PROTENDIDA X ARMADA: PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES

José Régis Teixeira¹
Rafael Alves de Souza²
Fábio Albino de Souza³

¹ Univali / Metro Quadrado Engenharia / jose.eng_civil@hotmail.com

² UEM/ Engracon Engenharia e Arquitetura / engracon@gmail.com

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

Resumo

As estruturas de concreto são uma realidade comum no cenário atual da construção civil no Brasil. No que tange à construção de edifícios, há uma predominância pela utilização de concreto moldado *in loco*, porém para esse tipo de obra é necessário um grande volume de fôrmas e escoramentos, além de mobilizar uma grande mão de obra. Com a utilização de elementos pré-fabricados, mais especificamente vigotas pré-fabricadas, reduz-se a utilização de escoramentos e elimina-se a utilização de formas no fundo da laje, sendo que as peças chegam na obra já concretada, possuem uma certa resistência portante, necessitando somente ser encaixados nos vãos, colocados os enchimentos e concretado a segunda parte. Apesar de já existirem vigotas protendidas que apresentam diversas vantagens sobre as vigotas convencionais e treliçadas, salienta-se a possibilidade de utilização de vigotas treliçadas com pré-tração aderente, devido ser mais simples de ser fabricados quando comparados com as vigotas protendidas, pois dispensa o uso de extrusora e ainda permite o acréscimo de armadura passiva no seu processo de fabricação e montagem, razão pela qual se elaborou esse estudo, objetivando analisar a viabilidade técnica da utilização de vigotas treliçadas pré-tracionadas principalmente em edificações de pequeno e médio porte.

Palavras-chave: Vigotas treliçadas; Pré-Tração; Concreto protendido.

Abstract

Concrete structures are a common reality in the current construction scenario in Brazil. In the case of construction of buildings, there is a predominance of the use of cast concrete on site, but for this type of work a large volume of formwork and shoring is required, in addition to mobilizing a large workforce. With the use of prefabricated elements, more guarded prefabricated, the use of shoring is reduced and the use of forms at the bottom of the slab is eliminated, and the pieces acquired in the already concrete work have a certain strong resistance. only needing to be fitted to the members, use the padding and embody the second part. Although there are already guarded lookouts that have several advantages over guarding and trussing, the possibility of using trussed studs with pre-adherent adhesions is noteworthy, due to the fact that they are simpler to be manufactured when compared to the protected studs, since it is not necessary or used. It also allows the addition of passive reinforcement in its fabrication and assembly process, which is why this study is elaborated, aiming to analyze the technical feasibility of using pre-tensioned lattice joints mainly in small and medium size editions.

Keywords: Lattice vaults; Pre-traction; Prestressed concrete.

Introdução

O mercado da construção civil vêm cada ano se inovando e buscando novas tecnologias, de forma a diminuir os custos e aumentar a produtividade na obra, como em qualquer outro ramo, é necessário que o profissional sempre busque se atualizar e familiarizar-se com as novas tecnologias que vêm surgindo constantemente, de tal forma que consiga acompanhar o mercado (PISONI; VARGAS, 2016).

De acordo com Debs (2017) a utilização de elementos pré-fabricados vêm levando alternativas mais econômicas e práticas para a construção civil, um dos elementos que vem ganhando espaço neste meio, são as lajes pré-fabricadas, se destacando as vigotas treliçadas e vigotas protendidas, principalmente para obras residenciais de pequeno e médio porte.

As lajes nervuradas formadas por vigotas pré-moldadas são basicamente elementos lineares apoiados em uma direção, sendo dispostos espaçadamente na outra direção, possuindo como elementos de enchimentos tabelas de cerâmicas ou poliestireno expandido (EPS), e após sua montagem é lançado uma capa de concreto para tornar-se uma peça monolítica, (FERREIRA; LIMA; DELALIBERA, 2017). Sua principal vantagem, é a fácil instalação, não demanda de fôrmas e necessita de pouco cibramento, garantindo maior rapidez na execução da obra.

Conforme Merlin et al. (2005), as vigotas treliçadas convencional por ser uma laje unidirecional, tendem apresentar maiores deslocamentos e menor capacidade portante para grandes vãos quando comparado com as tradicionais vigota protendida, lajes maciças e nervuradas bidirecionais moldado *in loco*.

Com o intuito de fornecer uma alternativa de menor custo com menor deslocamento, no entanto, segurando as características favoráveis das lajes treliçadas pré-moldada, tem-se o desenvolvimento as vigotas treliçadas pré-tracionada, sua vantagem em relação a vigota protendida é devido o processo de fabricação ser mais simples, dispensando o uso de extrusora e ainda permite o acréscimo de armadura passiva longitudinal e transversal as vigotas.

Diante do apresentado, buscou-se desenvolver um estudo entre a laje treliçada comum e a laje treliçada protendida pré-tracionada, realizando verificações relacionados aos vãos e flechas e apresentar o dimensionamento da laje treliçada protendida conforme critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2017.

Processo de Fabricação da Laje Treliçada Pré-Tracionada

Inicialmente é feito o tensionamento dos fios ao vazio em uma pista, em seguida colocam-se as treliças e então é feito a concretagem da peça na pista de protensão. Após o endurecimento do concreto e alcançada a resistência especificada em projeto, cortam-se os fios e a força de protensão é transmitida à peça por aderência, conforme figuras 1, (VERÍSSIMO; CÉSAR JUNIOR, 1998).

O sistema dispensa o uso de moldadoras, utilizadas nas vigotas protendidas convencionais, que representam um custo elevado de manutenção, operação e valor de aquisição. O sistema proposto consiste apenas de uma concretagem de uma forma, com operação bastante rápida, baixo custo e fácil adaptação aos diversos tamanhos de vãos (ALBUQUERQUE et al., 2005).

