



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

***DIMENSIONAMENTO E UTILIZAÇÃO DE
LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA***

Gabriel Moreira Migliore

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Rubens Migliore Junior

2008

Gabriel Moreira Migliore

***DIMENSIONAMENTO E UTILIZAÇÃO DE
LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

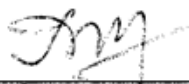
Orientador: Prof. Dr. Ângelo Rubens Migliore Junior

Barretos

2008

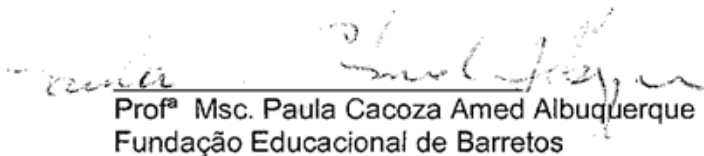
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: GABRIEL MOREIRA MIGLIORE
"DIMENSIONAMENTO E UTILIZAÇÃO DE LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA"
Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos
Monografia defendida e julgada em 05/11/2008 perante a Comissão Julgadora:



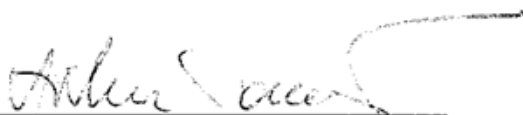
Prof. Dr. Ângelo Rúbens Migliore Jr.
Fundação Educacional de Barretos

APROVADO



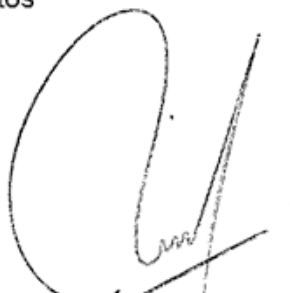
Prof.ª Msc. Paula Cacoza Amed Albuquerque
Fundação Educacional de Barretos

Aprovado



Prof. Artur Gonçalves
Fundação Educacional de Barretos

APROVADO



Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi
Coordenador de Trabalhos de Conclusão de Curso

DEDICATÓRIA

A todos aqueles que acreditaram em mim:
familiares, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por dar-me força e iluminação nos momentos mais difíceis e impossíveis.

A minha mãe pelo amor e ao meu pai pela sabedoria.

Aos meus amigos pela compreensão, incentivo e apoio.

Aos professores pela dedicação e estímulo.

A indústria de pré-fabricados Premoldados Protendit Ltda. pela colaboração e troca de informações.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana.”

Louis Pasteur

RESUMO

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

Este trabalho visou documentar as características e a produção de lajes alveolares na indústria de pré-fabricados, bem como sua aplicação em obra. É apresentado o roteiro de cálculo para o dimensionamento de lajes alveolares assim como a aplicação das equações envolvidas por meio de um exemplo numérico. O roteiro de cálculo permite determinar os módulos resistentes necessários da peça, a força de protensão necessária, a força cortante resistente da laje alveolar pré-moldada e as tensões elásticas no concreto. Neste estudo foi elaborado um ábaco para pré-dimensionamento, de forma a determinar qual o tipo de laje alveolar mais adequada para um determinado vão sob ação de um determinado carregamento. Para este ábaco foram considerados quatro tipos de arranjos de cordoalhas de protensão para a laje alveolar LP20 da indústria Premoldados Protendit Ltda. A partir do ábaco obtido foi possível determinar que o vão máximo de lajes alveolares é limitado principalmente pelas condições de momento fletor e de força cortante para um determinado carregamento aplicado. Foram realizados estudos de comparação de consumo de materiais e de custo de implantação para os sistemas construtivos de lajes alveolares, nervuradas e treliçadas. Este estudo de comparação foi realizado para uma simulação de pavimento com vão teórico de laje de 7,50 m com ação acidental de 5,00 kN/m², sendo estudados os elementos estruturais laje, viga e pilar. Os resultados indicaram que o sistema de laje nervurada é mais econômico que os demais para as condições impostas, porém o sistema de laje alveolar ainda permite suportar carregamentos mais elevados e vãos maiores com a mesma espessura de laje pré-moldada.

