

# DESENVOLVIMENTO DE ÁBACO PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA

Patricia Bragato (UTFPR) E-mail: patriciabragato@alunos.utfpr.edu.br

Heloiza Aparecida Piassa Benetti (UTFPR) E-mail: hpiassa@utfpr.edu.br

**Resumo:** Os elementos pré-fabricados tem se destacado cada vez mais no mercado devido a grandes vantagens, dentre elas a produção em ambiente industrial. A laje alveolar protendida, sendo um elemento bastante utilizado nesse contexto, se sobressai devido ao desempenho e adequação às exigências de qualidade atuais. Porém, é notado uma defasagem sobre seu estudo no Brasil, marcando a importância do estudo e produção de ábacos para pré-dimensionamento das lajes alveolares protendidas, avaliando a relação entre o vão teórico e a capacidade de carga. Esse trabalho busca elaborar esse ábaco com altura de 20 centímetros, partindo de uma área de protensão pré-definida e explorando o dimensionamento no Estado Limite de Serviço de Descompressão (ELSD). Os valores resultam em um gráfico que mostra que a relação entre o vão e a sobrecarga não é linear. Conclui-se então que o ábaco produzido, focado em expor os critérios normativos, apresentou um caminho, partindo da fixação da área de protensão, que pode divergir do apresentado caso seja fixado um parâmetro diferente.

**Palavras-chave:** Pré-fabricado, laje alveolar, protensão, ábaco.

## DEVELOPMENT OF ABACUS FOR PRESTRESSED HOLLOW CORE SLABS PRE-SIZING

**Abstract:** Prefabricated elements have increasingly stood out in the market due to great advantages, among them their production in an industrial environment. The prestressed hollow core slab, being a widely used element in this context, stands out due to its excellent performance and suitability for current quality requirements. However, there is a lag regarding its study in Brazil, highlighting the importance of the study and production of abacus for prestressed hollow core slabs pre-sizing, evaluating the relationship between the theoretical span and the load capacity. This work seeks to elaborate this abacus with a slab height of 20 centimeters, starting from a pre-defined prestressing area and exploring the dimensioning in the Limit State of Decompression Service. The values result in a graph that shows that the relationship between span and overload is not linear. It is then concluded that the produced abacus, focused on exposing the normative criteria, presented a path, starting from the setting of the prestressing area, which may differ if a different parameter is set.

**Keywords:** Precast, hollow core slab, prestressing, abacus.

### 1. Introdução

Os painéis alveolares constituem-se como um dos mais populares elementos pré-fabricados utilizados no mundo, especialmente na América do Norte e na Europa (EL DEBS, 2017), e provavelmente, o elemento de protensão com aderência inicial mais usado no mercado brasileiro (CARVALHO, 2017).

As lajes alveolares protendidas apresentam diversas vantagens em relação aos demais tipos de lajes como: facilidade de transporte, rapidez de montagem, redução de serviços na obra, eliminação de cimbramento, possibilidade de atingir maiores vãos, maior qualidade e confiabilidade, ou seja, redução de materiais, mão de obra e redução acentuada dos prazos de execução.

Apesar de suas vantagens, o estudo de lajes alveolares protendidas ainda encontra-se defasado no Brasil. Isso pode ser notado ao avaliar a data de publicação das normas que norteiam esse estudo. No Brasil, a ABNT NBR 14861– Lajes alveolares pré-moldadas

de concreto protendido – Requisitos e procedimentos, teve sua primeira publicação viabilizada apenas em 2011, enquanto a DIN EN 1168 – Precast concrete products – Hollow core Slabs, norma regulamentadora dos países da união europeia, já havia sido publicada em 2005.

Assim, o estudo e produção de ábacos para pré-dimensionamento das lajes alveolares protendidas tem sua importância devido a falta de estudo e difusão de material similar no âmbito acadêmico, marcando aqui sua originalidade. Sua relevância se apresenta na contribuição para estudantes, engenheiros e projetistas que poderão utilizar o resultado desse trabalho como base para elaboração de orçamentos e dimensionamento de lajes alveolares protendidas com altura de 20 cm.