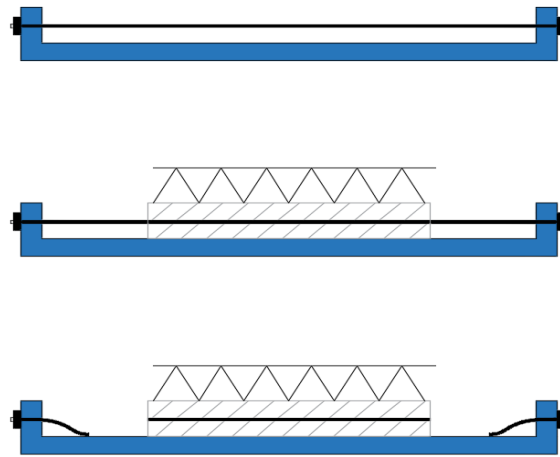


Figura 1- Etapas de protensão para laje treliçada pré-tracionada – Adaptado de Veríssimo e César Junior (1998)

Exemplo de Dimensionamento da Laje Treliçada Pré Tracionada

No dimensionamento das lajes treliçadas pré tracionada ou vigotas protendidas à uma peculiaridade, onde deve ser realizado as verificações na seção para a peça simples (somente a sapata) no ato da protensão, e depois na seção composta com concreto moldado *in-loco*.

Sendo que para este estudo, os fios de protensão (armadura ativa) estão posicionados no centro da sapata, de tal forma, para que ocasionasse apenas tensões normais e evitasse outros tipos de tensões, devido a seção da sapata ser pequena e ter pouca resistência.

Para este exemplo, foi considerado laje unidirecional com o vão útil de 6m, uso de concreto de resistência f_{ck} 25 MPa para o concreto da sapata da treliça e do concreto moldado *in-loco*, e para todo o dimensionamento foi considerado a seção homogeneizada, ou seja considerado a contribuição da armadura ativa e passiva da treliça. Para laje nervurada com espaçamento entre eixo menor ou igual a 65 cm, a ABNT NBR 6118:2014 permite dispensar a verificação da flexão da mesa.

Dados da Seção:

Na figura 2 estão apresentadas dimensões da seção da laje em estudo

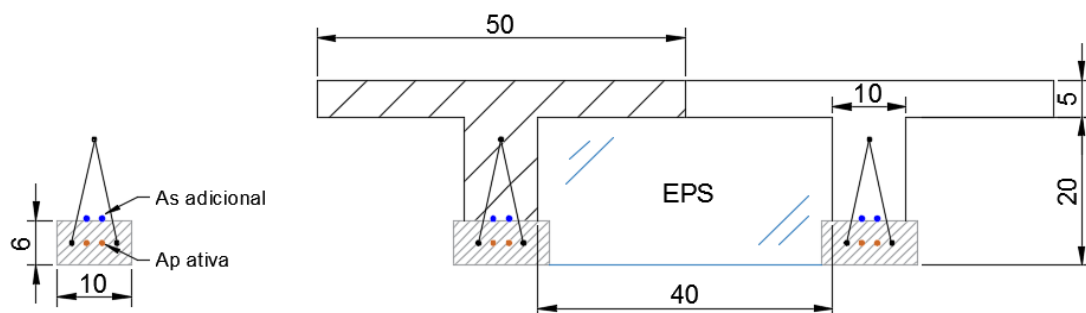


Figura 2 - Dimensões da seção estudada, medidas em cm. (O AUTOR, 2019)

Na tabela 1 e 2 apresenta respectivamente os dados da seção não homogeneizada e homogeneizada e na tabela 3 apresenta as propriedades das armaduras ativa e passiva.

Tabela 1 - Dados da seção não homogenizada

Dados geométricos no meio do vão – Seção não homogeneizada:			
Seção	Simple	Composta	Unidade
h	6	25	cm
bw	10		cm
Ac	60	450	cm ²
Ic	180	28729,94	cm ⁴
Ycg	3	16	cm
ys	-3	-9	cm
yi	3	16	cm
Ws	-60	-3196,16	cm ³
Wi	60	1794,38	cm ³
ep	0	13	cm

Tabela 2 - Dados da seção homogenizada

Dados geométricos no meio do vão - Seção homogeneizada:			
Seção	Simple	Composta	Unidade
fck	25,00	25,00	MPa
fckj	17,77 (5dias)	25,00 (28 dias)	MPa
Eci	23603,63	28000,00	MPa
np (coef. Hom.)	8,47	7,14	
ns (coef. Hom.)	8,90	7,50	
Aeq. p(ativa)	4,23	3,48	cm ²
Aeq. s(passiva)	4,47	3,68	cm ²
Ac, hom.	68,70	457,16	cm ²
Y, hom	3,00	15,77	cm
Yi	-3,00	-9,23	cm
Ys	3,00	15,77	cm
I, hom	180,00	30399,30	cm ⁴
Ws	-60,00	-3292,05	cm ³
Wi	60,00	1928,17	cm ³

Tabela 3 – Propriedades das armaduras ativa e passiva

Dados do Fio de Protensão e da Armadura da Treliça			
	CP175 RB	CA 60	
	Arm. Ativa	Arm. Passiva (treliça)	Unidade
2x Θ	6	6	mm
A Θ	0,283	0,283	cm ²
<i>f_{ptk}</i>	1750		MPa
<i>f_{pyk}</i>	1575	600	MPa
<i>f_{pyd}</i>	1370	522	MPa
E	200	210	GPa

Força de Protensão Inicial

Ferreira (2016) ressalta que para o dimensionamento é necessário que se tenha o cuidado de não haver uma sollicitação exagerada, que acarrete deformações irreversíveis devido às tensões na armadura ativa. Como para a laje treliçada pré-tracionada em estudo já possui a bitola e número de fios definidos, a força de protensão é determinada conforme a equação 3, através dos valores limites de operação, onde a ABNT NBR6118 2014 prescreve que a tensão na armadura ativa no ato da protensão (pré-tração) deve respeitar os limites da equação 1.