Palavras-chave: concreto protendido, concreto pré-moldado, laje alveolar.

ABSTRACT

MIGLIORE, G. M. (2008). Design and utilization of prestressed hollow core slab. Dissertation (Grade). Barretos: UNIFEB.

This paper aimed to document characteristics and production of hollow core slab in precast factory, as well as this application in construction. A calculation route is presented for the design of hollow core slab as well as the application of involved equations through a numerical example. The calculation route allows determining the necessary piece resistant modules, the necessary prestressing force, the resistant shear force of precast hollow core slab and the concrete elastic stresses. An abacus was prepared for preliminary design to aim which of hollow core slab type is more adapted for a determined span under a determined load. In this abacus were considered four types of arrangements of prestressed tendons for hollow core slab LP20 made by Premoldados Protendit Ltda. With the obtained abacus was possible to determine that maximum span of hollow core slab is limited principally by conditions of bending moment and shear force for a determined live load. There were carried out studies of comparison of materials quantity and execution cost of hollow core slab, ribbed slab and lattice slab systems. This comparison study was carried out for a simulation of one storey with 7.50 m theoretical span of slab and with live load of 5.00 kN/m² with study the structural elements slab, beam and column. The results indicated that the ribbed slab system is more inexpensive than other systems for the imposed conditions; however the hollow core slab system still allows supporting more elevated loads and more large spans with the same thickness from precast slab.

Keywords: prestressed concrete, precast concrete, hollow core slab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe construtivo de laje pré-moldada.....	21
Figura 2 – Laje alveolar	23
Figura 3 – Laje π	24
Figura 4 – Painel de fechamento lateral \sqcup	24
Figura 5 – Painel de fechamento lateral termo-acústico	24
Figura 6 – Viga retangular.....	25
Figura 7 – Viga Γ	25
Figura 8 – Pilar retangular vazado	25
Figura 9 – Efeitos da protensão	27
Figura 10 – Sistema com armadura pré-tracionada	28
Figura 11 – Pistas de protensão em indústria de pré-moldados	28
Figura 12 – Macaco de protensão de monocordoalha	29
Figura 13 – Montagem de macaco hidráulico para protensão	29
Figura 14 – Bainhas metálicas e luva de emenda.....	30
Figura 15 – Cordoalhas engraxadas com e sem bainhas	30
Figura 16 – Representação de uma laje de concreto.....	31
Figura 17 – Laje nervurada construída com formas de polipropileno	32
Figura 18 – Laje lisa com cordoalha engraxada.....	33
Figura 19 – Vigotas de concreto pré-moldado: armada, treliçada e protendida.....	34
Figura 20 – Produção de lajes por extrusão.....	35
Figura 21 – Corte por disco diamantado de laje alveolar extrudada	35
Figura 22 – Lajes solidarizadas com capa estrutural de concreto	36
Figura 23 – Posicionamento de laje alveolar com auxílio de fita.....	37
Figura 24 – Estocagem de lajes alveolares com calços de madeira.....	38
Figura 25 – Fixação de cordoalhas	43
Figura 26 – Alongamento de cordoalhas.....	43
Figura 27 – Manômetro de bomba hidráulica.....	44
Figura 28 – Gancho de içamento e perfil limitador de laje alveolar.....	44
Figura 29 – Tubos de aço para formação de alvéolos	45
Figura 30 – Extremidade de tubos internos.....	45
Figura 31 – Lançamento de concreto em viga retangular	46
Figura 32 – Concretagem de laje alveolar.....	47
Figura 33 – Acabamento de laje alveolar	47
Figura 34 – Extremidade da laje pré-moldada antes do corte final das cordoalhas.....	48
Figura 35 – Laje alveolar bi-apoiada em vigas pré-moldadas.....	49
Figura 36 – Lajes alveolares montadas no pavimento	50
Figura 37 – Conclusão da etapa de nivelamento entre as lajes alveolares	50