### **1.1 Objetivos**

O projeto tem como objetivo geral desenvolver ábacos para pré-dimensionamento de lajes alveolares protendidas avaliando a relação entre o vão teórico e a capacidade de carga. Além disso, o trabalho passa pelos objetivos específicos de fixar parâmetros para determinar a relação entre o vão teórico das lajes alveolares protendidas e sua capacidade de carga, desenvolver roteiro para pré-dimensionamento de lajes alveolares protendidas, tomando como principais bases as normas ABNT NBR 14861:2022 e ABNT NBR 6118:2014, e ainda, produzir ábaco para pré-dimensionamento de lajes alveolares protendidas para as alturas de 16cm, 20cm e 32cm com protensão completa e limitada.

### **2. Referencial Teórico**

Elementos de concreto protendido são aqueles os quais têm parte da sua armadura previamente alongada por equipamentos com a finalidade de impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ABNT NBR 6118:2014, pg. 3).

A armadura de protensão pode apresentar diferentes mecanismos de aderência, sendo eles sem aderência, com aderência posterior (pós-tração) ou ainda com aderência inicial (pré-tração), mecanismos geralmente adotados em peças pré-moldadas, onde o estiramento da armadura ocorre anteriormente ao lançamento do concreto.

Além do mecanismo de aderência a protensão ainda é classificada pela intensidade da protensão, que está diretamente relacionada a durabilidade da peça pois diferentes intensidades permitem diferentes níveis de fissuração no concreto (CARVALHO, 2017, pg.10).

Os tipos de protensão, definidos pela ABNT NBR 6118:2014, são protensão completa, onde a peça deve se apresentar livre de fissuras decorrentes da flexão, protensão limitada, onde a peça apresenta pequenas fissurações e a protensão parcial, em que a peça apresenta fissurações controladas e limitadas. A escolha do tipo de protensão a ser empregada depende do tipo de construção e da agressividade do meio ambiente.

Enquanto isso, a força de protensão indica quanto o cabo deverá ser tracionado para obter o resultado esperado. Essa força, buscando o maior aproveitamento do aço utilizado, pode ser obtida multiplicando a tensão de operação do aço pela área de protensão (CHOLFE, 2018). A tensão de operação do aço, é especificada no item 9.6.1.2.1 da ABNT NBR 6118:2014, que determina os valores limites da operação de protensão. Já, a tensão de protensão (Figura 1), esforço gerado pela força de protensão, é composta pela parcela de compressão gerada pela força de protensão ( $P/A_c$ ), somada ao esforço causado pela excentricidade ( $ep$ ) da armadura (BASTOS, 2019, pg. 37-39).

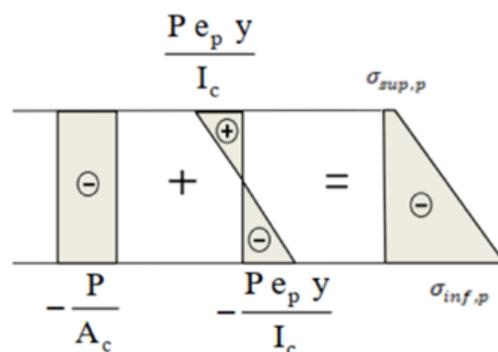


Figura 1 – Tensão de protensão

Ainda, durante a vida útil da peça, a tensão na armadura de protensão decresce continuamente, inicialmente de maneira mais rápida e depois mais lentamente. Esse efeito se deve à diminuição do alongamento da armadura, por diversas causas, sendo as principais delas a retração e fluência do concreto, a acomodação da ancoragem e a relaxação da armadura (BASTOS, 2019). Essa redução leva à diminuição da força de protensão e deve ser considerada no dimensionamento de peças protendidas.

### 2.1 Laje Alveolar protendida

A laje alveolar protendida é conhecida por fornecer sistemas eficientes de lajes e coberturas (PCI, 1998). Os painéis alveolares utilizados nas lajes apresentam um elevado rendimento mecânico, sendo formado por mesa inferior, mesa superior e alma, como indicado na Figura 2, descrito pela ABNT NBR 14861:2022. A armadura é composta apenas por cordoalhas de protensão, armadura ativa, que estão presente predominantemente na mesa inferior, com possível presença na mesa superior.