- Aços de relaxação baixa

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 f_{ptk} = 1.347,50 \text{ MPa} \\ 0,85 f_{pyk} = 1.338,75 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

$$Pi = N^\circ \text{ Fios} \times A_\emptyset \times \sigma_{pi} = 75,77 \text{ kN} \quad (2)$$

$$Pa = 0,97 \times Pi = 73,50 \text{ kN} \quad (3)$$

Onde:

σ_{pi} = tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão

f_{ptk} = resistência a tração da armadura ativa

f_{pyk} = resistência ao escoamento da armadura ativa

A_\emptyset = área de aço

Pi = força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração

Pa = força de protensão imediatamente anterior a transferência de tensões ao concreto

Para a força de protensão imediatamente anterior a transferência de tensões ao concreto, foi considerado 3% de perdas iniciais devido ser utilizados fios de protensão de relaxação baixa.

Verificação do Concreto no Ato da Protensão

Hanal (2005) saliente e conforme a ABNT NBR 6118 2014, a tensão máxima de compressão na seção de concreto, não pode ultrapassar 70% da resistência característica f_{ckj} prevista para idade de aplicação da protensão, para essa verificação foi considerado apenas a tensão normal produzido pelo cabo, devido os fios estarem localizados no centro da sapata, sem nenhuma excentricidade. A tensão do concreto no ato da protensão é dado pela equação 4.

$$\sigma_{cp} = \frac{P_a}{A_{sapata(hom)}} = -1,07 \text{ kN/cm}^2 \quad (4)$$

Considerado que a protensão foi realizado 5 dias após a concretagem, onde o concreto já atingiu 70% do f_{ck} , a tensão limite é dada pela equação 5.

$$\sigma_{limite} = 0,7 f_{ckj} = -1,24 \text{ kN/cm}^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{cp} \leq \sigma_{limite} \\ \text{OK}$$

Onde:

σ_{cp} = tensão de compressão no concreto devido a força de protensão

σ_{limite} = tensão máxima de compressão na seção de concreto

P_a = força de protensão imediatamente anterior a transferência de tensões ao concreto

$A_{sapata(hom)}$ = área da seção da sapata de concreto da vigota homogeneizada com o aço

$fckj$ = resistência característica do concreto prevista para a idade de aplicação da protensão

Solicitações no Meio do Vão

Para verificação dos esforços solicitantes foi necessário definir o carregamento de acordo com a ABNT NBR 6120:2019, conforme apresentado na tabela 4, sendo que a carga permanente é composta pelo peso próprio da sapata, concreto moldado *in-loco* e mais o peso de revestimento, quanto ao enchimento foi utilizado blocos EPS, sendo assim desconsiderado seu carregamento.

Tabela 4 - Carregamento da laje

Carregamento característico por nervura			
		Carga dist.	Momento Mk
g1	PP da seção completa	1,13 kN/m	5,06 kN.m
g2	Revestimento	1,50 kN/m ²	0,75 kN/m
q1	Carga acidental	1,50 kN/m ²	0,75 kN/m
Σ		2,63 kN/m	11,81 kN.m

O máximo esforço solicitante a flexão de cálculo no meio do vão é dado pela equação 6:

$$Md = 1,4x \frac{\Sigma(g+q)^2}{8} = 16,54 \text{ kN.m} \quad (6)$$

Onde:

Md = momento fletor de cálculo

g = carregamento permanente

q = carregamento variável

Estado Limite Último à Flexão

O estado limite último, corresponde a uma condição em que a estrutura não pode ser mais utilizada, por ter sofrido colapso ou deformações plásticas excessivas. A verificação no ELU por flexão pode ser feito considerando a hipótese de que as deformações das fibras são proporcionais à sua distância ao eixo neutro, ou seja, a seção plana permanece plana até a sua ruptura, sendo que a intensidade e a posição da resultante dos esforços que atuam na região comprimida do concreto podem ser deduzidas de um diagrama de tensões simplificado. Os diagramas mais utilizados são os retângulo equivalente (EMERICK, 2002).

Segundo Veríssimo et al. (1999) em vez da carga em colapso, adota-se como estado limite último um estado de deformação (anterior ao colapso), para qual a viga já pode ser considerada inutilizada. O dimensionamento deve ser realizado de tal maneira que a deformada da seção permaneça no domínio III, ou seja, o máximo encurtamento do concreto em $\epsilon_{cu} \leq 3,5\%$ e máxima deformação plástica excessiva da armadura de $\epsilon_{su} \leq 10\%$ (Figura 3).

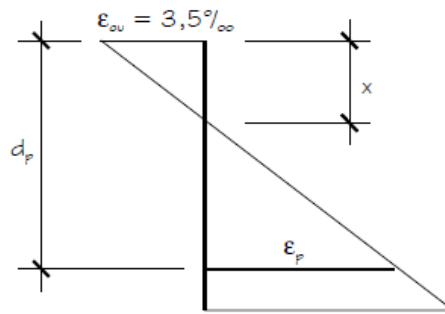


Figura 3 - Determinação do alongamento da armadura e encurtamento do concreto. (EMERICK, 2002)

Conforme Emerick (2002), para armaduras protendidas aderentes, deve-se considerar além da deformação devido à curvatura do concreto, o pré-alongamento aplicado devido a protensão, onde a tensão na armadura ativa é encontrada através da deformação total sofrida.