Figura 38 – Armadura de ligação entre viga e laje alveolar	51
Figura 39 – Trecho de laje em balanço e detalhe da tela da capa.....	51
Figura 40 – Laje alveolar com capa de concreto polido	52
Figura 41 – Vista por baixo das lajes alveolares acabadas	52
Figura 42 – Esquema de protensão e diagrama de tensões.....	54
Figura 43 – Cabo de protensão resultante	55
Figura 44 – Diagrama de tensões no ATO e na CR.....	55
Figura 45 – Tela parcial da planilha para pré-dimensionamento	62
Figura 46 – Tela parcial da planilha para verificação do cisalhamento.....	63
Figura 47 – Corte genérico de laje alveolar LP20	64
Figura 48 – Tela do ProUni para entrada de dados da seção transversal	65
Figura 49 – Características geométricas apresentadas na tela do ProUni	65
Figura 50 – Arranjo adotado de cordoalhas	68
Figura 51 – Excentricidade dos cabos no ATO para seção do apoio	69
Figura 52 – Excentricidade dos cabos na CR para seção meio do vão.....	69
Figura 53 – Arranjos de cordoalhas adotados.....	76
Figura 54 – Verificação de tensões com o software ProUni.....	77
Figura 55 – Avaliação de flecha com o software ProUni.....	81
Figura 56 – Vão máximo para a condição de momento fletor.....	84
Figura 57 – Vão máximo para a condição de força cortante.....	85
Figura 58 – Vão máximo para a condição de tração no meio do vão na CR.....	86
Figura 59 – Vão máximo para a condição de flecha na CQP	87
Figura 60 – Ábaco para laje alveolar LP20	89
Figura 61 – Planta de forma da laje alveolar.....	92
Figura 62 – Planta de forma da laje nervurada	93
Figura 63 – Seção transversal da laje nervurada.....	93
Figura 64 – Planta de forma da laje treliçada.....	94
Figura 65 – Seção transversal da laje treliçada	94
Figura 66 – Carregamento total (kN/m ²) sobre os sistemas considerados	96
Figura 67 – Detalhe do complemento moldado no local no sistema LA	98
Figura 68 – Consumo de concreto (m ³)	100
Figura 69 – Consumo total de concreto (m ³).....	100
Figura 70 – Consumo de aço (kgf)	101
Figura 71 – Consumo total de aço (kgf)	102
Figura 72 – Consumo de formas (m ²)	102
Figura 73 – Consumo total de forma (m ²)	103
Figura 74 – Índice de consumo de concreto de cada sistema considerado.....	104
Figura 75 – Índice de consumo de aço de cada sistema considerado.....	105
Figura 76 – Índice de consumo de forma de cada sistema considerado	106

Figura 77 – Custo de cada elemento para os sistemas considerados.....	110
Figura 78 – Custo total dos sistemas considerados.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das séries de lajes estudadas	75
Tabela 2 – Vão máximo (m) para a condição de momento fletor.....	78
Tabela 3 – Vão máximo (m) para a condição de força cortante.....	79
Tabela 4 – Vão máximo (m) para a condição de tração no meio do vão na CR.....	80
Tabela 5 – Vão máximo (m) para a condição de flecha máxima	82
Tabela 6 – Flecha máxima (cm) no ATO e na CQP.....	82
Tabela 7 – Ação sobre os sistemas considerados	96
Tabela 8 – Consumo total de materiais para os sistemas considerados	97
Tabela 9 – Índice de consumo de concreto para cada elemento.....	103
Tabela 10 – Índice de consumo de aço para cada elemento.....	104
Tabela 11 – Índice de consumo de forma para cada elemento	105
Tabela 12 – Consumo de materiais para composição do custo final	107
Tabela 13 – Preço unitário de materiais e serviços.....	108
Tabela 14 – Custos de materiais para os elementos dos sistemas	109
Tabela 15 – Custo total dos sistemas considerados	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATO: ato de protensão

