

Laje Alveolar Produzida Com Fôrma Fixa – Ganho com a Utilização de Armadura de Cisalhamento

Thiago Bindilatti Inforsato¹, Roberto Chust Carvalho², Marcelo de Araujo Ferreira³

¹UFSCar / Departamento de Engenharia Civil / thiago@pretec.com.br

²UFSCar / Departamento de Engenharia Civil / robertochustcarvalho@gmail.com

³UFSCar / Departamento de Engenharia Civil / marcelof@ufscar.br

Resumo

Um sistema alternativo para a produção de lajes alveolares sem utilização de máquinas de extrusão ou moldagem, é a utilização de isopor (EPS) para a moldagem dos alvéolos. Esta laje é definida pela NBR14861:2011 como laje alveolar com fôrma fixa, pois diferentemente da laje alveolar esse sistema de produção utiliza formas nas laterais e o seu concreto é fluido. Esse sistema produtivo apresenta várias versatilidades se comparado com o sistema de produção da laje alveolar. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de posicionamento de armadura de cisalhamento, que se o mecanismo de ruptura da laje for definido pela força cortante, pode se ter um ganho de capacidade de carga com o posicionamento desta armadura. Este trabalho tem como objetivo, um breve relato do processo produtivo para este tipo de laje com o posicionamento da armadura transversal e apresentar uma análise teórica do aumento da capacidade de carga da laje com e sem estribo, mantendo as mesmas características geométricas. Para as considerações analíticas, utilizam-se as recomendações da NBR14861:2011 e da NBR6118:2014. Na Figura 1 apresenta-se uma laje sendo produzida com o posicionamento da armadura transversal.



Figura 1 – Etapa do processo produtivo. Seção transversal.

Palavras-chave

Laje alveolar; pré-tração; armadura de cisalhamento; processo produtivo.

Processo produtivo

Conforme apresentado em INFORSATO (2017), o processo produtivo de laje alveolar produzida com fôrma fixa, ou seja, sem a utilização de equipamentos de extrusão e moldagem são extremamente distintos entre eles.

Uma característica relacionada à etapa de concretagem para a fabricação desta laje, é que esta se assemelha a concretagem de uma estrutura convencional, ou seja, existe o lançamento e o adensamento do concreto. Esse sistema apresenta uma grande versatilidade quanto à possibilidade de alteração da geométrica dos alvéolos pela simples alteração do ESP. Outra grande vantagem também está relacionada com a possibilidade de posicionamento de armadura complementar, tanto longitudinais quanto amaduras transversais (estribos), que é o foco deste trabalho.

Como se sabe as lajes alveolares produzidas por equipamentos são compostas unicamente de armadura de protensão, pois o equipamento de utilização não permite o posicionamento de qualquer outro tipo de armadura.

Na Figura 2 pode ser visto com detalhe, o posicionamento da armadura transversal na extremidade da laje (região com maior força cortante).



Figura 2 – Detalhe do posicionamento da armadura transversal.

Uma outra possibilidade é interromper o EPS na extremidade da laje, com isso eliminam-se as nervuras ficando desta forma com a extremidade maciça. Para um esquema estático bi-apoiado com a carregamento uniformemente distribuído, sabe-se que o maior esforço cortante se dá nos apoios (extremidade), demonstrando assim que para uma determinada situação pode ser interessante a utilização deste recurso. Na Figura 3, pode ser visto uma etapa da produção da laje alveolar com fôrma fixa, com a interrupção do EPS na extremidade da laje.



Figura 3 – Interrupção do EPS na extremidade da laje alveolar produzida com fôrma fixa.

Neste sistema produtivo permite-se a alteração da geometria da seção transversal, com a modificação do EPS. Além da alteração da fôrma do EPS (circular, retangular, oblongo, etc.) pode-se aumentar ou diminuir o número de nervuras, como o acréscimo ou retira da uma ou mais linha da EPS. Na Figura 4, pode ser visto duas seções de lajes alveolares com a utilização de EPS, com a variação do número de nervuras decorrente a variação da geometria do EPS.