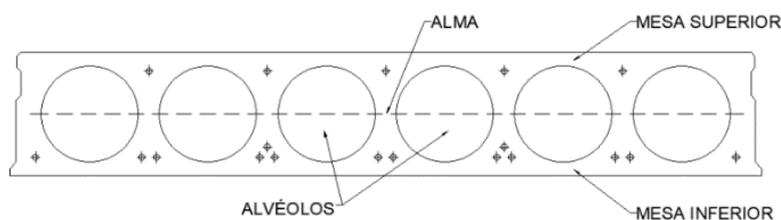


Figura 2 – Laje Alveolar protendida

Além disso, conforme a norma, os painéis alveolares não possuem armadura para resistir aos esforços cortantes, com o próprio concreto responsável por resistir a essas solicitações, sendo possível o preenchimento parcial dos alvéolos para aumentar a sua resistência. Para o acabamento e nivelamento dos painéis alveolares, é geralmente executada uma capa de concreto moldado in loco que acaba por ampliar a seção resistente e ainda solidarizar os esforços entre os painéis (PCI, 1998, pg.1-3).

### 3. Método de Trabalho

O trabalho investiga quais os critérios de dimensionamento da laje alveolar protendida, avaliando a relação entre o vão teórico e a capacidade de carga das lajes com espessura 16, 21 e 32 cm para as protensão completa e limitada. Assim, inicia-se o trabalho caracterizando a seção a ser estudada, partindo para a determinação dos parâmetros que foram fixados para então concluir com a produção do ábaco de dimensionamento (Figura 3).

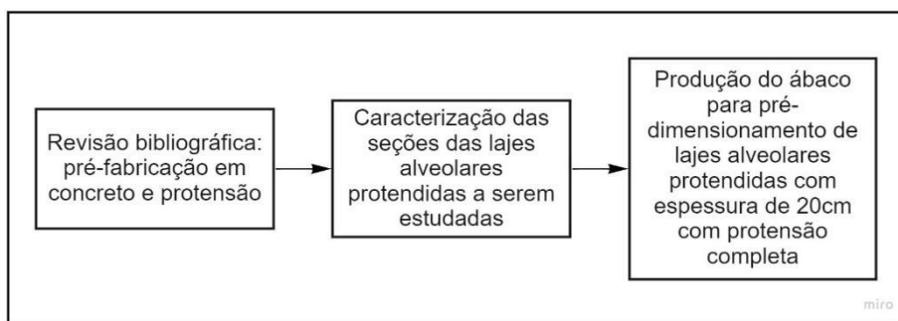


Figura 3 – Diagrama das Etapas do Estudo

#### 4. Produção do ábaco

##### 4.1 Materiais e características geométricas

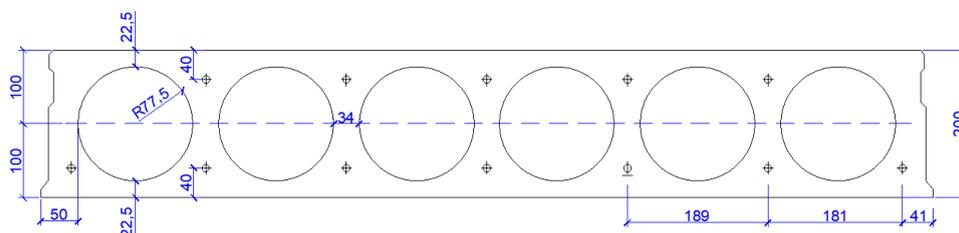
O conhecimento dos materiais empregados é importante para o dimensionamento de qualquer elemento estrutural, pois seu dimensionamento depende diretamente das características dos materiais empregados.

Por se tratarem de peças comumente utilizadas em ambientes industriais, ambiente com agressividade forte (Classe III), seguindo especificações da Tabela 6.1 da ABNT NBR 6118:2014. O concreto utilizado, buscando uma resistência superior nas idades iniciais e também um maior aproveitamento da seção, será composto de CPV-ARI e terá  $f_{ck}$  de 50MPa, satisfazendo a recomendação de 35MPa para Classe III e o determinado pela ABNT NBR 14861:2022 de 25 MPa para painéis alveolares protendidos.