BDI: bonificação e despesas indiretas

C20: classe de concreto com resistência mínima à compressão de 20 MPa

C25: classe de concreto com resistência mínima à compressão de 25 MPa

C30: classe de concreto com resistência mínima à compressão de 30 MPa

C35: classe de concreto com resistência mínima à compressão de 35 MPa

C40: classe de concreto com resistência mínima à compressão de 40 MPa

CA-50: armadura passiva com resistência mínima de escoamento de 500 MPa

CA-60: armadura passiva com resistência mínima de escoamento de 600 MPa

CF: combinação freqüente de ações

CG: centro geométrico

CML: concreto moldado no local

CP-150: armadura ativa com resistência mínima de escoamento de 1500 MPa

CP-190: armadura ativa com resistência mínima de escoamento de 1900 MPa

CPM: concreto pré-moldado

CQP: combinação quase permanente de ações

CR: combinação rara de ações

ELS: Estado Limite de Serviço

ELU: Estado Limite Último

EML: elemento moldado no local

EPM: elemento pré-moldado

EPS: poliestireno expandido

LA: laje alveolar

LN: laje nervurada

LP20: laje de piso pré-moldada com altura de 20 cm

LT: laje treliçada

NBR: Norma Brasileira Registrada

Q159: tela eletro soldada de aço CA-60 com malha quadrada de $a_s = 1,59 \text{ cm}^2/\text{m}$

PVC: policloreto de vinila

RB: aço com relaxação baixa

RN: aço com relaxação normal

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{ATO} : flecha no ato de protensão

A_c : área da seção transversal bruta de concreto

$A_{c,a}$: área da seção transversal de concreto devido ao preenchimento de alvéolos

a_{CQP} : flecha na combinação quase permanente de ações

A_f : área de forma

A_{pav} : área do pavimento

a_s : área da seção transversal de armadura por metro de largura

$A_{s,p}$: área da seção transversal de armadura de protensão

b : largura

b_w : largura da alma

d : altura útil

d'_i : distância entre o eixo da armadura inferior em relação à face inferior

d'_{i-APO} : distância entre o eixo da armadura inferior à face inferior na seção do apoio

d'_{i-VAO} : distância entre o eixo da armadura inferior à face inferior na seção meio do vão

d'_s : distância entre o eixo da armadura superior em relação à face superior

e_p : excentricidade do cabo de protensão resultante

$e_{p,ATO-APO}$: excentricidade do cabo de protensão para seção do apoio no ATO

$e_{p,ATO-VAO}$: excentricidade do cabo de protensão para seção meio do vão no ATO

$e_{p,CR-VAO}$: excentricidade do cabo de protensão para seção meio do vão na CR

$e_{p,i}$: excentricidade do cabo de protensão inferior

$e_{p,s}$: excentricidade do cabo de protensão superior

f_{cj} : resistência característica do concreto à compressão aos j dias

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias

f_{ctd} : resistência de cálculo à tração direta do concreto

f_{ctj} : resistência característica do concreto à tração direta aos j dias

f_{ctk} : resistência característica do concreto à tração direta aos 28 dias

$f_{ctk,inf}$: resistência característica inferior do concreto à tração direta

g_0 : ação permanente constituída pelo peso próprio da peça pré-moldada

g_1 : ação permanente constituída pelo peso próprio da capa de concreto e do chaveteamento da peça pré-moldada

g_2 : ação permanente constituída pelo peso próprio de pavimentação e revestimentos

h_{laje} : espessura da laje

IA_A : índice de consumo de aço por área de construção

IA_V : índice de consumo de aço por volume de construção

I_c : momento de inércia da seção bruta de concreto

IC_A : índice de consumo de concreto por área de construção

IF_A : índice de consumo de forma por área de construção

IF_V : índice de consumo de forma por volume de construção

k : coeficiente

l : vão teórico

M : momento fletor devido ao carregamento máximo

M_{g_0} : momento fletor devido ao peso próprio

M_{g_1} : momento fletor devido ao peso próprio da capa de concreto e do chaveteamento da peça pré-moldada