Cálculo do Pré Alongamento da Armadura Ativa

Gomes Junior (2009) destaca que o pré alongamento corresponde a deformação na armadura ativa, através de uma situação fictícia obtida pela aplicação de uma força externa P_n , denominada de força de neutralização, a qual anula as tensões no concreto, onde consiste em impor à armadura ativa em uma deformação adicional igual à deformação sofrida pelo concreto em função da tensão de compressão σ_{cp} . Abaixo segue as equações para determinação do pré-alongamento, onde que para o exemplo admitiu-se perda total de 20%.

$$P_{\infty} = (1 - 20\%) * P_i = 60,62 \text{ kN} \quad (7)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{\infty}}{A_c} + \frac{P_{\infty} \times e p^2}{I} = 0,492 \text{ kN/cm}^2 \quad (8)$$

$$P_{nd} = 0,9 \times (P_{\infty} + \alpha_p \times A_p \times \sigma_{cp}) = 56,35 \text{ kN} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{pnd} = \frac{P_{nd}}{A_p \times E_p} = 4,98\text{‰} \quad (10)$$

Onde:

P_{∞} = força de protensão considerando todas as perdas

P_i = força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração

σ_{cp} = tensão de compressão no concreto devido a força de protensão

$e p$ = excentricidade dos fios de protensão

A_c = área da seção completa

I = momento de inércia da seção completa

P_{nd} = força de neutralização

α_p = coeficiente de homogeneização (E_p/E_{cs})

E_p = módulo de elasticidade do aço de armadura ativa

E_{cs} = módulo de deformação secante do concreto

A_p = área de aço do conjunto de fios de protensão

ε_{pnd} = deformação devido a força de neutralização (pré-alongamento)

Cálculo das Deformações das Armaduras Ativa e Passiva

Ainda conforme Veríssimo et al. (1999) a deformação da armadura ativa ϵ_{pt} é encontrado através do diagrama da figura 3, considerando que a deformação é linear, de acordo com a hipótese de Bernoulli, verifica-se máxima deformação no ponto desejado, respeitando a máxima deformação da armadura ativa e o máximo encurtamento do concreto. No entanto, para determinar tais deformações é necessário conhecer a posição da linha neutra LN na seção da peça, que é definido pela equação de equilíbrio dos esforços, conforme figura 4.

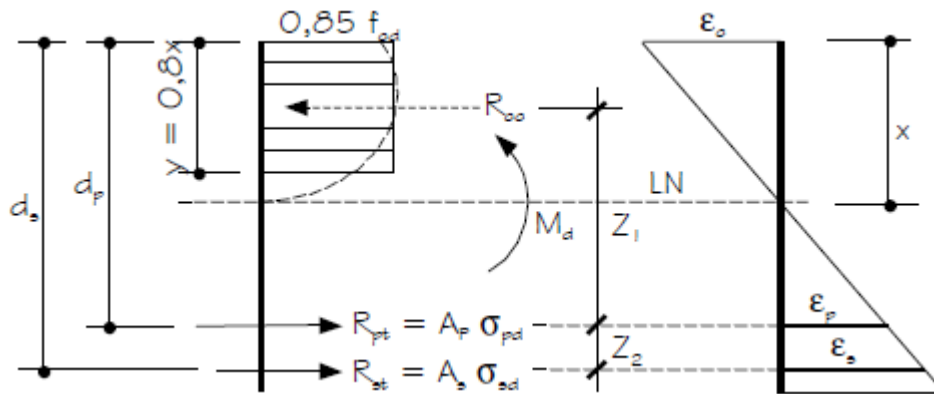


Figura 4 - Seção do concreto protendido no Estádio III. (EMERICK, 2002)

A linha neutra, pode ser encontrado através da equação 11, que segue os critérios da ABNT NBR 6118:2014 de uma forma sintetizada, devendo ser menor ou igual a $0,45d$ para que a estrutura tenha um comportamento dúctil (domínio 2 e 3) (DUARTE FILHO, 2018).

$$X = 1,25 * d * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Md}{0,425 * fcd * bw * d^2}} \right) = 1,38cm \quad (11)$$

Onde:

x = altura da linha neutra

d = braço de alavanca equivalente (considerado entre armadura ativa e armadura adicional posicionado acima da sapata da treliça)

Md = momento fletor solicitante

fcd = resistência a compressão de cálculo do concreto

bw = largura da mesa da seção

Através da linha neutra obtém-se o máximo encurtamento do concreto ϵ_c em relação a máxima deformação do aço de $\epsilon_s = 10\%$ conforme equação 12. Como a armadura ativa e armadura passiva da treliça estão na mesma posição, ambas possuem o mesmo alongamento, ou seja, $\Delta\epsilon_{pt} = \epsilon_s = 10\%$, sendo determinado apenas o alongamento da armadura adicional (caso seja necessário) devido que a mesma encontra-se um pouco mais elevada, logo tem um alongamento diferenciado que é determinado em função da sua altura, equação 13.

$$\epsilon_c = 10\% \frac{X}{dp - X} = 0,671\% \quad (12)$$

$$\epsilon_{s(\text{adicional})} = \epsilon_c \frac{dp - X}{X} = 8,30\% \quad (13)$$

Desta forma, obtêm-se o alongamento total dos fios de protensão compostos pelo pré-alongamento e o alongamento da flexão, através das equações 14 e 15, é possível certificar que ocorreu o escoamento do aço devido $\epsilon_{pt} > \epsilon_{pyd}$.