A classe de agressividade, juntamente à determinação de que a armadura será pré-tracionada, determina o nível de protensão a ser empregado, seguindo a Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118:2014, ela trabalhará com protensão completa no ambiente de classe III, verificando a fissuração com a combinação rara e a descompressão com a combinação frequente.

O aço utilizado foi escolhido dentro do catálogo da empresa Arcelor Mittal®, sendo a cordoalha com relaxação baixa CP190RB de 9,5mm com 7 fios, que possui área aproximada de 56mm<sup>2</sup> e módulo de elasticidade de 200GPa.

Enquanto isso, a seção determinada para a produção do ábaco é limitada às alturas mais usuais no mercado de 20 centímetros, e o cobrimento utilizado será de 40mm seguindo a classe de agressividade adotada. A seção, juntamente com suas características geométricas, levantadas com auxílio do software AutoCAD, está exposta na Figura 4.



Largura	b	125 cm
Altura	h	20 cm
Número de alvéolos	N <sub>alv</sub>	6
Diâmetro do alvéolos	D <sub>alv</sub>	15,5 cm
Área de concreto	A <sub>c</sub>	1221,10 cm <sup>2</sup>

Momento de inércia	Ic	61487,47 cm <sup>4</sup>
Alfa	α	1,2
Cobrimento	c	4 cm
Excentricidade cabos	ep	6 cm

Figura 4 – Características da laje alveolar

#### 4.2 Definição dos carregamentos

Sendo a densidade do concreto armado ( $\rho_c$ ) igual a 25kN/m<sup>3</sup>, o peso próprio de cada laje é determinado aplicando a Equação 1 apresentada.

$$Pp_{H20} = A_c \times \rho_c = 1221,10 [cm^2] \times 25 \times 10^{-6} \left[ \frac{kN}{cm^2} \right] = 30,53 \left[ \frac{N}{cm} \right] \quad (1)$$

De modo similar, considerando uma capa de 5cm de espessura ( $A_{capa} = 625 [cm^2]$ ), obtém-se seu carregamento com a aplicação da Equação 2.

$$Pp_{capa} = A_{capa} \times \rho_c = 625 [cm^2] \times 25 \times 10^{-6} \left[ \frac{kN}{cm^2} \right] = 15,62 \left[ \frac{N}{cm} \right] \quad (2)$$

#### 4.3 Análise estrutural e esforços solicitantes

Segundo a ABNT NBR 14861:2022, a laje alveolar protendida pode ser dimensionada como um elemento isolado e isostático, assim a peça utiliza como modelo matemático uma viga que se apoia em elementos que não se deslocam verticalmente, sendo o pavimento representado por um único um painel alveolar.

O dimensionamento de um elemento isolado e isostático, como é o caso da laje alveolar protendida, os esforços externos a serem considerados são os momentos fletores (M) no meio do vão (Equação 3) e na região dos apoios durante a liberação da protensão (Equação 4) e também as forças cortantes (V) na área junto aos apoios (Equação 5), sendo essas as regiões mais solicitadas para cada esforço.

$$M_{meio,v\tilde{a}o} = \frac{ql^2}{8} \quad (3)$$

$$M_{apoi} = \frac{ql}{2} l_{pt1} - \frac{ql_{pt1}^2}{2} \quad (4)$$

$$V = \frac{ql}{2} \quad (5)$$

Sendo

q – carga distribuída atuando na estrutura [kN/m]

l – vão da peça [m]

l<sub>pt1</sub> - valor inferior de projeto para o comprimento de transferência dado por

$$0,8l_{bpt} \text{ sendo } l_{bpt} = \frac{19\phi\sigma_{p0}}{fbpt} \text{ e } fbpt = 3,2 \times 2 \times \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

#### 4.4 Fixação de parâmetros

Devido a padronização adotada em fábricas de pré-fabricados, o parâmetro escolhido

para ser fixado neste estudo será o valor da armadura ativa. Assim, considerando o aço escolhido CP190RB de 9,5mm com 7 fios, tem-se a tensão de operação (Equação 6):

$$\sigma_{pi} \leq \{0,77f_{ptk} \ 0,85f_{pyk} \leq \{0,77 \times 1900MPa = 1463MPa \ 0,85 \times 0,9 \times \dots \} \quad (6)$$

$$\sigma_{pi} = 1453,5MPa$$

Assim, determina-se a força de protensão inicial, multiplicando a tensão de operação do aço e a armadura ativa que será fixada em 8 cordoalhas, totalizando uma área de protensão ( $A_p$ ) de 448mm<sup>2</sup>.