M_{g_2} : momento fletor devido ao peso próprio da pavimentação e revestimentos

M_p : momento fletor de protensão com perdas imediatas e progressivas

M_{p_0} : momento fletor de protensão sem perdas

M_q : momento fletor devido à ação accidental aplicada

M_{rk} : momento fletor resistente característico

n_a : quantidade de alvéolos preenchidos

N_p : força de protensão final com perdas imediatas e progressivas

N_{p_0} : força de protensão sem perdas

$N_{p_0,n}$: força de protensão necessária sem perdas

N_{p_i} : força de protensão com perdas imediatas

$N_{p_i,APO}$: força de protensão com perdas imediatas do cabo inferior na seção do apoio

$N_{p_i,VAO}$: força de protensão com perdas imediatas do cabo inferior no meio do vão

$N_{p,i,s-VAO}$: força de protensão com perdas imediatas do cabo superior no meio do vão

$N_{p,i}$: força de protensão com perdas imediatas e progressivas do cabo inferior

$N_{p,i-VAO}$: força de protensão com perdas totais do cabo inferior na seção meio do vão

$N_{p,s}$: força de protensão com perdas imediatas e progressivas do cabo superior

$N_{p,s-VAO}$: força de protensão com perdas totais do cabo superior na seção meio do vão

P: peso de aço

q: ação acidental aplicada

V: força cortante devido ao carregamento máximo

Vol: volume de concreto

V_{rk} : força cortante resistente característica

W_s : módulo resistente da seção em relação à fibra superior

$W_{s,n}$: módulo resistente necessário da seção em relação à fibra superior

W_i : módulo resistente da seção em relação à fibra inferior

$W_{i,n}$: módulo resistente necessário da seção em relação à fibra inferior

y_i : distância da fibra inferior em relação ao CG

y_s : distância da fibra superior em relação ao CG

γ_c : coeficiente de ponderação da resistência do concreto

γ_f : coeficiente de ponderação das ações

γ_p : fator de perda total de protensão

γ_{pi} : fator de perda imediata de protensão

γ_{pp} : fator de perda progressiva de protensão

ρ_p : taxa geométrica de armadura de protensão

σ : tensão normal

σ_{CG} : tensão de compressão no centro geométrico da peça

$\sigma_{i,ATO-APO}$: tensão normal na fibra inferior para seção do apoio na situação de ATO

$\sigma_{s,ATO-APO}$: tensão normal na fibra superior para seção do apoio na situação de ATO

$\sigma_{i,ATO-VAO}$: tensão normal na fibra inferior para seção meio do vão na situação de ATO

$\sigma_{s,ATO-VAO}$: tensão normal na fibra superior para seção meio do vão na situação de ATO

$\sigma_{i,CR-VAO}$: tensão normal na fibra inferior para seção meio do vão na situação de CR

$\sigma_{s,CR-VAO}$: tensão normal na fibra superior para seção meio do vão na situação de CR

$\bar{\sigma}$: tensão normal admissível

$\bar{\sigma}_{i,ATO}$: tensão normal admissível na fibra inferior para a situação de ato de protensão

$\bar{\sigma}_{s,ATO}$: tensão normal admissível na fibra superior para a situação de ato de protensão

$\bar{\sigma}_{i,CR}$: tensão normal admissível na fibra inferior para a situação de combinação rara

$\bar{\sigma}_{s,CR}$: tensão normal admissível na fibra superior para a situação de combinação rara

τ_{rd} : tensão de cisalhamento resistente de cálculo

τ_{wu} : tensão de cisalhamento última

\emptyset : diâmetro

\emptyset_a : diâmetro do alvéolo

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Concreto pré-moldado	23
3.2. Concreto protendido.....	26
3.3. Lajes de concreto.....	31
3.4. Generalidades da laje alveolar.....	34
4. METODOLOGIA	39
5. CARACTERIZAÇÃO DA LAJE ALVEOLAR.....	42
5.1. Produção e execução	42
5.2. Roteiro de cálculo	53
5.3. Exemplo numérico	63
6. RESULTADOS.....	74
6.1. Ábaco.....	74
6.2. Consumos e custos.....	90
7. CONCLUSÕES	112
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

1. INTRODUÇÃO

Segundo El Debs (2000), a construção civil representa, de uma maneira geral, uma indústria atrasada devido a sua baixa produtividade, grande desperdício de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade. A industrialização da construção e a racionalização da execução de estruturas de concreto são os principais motivos para o emprego do concreto pré-moldado.