$$\epsilon_{pt} = \epsilon_{pnd} + \Delta\epsilon_p = 14,98\% \quad (14)$$

$$\epsilon_{pyd} = \frac{f_{pyd}}{E_p} = 6,85\% \quad (15)$$

Onde:

ϵ_c = deformação específica de encurtamento do concreto

ϵ_s = deformação plástica excessiva da armadura

X = altura da linha neutra

dp = altura útil referido a armadura

ϵ_{pt} = deformação total da armadura ativa

ϵ_{pnd} = deformação devido a força de neutralização (pré-alongamento)

$\Delta\epsilon_p$ = alongamento devido a flexão

E_p = módulo de elasticidade do aço de armadura ativa

f_{pyd} = resistência ao escoamento do aço de cálculo

Verificação da Necessidade de Armadura Adicional

Através das deformações é possível encontrar a tensão nos fios e nas armaduras passivas, devido que a tensão é igual deformação multiplicado pelo módulo de elasticidade ($\sigma = \epsilon \cdot E$), onde que $\sigma \leq f_{yd}$, sendo assim:

- Tensão solicitante na armadura ativa

$$\sigma_{pd} = \frac{14,98\% \times 20.000}{1,15} = 260,48 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{pyd} = 137 \text{ kN/cm}^2 \quad (16)$$

- Tensão solicitante na armadura passiva da treliça

$$\sigma_{sd(treliça)} = \frac{10\% \times 21.000}{1,15} = 182,61 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{yd} = 52,2 \text{ kN/cm}^2 \quad (17)$$

- Tensão solicitante na armadura passiva adicional (caso seja necessário)

$$\sigma_{sd(adicional)} = \frac{8,30\% \times 21.000}{1,15} = 151,61 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{yd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (18)$$

Para verificar se há necessidade de armadura adicional, realizasse o equilíbrio das forças e momentos da seção, sendo que $R_{cd} \leq R_{pd} + R_{sd}(\text{treliça}) + R_{sd}(\text{adicional})$ e $M_{rd} \geq M_{sd}$, para essa verificação foi considerado que o concreto moldado *in-loco* tenha resistência de f_{ck} 25MPa. As forças resultantes estão apresentadas nas seguintes equações:

- Resultante de compressão no concreto (R_{cd})

$$R_{cd} = 0,68 \times f_{cd} \times b_f \times X = 83,96 \text{ kN} \quad (19)$$

- Resultante de tração na armadura protendida (R_{pd})

$$R_{pd} = 137 \text{ kN/cm}^2 \times (2 \times 0,283 \text{ cm}^2) = 77,52 \text{ kN} \quad (20)$$

- Resultante de tração na armadura passiva da treliça (R_s)

$$R_s(\text{treliça}) = 52,2 \text{ kN/cm}^2 \times (2 \times 0,283 \text{ cm}^2) = 29,53 \text{ kN} \quad (21)$$

- Resultante de tração na armadura passiva adicional (R_s) caso seja necessário

$$R_s(\text{adicional}) = 43,5 \text{ kN/cm}^2 \times A_s \quad (22)$$

Onde:

f_{cd} = resistência a compressão de cálculo do concreto

b_f = largura da mesa da laje

x = altura da linha neutra

Com isso, é possível confirmar que $R_{cd} < R_{pd} + R_{st}$, não necessitando assim de armadura adicional. Faz também, a verificação de equilíbrio de momentos da seção de acordo com a figura 4, encontrado o momento resistente da peça $M_r = 20,20 \text{ kN.m}$ compara com o momento solicitante $M_{sd} = 16,54 \text{ kN.m}$, $M_{sd} < M_{rd}$ a peça em estudo não necessita de armadura adicional para o estado limite último.

Verificação do Estado Limite de Serviço

A ABNT NBR 6118:2014, indica quais os estados limites de serviços que devem ser respeitados em relação ao tipo de protensão aplicada, sendo que de acordo com Mello (2005) o tipo de protensão é em função da classe de agressividade do ambiente em que a peça vai está exposta, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Tipo de protensão

Verificações necessárias para pré tração			
Tipo de protensão	Classe de agressividade	Exigências	Combinações
Parcial	CAA I	ELS-W $W_k \leq 0,2 \text{ mm}$	Frequente
Limitada	CAA II	ELS - F	Frequente
		ELS - D	Quase permanente

Sendo que a combinação frequente é dada pela equação 23 e combinação quase permanente pela equação 24, onde que para esse exemplo o valor de $\psi_1 = 0,4$ e $\psi_2 = 0,3$ para edifícios residenciais conforme a ABNT NBR 6118:2014.

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \psi_1 \times F_{q1k} + \sum \psi_{2j} \times F_{qj,k} \quad (23)$$

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_{2j} \times F_{qj,k} \quad (24)$$

Onde:

$F_{d,ser}$ = valor de cálculo das ações para combinação de serviço

F_{q1k} = valor característico das ações variáveis principais diretas

$F_{qj,k}$ = valor característicos das demais ações variáveis

$F_{gi,k}$ = valor característicos das ações permanentes diretas

ψ_1 = fator de redução de combinação frequente para ELS

ψ_2 = fator de redução de combinação quase permanente para ELS

Para o exemplo foi considerado protensão limitada, sendo assim, no estado limite de descompressão (ELS-D) não pode haver tração na seção e no estado limite de formação de fissura (ELS-F) a tração máxima permitida deve ser menor que $f_{ct,f}$, considerando a seção como T, a máxima resistência à tração na flexão é dada pela equação 25.

$$f_{ct,f} = 0,252 \times f_{ckj}^{2/3} = 0,22 \text{ kN/cm}^2 \quad (25)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = resistência do concreto à tração na flexão na data de protensão

f_{ckj} = Resistência característica do concreto prevista para a idade de aplicação da protensão

Na tabela 6, encontram-se os valores de tensões da peça em estudo para cada estado limite de serviço, onde pode observar que só houve tensões de compressão, sendo assim a peça está respeitando os estados limites para protensão limitada.