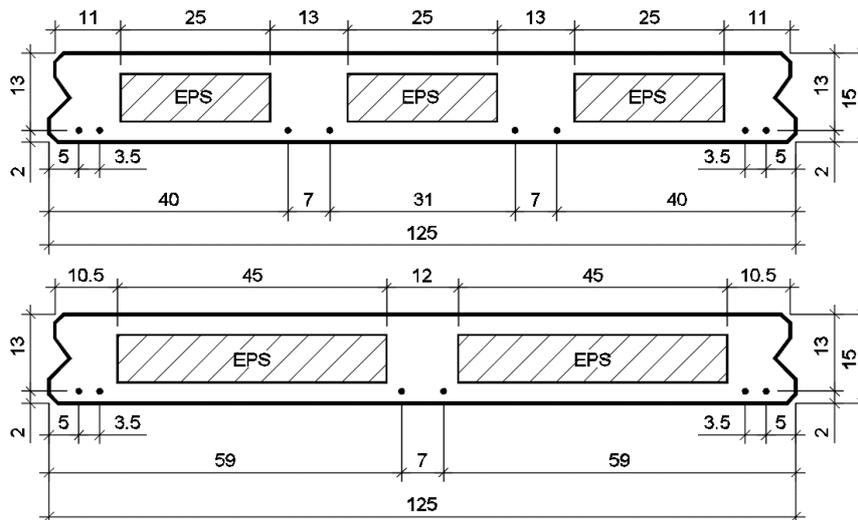


Figura 4 – Possibilidade de seção transversal com a modificação do EPS.

Para melhor clareza e esclarecimentos sobre o processo produtivo, consultar INFORSATO (2017).

Exemplo

Para melhor clareza para o leitor, é apresentado na sequência o dimensionamento considerando a laje alveolar com fôrma fixa sem estribos com base na NBR 14861:2011 e com o posicionamento dos estribos tendo como base a NBR 6118:2014.

Dados gerais

Os dados gerais incluem: características geométricas da seção, características mecânicas do concreto, dados relativos ao aço de protensão e dados complementares.

A seção transversal da laje alveolar produzida com fôrma fixa protendida que é objeto de estudo deste trabalho, pode ser vista na Figura 5. A seção utilizada baseou-se em uma seção típica de um pré-fabricador que utiliza esse sistema para a confecção de suas lajes alveolares.

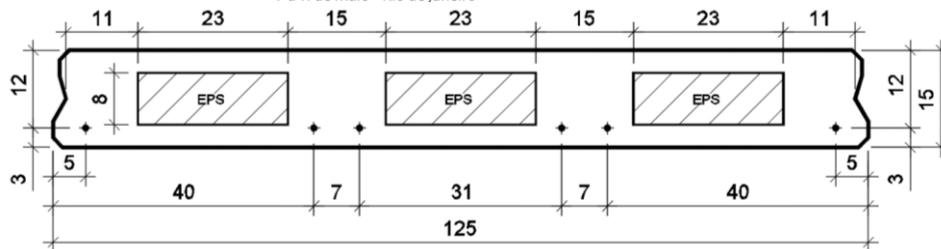


Figura 5 – Seção transversal da laje alveolar produzida com fôrma fixa.

Na Figura 6 pode ser visto o posicionamento dos estribos considerados para a análise deste trabalho.

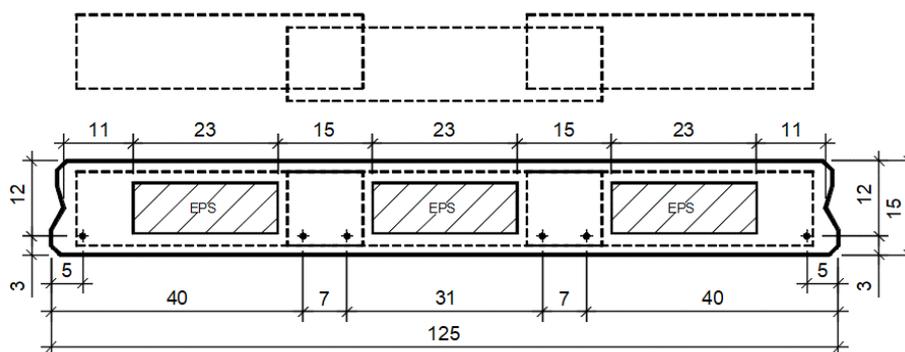


Figura 6 – Seção transversal da laje alveolar produzida com fôrma fixa com o posicionamento de estribos.

Os dados gerais incluem: características geométricas da seção, características mecânicas do concreto, dados relativos ao aço de protensão e dados complementares.

$A_c = 1293 \text{ cm}^2$ - área da seção transversal.

$I = 31686 \text{ cm}^4$ - momento de inércia da seção transversal.

$h = 15 \text{ cm}$ - altura da seção.

$d' = 3 \text{ cm}$ - distância da borda inferior ao centro da cordoalha.

$d = 12 \text{ cm}$ - distância do centro da cordoalha até a borda superior da laje.

Alvéolo = $8 \times 23 \text{ cm}$ - dimensões do alvéolo em EPS.

$b_{\text{laje}} = 125 \text{ cm}$ - largura da laje alveolar produzida com fôrma fixa.

$b_w = 52 \text{ cm}$ - somatório das larguras das almas.

$y_{cg} = 7,46 \text{ cm}$ - distância do centro de gravidade a borda inferior.