No quarto de século XX que se seguiu à Segunda Guerra Mundial, a Europa encontrava-se destruída e devastada. A necessidade de reconstrução rápida e a escassez de mão de obra estimularam o grande impulso de evolução e aplicação da tecnologia do concreto pré-moldado, principalmente em habitações, galpões e pontes, concentrando inicialmente tal desenvolvimento na Europa Ocidental e posteriormente para a Europa Oriental (EL DEBS, 2000).

Os reflexos de tal desenvolvimento foram sentidos no Brasil a partir da década de 50, quando houve um impulso para o emprego da pré-moldagem no país, conforme é apresentado em Melo (2004). O uso de pré-moldado em grandes obras já acumula quase 75 anos e a pré-fabricação quase 50 anos.

Melo (2004) afirma que a industrialização progressiva dos processos executivos da construção civil é uma tendência irreversível no Brasil, a exemplo do que já ocorreu nos países da América do Norte e da Europa. A procura de simplicidade construtiva, ao lado de um modelo de projeto simples e realista, é uma necessidade para a qualidade e a competitividade neste início de século globalizado.

No Brasil, existe pequeno interesse da indústria de pré-fabricados na linha de investigação acadêmica, conduzindo a pouca disponibilidade de dados relacionados às estruturas de concreto pré-moldado. De acordo com Catoia (2007), a proporção mundial de pesquisadores de pré-moldados em relação aos pesquisadores de estruturas metálicas corresponde a 1/30.

Como observou Emerick (2005), a pressão de um mercado estrutural cada vez mais exigente demanda um melhor aproveitamento de espaços e gera a necessidade

de vencer vãos maiores com elementos estruturais de altura reduzida. Como decorrência, cresceu o interesse do uso do concreto protendido como solução estrutural para edifícios residenciais e comerciais. Entretanto, existe pouca disponibilidade de literatura nacional relacionada ao assunto.

Segundo Ferreira et al. (2007), as lajes alveolares protendidas são os elementos pré-fabricados de maior aplicação em todo o mundo nas últimas décadas, como decorrência do custo relativamente baixo deste sistema em comparação com os sistemas convencionais.

No Brasil e de uma maneira geral, para construir um pavimento de edifícios comerciais e residenciais com um único piso ou com poucos pisos, é comum o emprego de lajes pré-moldadas pela possibilidade da redução do uso de formas, como ilustra a Figura 1. Edifícios comerciais e industriais com cargas típicas utilizam lajes protendidas ou armadas, maciças ou nervuradas, em razão da necessidade de suportar maiores cargas e do melhor aproveitamento estrutural do material com a utilização de seções resistentes em forma de T (SILVA, 2005).