Tabela 6 - Tensões solicitantes na peça para cada estado limite de serviço

Verificações de estado limite de serviço para a peça em análise			
		Tensão solicitante	Unidade
ELS-F	σ superior	-0,19 kN/cm ²	kN/cm ²
	σ inferior	-0,03 kN/cm ²	kN/cm ²
ELS-D	σ superior	-0,18 kN/cm ²	kN/cm ²
	σ inferior	-0,05 kN/cm ²	kN/cm ²

Outra verificação que deve ser realizada também, é a do deslocamento excessivo (ELS-DEF), sendo que para estudo foi definido como flecha limite $L/350$, como a laje possui vão de 6m a deslocamento máximo permitido é de 1,71cm.

Para a verificação do deslocamento máximo foi considera a seção composta, já com concreto moldado *in-loco*, a inércia bruta, devido não ter ocorrido fissuração na peça e retirada do escoramento em 15 dias, obtendo-se os seguintes deslocamentos apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Deslocamentos da peça em análise

Verificação do estado limite de deformação excessiva - DEF			
Flecha devido:		Unidade	Coef. Fluência
Σ Carga permanente g	0,38	cm	1,27
Carga variável q	0,15	cm	
Protensão	-0,42	cm	
Flecha imediata	0,11	cm	
Flecha final	0,13	cm	

Como a flecha máxima permitida é de 1,71cm, pode-se observar que a peça apresentou deslocamento dentro do limite.

Exemplos Comparativos

Com intuito de avaliar a viabilidade do uso da laje treliçada protendida com pré tração, e demonstrar a sua vantagem relação a laje treliçada comum, desenvolveu-se um estudo comparativo em relação ao vãos versus deslocamentos.

Para o dimensionamento das lajes treliçadas comum, utilizou-se o auxílio do software STG Software de Treliças Gerdau - versão 5.1.8 desenvolvido por Knijnik Engenharia S/S Ltda e para o dimensionamento da treliçada protendida com pré tração utilizou-se planilhas eletrônicas desenvolvida pelo o autor junto ao auxílio do software Microsoft Excel, onde seguiu o mesmo processo de dimensionamento apresentado no exemplo anterior.

Para o estudo foram considerados as seguintes características:

- Resistência do concreto da sapata e moldado *in-loco* de F_{ck} : 30MPa;
- Aplicação da protensão após o concreto ter atingido 70% de f_{ck} ;
- Armadura protendida 2 fios de 6mm CP175 RB;
- Protensão aderente tipo limitada e parcial;
- Armadura passiva da treliça CA-60 (5mm e 6mm) e armadura adicional CA-50;
- Adotado uso de EPS como enchimento, desconsiderando o peso próprio;
- Carregamento de 150 kgf/m² de revestimento e 150kgf/m² acidental;
- Considerado a retirada do escoramento em 15 dias;
- Capa de concreto de 5cm para todas as lajes.

Foi adotado a mesma seção para laje treliçada comum e treliçada protendida (pré-tração) conforme figura 5, sendo variado apenas a altura do enchimento e assim consecutivamente a altura total da laje e variado o vão da laje e medido o deslocamento a cada 50cm, sendo realizado para 3 modelos, lajes com altura de 15cm, 25cm e 30cm.

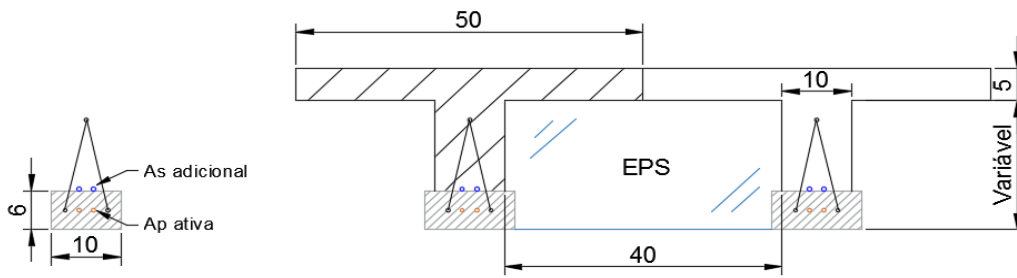


Figura 5 - Modelo da seção em análise. (O AUTOR, 2019)

Nos gráficos 1, 2 e 3 apresentam os resultados obtido com os modelos, onde pode observar que as lajes treliçadas protendidas (pré-tração) obtiveram menores deslocamentos que as lajes treliçadas comum, principalmente para vãos maiores.