Características dos materiais

$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ - resistência do concreto à compressão.

Aço categoria CA60.

$A_s = 1,68 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($\phi 5,0 \text{ mm}$ 6 ramos a cada 10 cm.)

Aço categoria CP190RB.

$E_p = 200 \text{ kN/mm}^2$ - módulo de elasticidade do aço.

Cordoalha $3 \times 4,5 \text{ mm}$ com área de $0,462 \text{ cm}^2$ e diâmetro nominal de $0,96 \text{ cm}$.

$A_p = 2,772 \text{ cm}^2$ - área total da armadura de protensão (seis cordoalhas).

$\sigma_{pi} = 1453 \text{ MPa}$ – tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas (valor abaixo do máximo permitido pela NBR6118:2014 – item 9.6.1.2.1).

Para aços da classe RB (baixa relaxação), a tensão na saída do aparelho deve atender aos limites:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,85 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (1)$$

$f_{ptk} = 1900 \text{ MPa}$ (resistência característica da armadura ativa à tração).

$f_{pyk} = 1710 \text{ MPa}$ (resistência característica de escoamento da armadura ativa).

Para este caso a tensão limite de protensão é definida pela tensão de escoamento $\sigma_{pi} \leq 0,85 \cdot 1710 = 1453 \text{ MPa} = 145,30 \text{ kN/cm}^2$.

NBR 14861:2011

FRANÇA (2012) ao calcular a força cortante resistente através das equações apresentadas na NBR 14861:2011, verificou que esta norma está muito mais rigorosa no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do que a NBR 6118:2014. Há grande diferença nos resultados calculados, mesmo para lajes sem preenchimento de alvéolos.

A autora consultou a comissão que elaborou a NBR 14861:2011 e verificou que há um erro no texto da norma, pois o coeficiente α foi considerado em duplicidade (α e 0,15). A ABNT emitirá em breve uma emenda da NBR 14861:2011 com as correções necessárias, segundo destaca a autora.

Deve-se ser calculada a capacidade a resistência ao cisalhamento da laje alveolar pela NBR 14861:2011 através das seguintes expressões, tanto para laje com ou sem capa estrutural.

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (2)$$

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad (3)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad (4)$$

V_{Rd1} : é a força resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural.

f_{ctd} : é a resistência a tração do concreto pré-moldado e do moldado no local.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2}}{1,4} = 1,754 \text{ MPa} = 1,754 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2 \quad (5)$$

$\Sigma b_{w,1}$: largura total da nervura da laje, $\Sigma b_{w,1} = 520 \text{ mm}$.

d : é a altura efetiva da seção da laje, $d = 150 - 30 = 120 \text{ mm}$.

k : coeficiente correspondente a:

$$k = 1,6 - d \geq 1 \rightarrow k = 1,6 - 0,12 = 1,48 \text{ m} \quad (6)$$

ρ_1 : corresponde a taxa de armadura específica para a laje alveolar pré-moldada.

$$\rho_1 = \frac{A_p}{\Sigma b_{w,1} \cdot d} = \frac{277,2}{520 \cdot 120} = 0,0044 \quad (7)$$

A_p : área da seção transversal da armadura protendida: $6\phi 3 \times 4,5 \text{ mm}$ – $A_p = 6 \times 46,2 \text{ mm}^2 = 277,2 \text{ mm}^2$.

$\sigma_{cp,1}$: é a tensão de compressão do concreto devido a força de protensão de projeto para a caso de laje sem alvéolo preenchido (ou com alvéolo preenchido após a liberação da protensão).

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} = \frac{1,26 \cdot 277,20}{129300} = 2,710 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \quad (8)$$

N_p : é a força de protensão final, depois de todas as perdas.

$$\sigma_{p(-18,49\%)} = 0,8151 \cdot 1453 = 1184 \text{ MPa} = 1,18 \text{ kN/mm}^2 \quad (9)$$

A_c : é a área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada, $A_c = 129300 \text{ mm}^2$.

Finalmente:

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (10)$$

$$V_{Rk1} = 55,73 + 25,37 = 81,10 \text{ kN} \quad (11)$$

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot 1,754 \times 10^{-3} \cdot 1,48 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,0044) \cdot (520 \cdot 120) = 55,73 \text{ kN} \quad (12)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot 2,710 \times 10^{-3} \cdot (520 \cdot 120) = 25,37 \text{ kN} \quad (13)$$

NBR 6118:2014

Calcula-se a capacidade resistente da laje alveolar com estribos pela NBR 6118:2014 através das seguintes expressões:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (14)$$

$$V_c = V_{c0} \cdot (1 + M_0/M_{Sd,m\acute{a}x}) \leq 2V_{c0} \quad (15)$$

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (16)$$

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (17)$$

V_{Rd3} : é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal.