$$P_i = \sigma_{pi} \times A_p = 1453,5[MPa] \times 448[mm^2] = 651,168[kN] \approx 652[kN]$$

#### 4.5 Perdas de protensão

Devido à dificuldade em conhecer o valor exato da perda de protensão, os valores para pré-dimensionamento são comumente admitidos em função da prática do projetista e observação de resultados para o mesmo tipo de obra. Sendo assim, neste estudo são adotados valores usuais, de perdas de protensão para a situação de armadura reta e pré-tracionada, segundo Migliore (2008), sendo 5% da força de protensão inicial para as perdas imediatas (Equação 7) e 8,5% da força de protensão após as perdas imediatas para perdas progressivas (Equação 8).

$$N_{pi} = P_i - (0,05P_i) = 652 - (0,05 \times 652) = 619,40[kN] \quad (7)$$

$$N_p = N_{pi} - (0,085N_{pi}) = 619,4 - (0,085 \times 619,4) = 566,75[kN] \quad (8)$$

#### 4.6 Dimensionamento para ELS-D

Para os Estados Limites de Serviço as combinações de esforços podem ser raras, frequentes ou quase-permanentes, seguindo o cálculo conforme mostrado na Tabela 11.4 da ABNT NBR 6118:2014 sendo os coeficientes explicitados na Tabela 11.2 da norma em questão. Para a protensão completa, conforme a Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118:2014 a situação a ser verificada no Estado Limite de Serviço de Descompressão deve utilizar a combinação frequente.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, o Estado Limite de Serviço de Descompressão é o estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula (geralmente a face inferior), não havendo tração no restante da seção. Desejando que a peça não sofra o efeito de tração, será utilizado as relações do ELS-D, onde a força de protensão somada à força das ações atuantes resulte em zero em uma das bordas (Equação 9).

$$\sigma_{t,comb} + \sigma_{P00,inf} = 0 \quad (9)$$

Sendo

$$\sigma_{P00,inf} = -\frac{N_p}{Ac} - \frac{N_p \times e_p \times y_{base}}{Ic}$$

$$\sigma_{t,comb} = \sigma_{t,freq} = \frac{M_{freq} \times y_{base}}{Ic} = \frac{(g1+g2+g3+\psi_1 q)L^2 \times y_{base}}{8Ic} \text{ para a combinação frequente}$$

Desenvolvendo a Equação 9 obtém-se a Equação 10, e a aplicação para os comprimentos (L) selecionados, obtém-se a carga de utilização (Tabela 1).

$$\frac{(g1+g2+g3+\psi_1q)L^2 \times y_{base}}{8Ic} - \frac{N_p}{Ac} - \frac{N_p \times e_p \times y_{base}}{Ic} = 0$$

$$(g1 + g2 + g3 + \psi_1 q) = \left( \frac{N_p}{Ac} + \frac{N_p \times e_p \times y_{base}}{Ic} \right) \frac{8Ic}{L^2 \times y_{base}}$$

$$q = \frac{\left( \frac{N_p}{Ac} + \frac{N_p \times e_p \times y_{base}}{Ic} \right) \frac{8Ic}{L^2 \times y_{base}} - (g1+g2+g3)}{\psi_1} \tag{10}$$