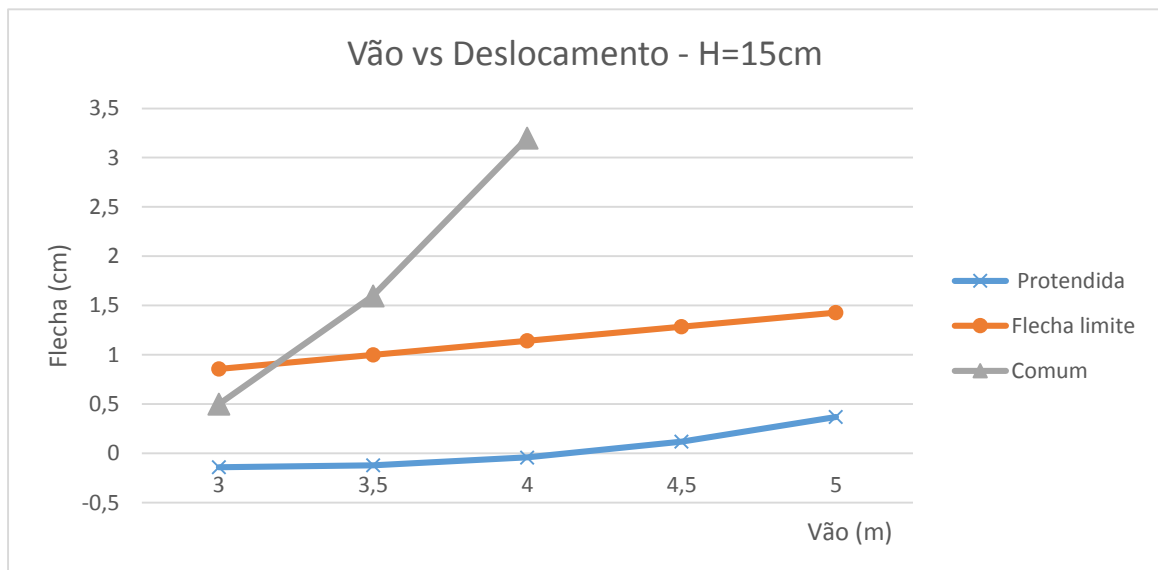


Gráfico 1- Análise da flecha da laje treliça comum e pré-tracionada em relação ao vão - Altura da laje 15 cm

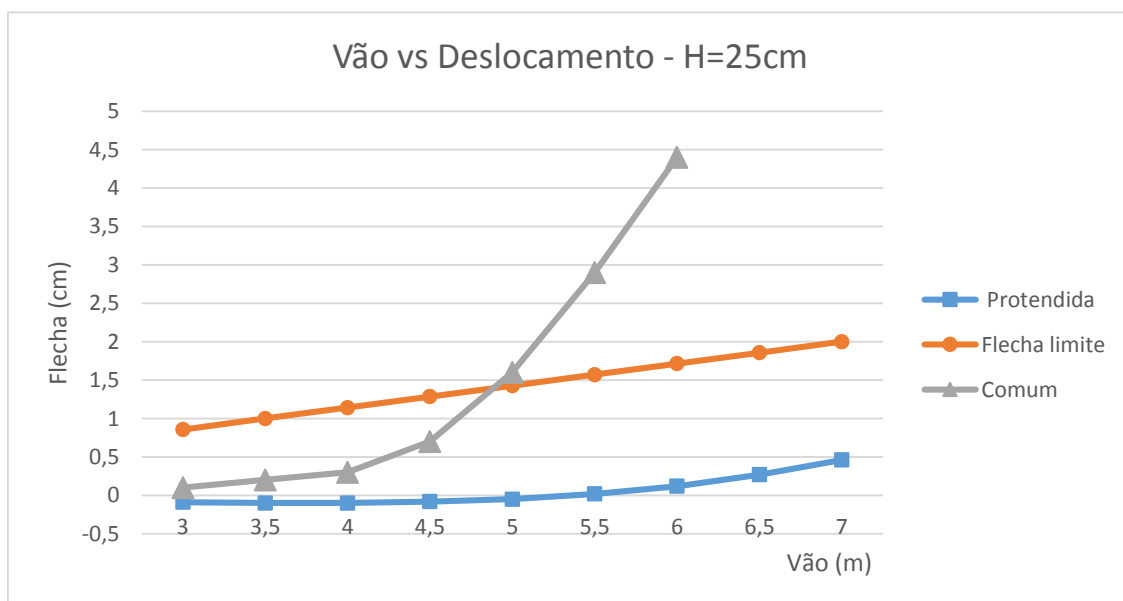


Gráfico 2- Análise da flecha da laje treliça comum e pré-tracionada em relação ao vão - Altura da laje 25 cm

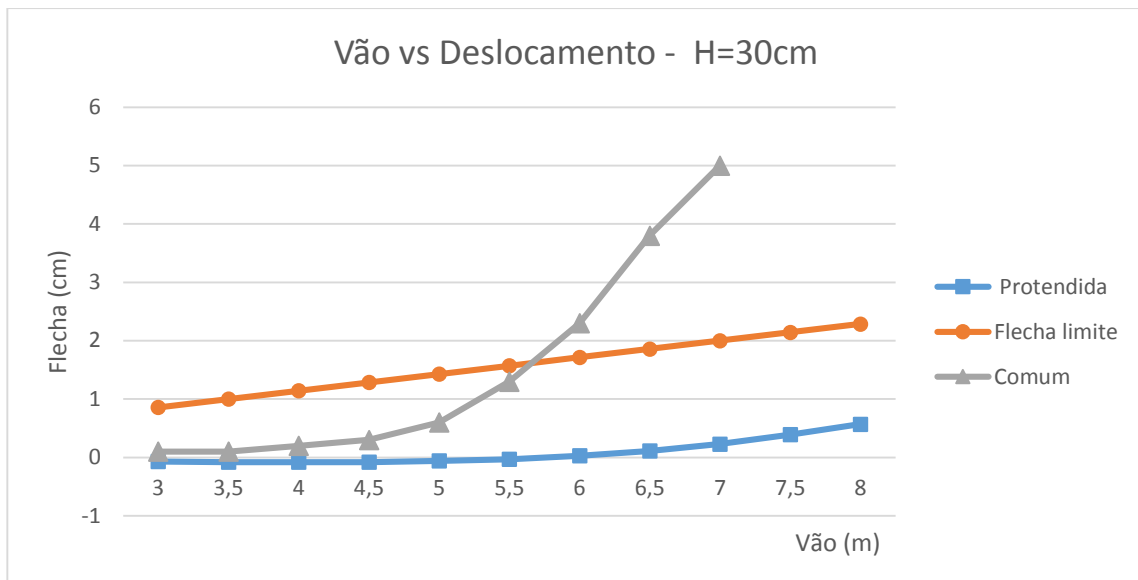


Gráfico 3- Análise da flecha da laje treliça comum e pré-tracionada em relação ao vão - Altura da laje 30 cm

A tabela 8 apresenta os vãos máximos das lajes treliçadas com pré-tração para que a estrutura permaneça com protensão tipo limitada.