V_c : é a parcela da força cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo em treliça.

V_{c0} : é o valor de referência para o V_c , quando $\theta = 45^\circ$.

f_{ctd} : é a resistência inferior a tração do concreto, com $\gamma_c = 1,4$.

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c \quad (18)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2}}{1,4} = 1,754 \text{ MPa} = 1,754 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2 \quad (19)$$

b_w : largura total da somatória das nervuras da laje, $b_w = 520 \text{ mm}$.

d : é a altura efetiva da seção da laje, $d = 150 - 30 = 120 \text{ mm}$ para a armadura ativa e $d = 150 - 15 = 135 \text{ mm}$ para armadura passiva.

$$V_{c0} = 0,6 \cdot 1,754 \times 10^{-3} \cdot 520 \cdot 135 = 71,14 \text{ kN} \quad (20)$$

V_{sw} : é a parcela da força cortante resistida pela armadura transversal.

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) = (6 \cdot 28/100) \cdot 0,9 \cdot 135 \cdot \frac{0,6}{1,15} \cdot (\text{sen}90 + \text{cos}90) = 106,50 \text{ kN} \quad (21)$$

Sabe-se que a parcela V_c está relacionada com a parcela V_{c0} , que por sua vez está relacionada com a protensão e o tramo em análise, contudo a parcela resistida pelo concreto (V_c) por ser aumentada em no máximo duas vezes ($V_c \leq 2V_{c0}$). Neste trabalho para análise do potencial de ganho quanto a resistência ao cisalhamento quanto ao posicionamento da armadura transversal, consideram-se três valores para a parcela $\frac{M_0}{M_{Sd,m\acute{a}x}}$, sendo iguais a zero, 0,5 e 1,0. Os valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Variação da parcela V_c em função da parcela V_{c0} .

| V_{c0} (kN) | $\frac{M_0}{M_{Sd,m\acute{a}x}}$ | $1 + \frac{M_0}{M_{Sd,m\acute{a}x}}$ | V_c (kN) |
|---------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| 71,14 | zero | 1,0 | 71,14 |
| 71,14 | 0,5 | 1,5 | 106,71 |

71,14

1,0

2,0

142,28

Finalmente as possibilidades da capacidade resistente da laje alveolar produzida com fôrma fixa com o posicionamento de armadura transversal (estribos) estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor final da capacidade resistente ao cisalhamento com o posicionamento de estribos.

| V_c (kN) | V_{sw} (kN) | V_{Rd3} (kN) |
|------------|---------------|----------------|
| 71,14 | 71,14 | 177,64 |
| 106,71 | 106,71 | 213,21 |
| 142,28 | 142,28 | 248,78 |

Conclusão

Como apresentado de forma sucinta, o processo produtivo da laje alveolar com fôrma fixa apresenta a possibilidade de posicionamento de armaduras frouxa além da armadura de protensão, o que pode promover um maior ganho na capacidade resistente da laje.

Sabe-se que a laje alveolar apresenta alguns mecanismos de ruptura, dentro dos quais destacam-se: ruptura por falha na ancoragem, ruptura por cisalhamento, ruptura por interação entre o cisalhamento e a flexão e ruptura por flexão.

Considerando que a laje em estudo tivesse governada a sua ruptura pelo cisalhamento, o posicionamento de armadura complementar proporcionaria um ganho significativo quanto à resistência da força cortante de 81,10 kN a 177,64 kN, podendo chegar até 248,78 kN dependendo do ganho com a parcela $M_0/M_{Sd,máx}$. Esse ganho poderia ser ainda maior fazendo uma simples troca da bitola dos estribos utilizado ou diminuindo o espaçamento entre eles. Uma outra possibilidade seria fazer aumentar o número de ramos no arranjo dos estribos.

Para a laje alveolar produzida com equipamentos também é possível uma modificação para o ganho da capacidade resistente ao cisalhamento, que é o preenchimento de alvéolos, porém, essa intervenção limita o preenchimento a no máximo dois alvéolos e o ganho proporcionado só pode ser considerado em no máximo 50%, pois o processo de preenchimento apresenta algumas particularidades.

Para algumas estruturas específicas como pontes, por exemplo, onde a força cortante pode ser significativa, esta laje pode ser adequada ao uso. Inclusive o processo produtivo permite a interrupção dos EPS deixando assim a extremidade maciça.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2011.
- FRANÇA, A. A. V. Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendidos submetidas a ensaios de cisalhamento. Dissertação de mestrado. PPGECC – UFPR, Curitiba, 2012.



INFORSATO, T. B. Análise de laje alveolar protendida produzida com fôrma fixa – Estudo teórico experimental. Qualificação de doutorado. PPGCIV – UFSCAR, São Carlos. 2017.