Tabela 1 – Carga de Utilização para a laje H20

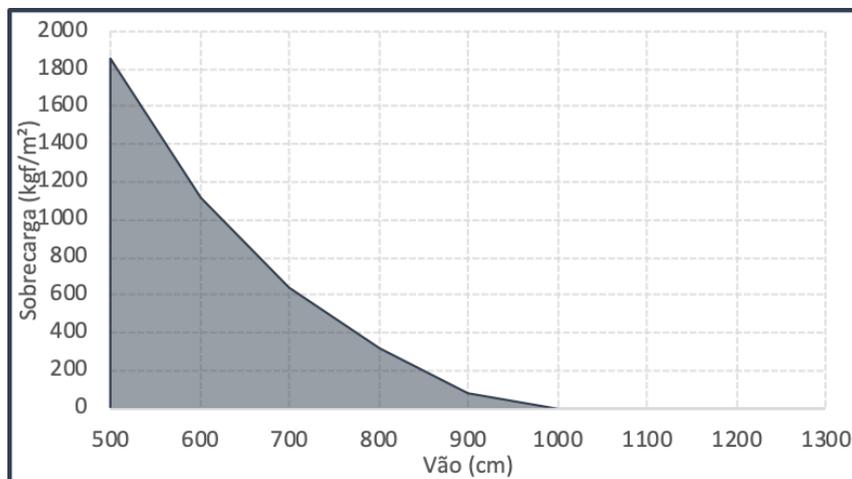
L(cm)	q(tf/m)	q(kgf/m <sup>2</sup> )
100	123,93	99146,11
200	30,12	24094,24
300	12,74	10195,75
400	6,66	5331,27
500	3,85	3079,72
600	2,32	1856,65
700	1,40	1119,18
800	0,80	640,53
900	0,39	312,37
1000	0,10	77,64
1100	0,00	0,00
1200	0,00	0,00
1300	0,00	0,00
1400	0,00	0,00

Fonte: Autor (2022)

#### 4.7 Produção do gráfico

Sendo uma das características da laje alveolar protendida a utilização em grandes vão, decidiu-se por descartar valores para vãos inferiores a quatro metros (quatrocentos centímetros) e com os demais valores da Tabela 1, foi produzido o Gráfico 1, relacionando a sobrecarga com o vão para a seção analisada.

Gráfico 1 – Ábaco da laje alveolar com altura de 20cm para protensão completa



Fonte: Autor (2022)

Entende-se que os pontos encontrados no interior da área hachurada representam os valores suportados pela laje. Nota-se que a partir dos 9 metros de vão a utilização da laje estudada, com altura de 20cm e 8 cordoalhas CP190RB de 9,5mm, torna-se não recomendada, devido à sua capacidade de suporte da sobrecarga.

Para que a laje, de altura 20cm, venha a ter vãos maiores ou cargas superiores é necessário utilizar arranjos com mais cordoalhas e/ou aumentar a resistência do concreto.

### 5. Conclusões

Tendo como principal objetivo o desenvolvimento de ábacos para pré-dimensionamento de lajes alveolares protendidas avaliando a relação entre o vão teórico e a capacidade de carga, esse trabalho estudou a fixação de parâmetros para determinar essa relação e, partindo disso, o foi desenvolvido.

A fixação da área de protensão delimitou um caminho para o desenvolvimento do ábaco, o qual pode divergir do apresentado caso seja fixado um parâmetro diferente como a seção ou o vão.

O ábaco produzido neste trabalho teve o foco de expor os critérios normativos nacionais para o projeto de laje alveolares protendidas, principalmente apresentados na norma ABNT NBR 14861:2022 e amparados pela ABNT NBR 6118:2014.

O equacionamento descrito no trabalho possui considerações para concretos com classes de resistência iguais ou inferiores a C50. Isso porque os valores de altura e largura do diagrama retangular de distribuição das tensões no concreto variam para as classes superiores a C50, devendo o projetista, nesses casos, verificar diretamente as normas referenciadas.

Com a elaboração do ábaco aqui desenvolvido, foi possível constatar que o vão máximo permitido para as lajes alveolares é limitado e, que a relação entre a capacidade de carga da laje o vão não é linear.

### Referências

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *ABNT NBR 14861: lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - requisitos e procedimentos.* Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *ABNT NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – Procedimento.* Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

**BASTOS, Paulo Sérgio.** *Fundamentos do Concreto Protendido.* Bauru/SP: Universidade Estadual Paulista–UNESP, 2019.

**CARVALHO, Roberto Chust.** *Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento.* Volume 1. São Paulo: PINI, 2017.

**CHOLFE, Luiz.** *Concreto protendido : teoria e prática / Luiz Cholfe & Luciana Bonilha.* — 2. ed. — São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

**EL DEBS, Mounir K.** *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações.* 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2017.

**MIGLIORE, G. M. (2008).** *Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida.* Monografia (Graduação). Barretos: UNIFEB.

**PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE - PCI.** *Manual for the design of hollow core slabs.* 2th ed. Chicago: PCI, 1998.