Tabela 8 - Vãos máximos para tipo de protensão limitada

Melhor aproveitamento da Laje treliçada protendida			
Vão (m)	Flecha (cm)	Altura da Laje	Tipo de Protensão
3	-0,14		Limitada
3,5	-0,08	h 13 cm	
4	0,08		
4,5	0,12	h 15 cm	Limitada
5	-0,05		
5,5	0,02	h 25 cm	Limitada
6	0,12		
6,5	0,11	h 30 cm	Limitada
7	0,23		
7,5	0,39	h 30 cm	Parcial
8	0,57		

Conclusão

A laje treliçada pré tracionada com fios de protensão (armadura ativa) em sua sapata, apresentou um melhor desempenho quando comparado com a laje treliçada comum, onde foi possível observar que os deslocamentos (flechas) em todas as alturas de lajes e vãos em estudo ficaram inferiores aos deslocamentos limites ($L/350$) previsto pela ABNT NBR 6118:2014, salienta-se também, que através do estudo realizado, constatou-se que a laje treliçada pré-tracionada conseguiu vencer vãos bem maiores que o da laje treliçada comum, chegando com vãos de até 8m (laje protendida) contra vão de 5,5m da laje treliçada comum.

Também mostrou-se viável diante do seu desempenho e de ser uma peça de baixo custo de fabricação quando comparado com as vigotas protendidas convencionais, devido não necessitar de moldadores e extrusores que possuem um alto custo, ainda além de que as lajes treliçadas quando têm um aumento de solitação podem ser complementadas com armaduras passivas, já as vigotas têm que aumentar a protensão, e as vezes conseqüentemente a seção da peça. Além disso, as lajes treliçadas possuem a armadura passivas da treliça que ajuda a combater os esforços de cisalhamento e paralelamente melhora também a transferência de esforços entre o concreto pré-moldado e o moldado *in loco*.

Por ser uma estrutura pré-tracionada a ABNT NBR 6118:2014 exige que para ambientes com CAA II (urbana) o uso do tipo de protensão seja limitada, no estudo verificou-se que para esse tipo de protensão o limitante dos vãos foi o estado limite de descompressão (ELS-D), onde uma das soluções seria aplicar um pouco mais de protensão na peça, e verificar a necessidade do aumento da seção da sapata da treliça, para que pudesse passar na verificação da máxima tensão no ato da protensão.

Por se tratar de uma peça pré-fabricada, além do estudo apresentado deverá ser realizado verificações durante o manuseio da peça e de escoramento durante a montagem da laje, onde não foi analisado por não fazer parte do escopo do estudo.

Referências

ALBUQUERQUE, A. T. de et al. Lajes Treliçadas Protendidas (Pré-Tração). **1º Encontro Nacional de Pesquisa-projeto-produção em Concreto Pré-moldado**, São Carlos, p.1-10, 03 nov. 2005. Anual.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de Concreto - Procedimentos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 60 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. 3 ed. Rio de Janeiro, 2017. 86 p.

DEBS, M. K. E. **Concreto pré-moldado**: fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 438 p.

DUARTE FILHO, L. A. **Estruturas de concreto armado: de acordo com a NBR 6118:2014**. Itajaí: Univali, 2018. 270 p.

EMERICK, A. A. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Brasília: [s.n.], 2002. 118 p. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/PROJETO%20E%20EXECUC%3%87%C3%83O%20DE%20LAJES%20PROTENDIDAS.%20Eng%C2%BA.%20Alexandre%20Anoz%C3%A9%20Emerick,%20MSc..pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

FERREIRA, T. R. **Otimização estrutural de lajes formadas por vigotas treliçadas com e sem protensão**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

FERREIRA, T. R.; LIMA, M. C. V. de; DELALIBERA, R. G. Otimização estrutural de lajes formadas por vigotas treliçadas com e sem protensão. **Ciência & Engenharia**. Uberlândia, p. 1-9. 09 jul. 2017.

GOMES JUNIOR, H. A. **Vigas protendidas - Estudo da norma e modelagem com auxílio de programa de análise comercial**. 2009. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2009.

HANAL, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido: e-book de apoio para o curso de engenharia civil**. E-Book de apoio para o curso de engenharia civil. São Carlos: Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, 2005. 116 p.

MELLO, A. L. V. **Cálculo de laje lisas com protensão parcial e limitada**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

MERLIN, A. J. et al. Análise do efeito da protensão em lajes pré-moldadas com armação treliçada. 1º **Encontro Nacional de Pesquisa-projeto-produção em Concreto Pré-moldado**, São Carlos, p.1-10, 03 nov. 2005. Anual.

PISONI, F. U.; VARGAS, A. **Análise experimental da capacidade portante de vigotas treliçadas e protendidas utilizadas em lajes pré fabricadas usuais**. 2016. 16 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

VERÍSSIMO, G. S. et al. **Concreto Protendido: Estados limites**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil, 1999. 40 p.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JUNIOR, K. M. L. **Concreto Protendido: Perdas de Protensão**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil, 1998. 39 p.