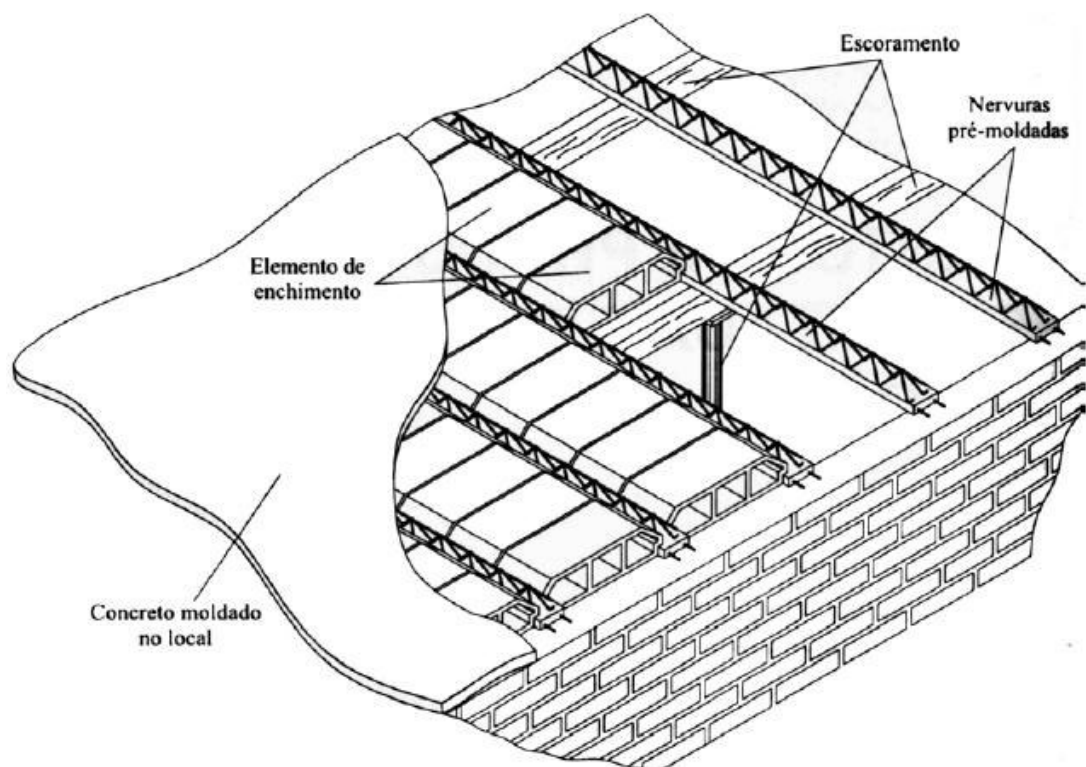


Figura 1 – Detalhe construtivo de laje pré-moldada

Fonte: El Debs (2000)

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como um de seus objetivos documentar o processo de produção de lajes alveolares protendidas em indústria de concreto pré-moldado, bem como sua aplicação em obra. De modo a identificar as vantagens e as desvantagens de utilização de lajes alveolares em edificações pretende-se obter e comparar os consumos de materiais e os custos da execução de lajes alveolares protendidas com os tipos usuais de lajes de concreto, nervuradas e treliças pré-moldadas para um determinado pavimento de referência com vãos e cargas típicas para obra comercial.

Outro objetivo pretendido é a apresentação da justificativa teórica e a sistematização de um roteiro de cálculo para o pré-dimensionamento e verificação final de pavimentos compostos por painéis de pré-lajes alveolares pré-moldados e capa de concreto estrutural moldado no local. Como forma de ilustrar o roteiro de cálculo desenvolvido, pretende-se também apresentar um exemplo numérico com características de uma obra comercial típica.

Pretende-se também elaborar um ábaco para determinar o tipo de laje alveolar mais adequada, para um determinado vão fixando a geometria da laje, variando o carregamento e considerando: a capacidade portante à flexão, à força cortante, as tensões do concreto, bem como ao atendimento da flecha máxima prevista em norma.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Concreto pré-moldado

Segundo El Debs (2000), “[...] concreto pré-moldado corresponde ao emprego de elementos pré-moldados de concreto, ou seja, ao emprego de elementos de concreto moldados fora de sua posição definitiva de utilização na construção”. A pré-moldagem pode ser empregada nas estruturas de edifícios industriais, comerciais e habitacionais, bem como em equipamentos urbanos, e pode ser utilizada também em fechamentos.

Os elementos pré-moldados de uso mais comum no Brasil, de acordo com El Debs (2000), são: a) lajes e fechamentos: painel alveolar, painel π , painel \sqcup e painel maciço; b) vigas e pilares: seção retangular, seção Γ , seção T invertido e seção quadrada vazada. As Figuras 2 e 3 representam as lajes pré-fabricadas; os painéis de fechamentos são ilustrados nas Figuras 4 e 5. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as vigas pré-fabricadas e na Figura 8 é exibido um pilar pré-fabricado.

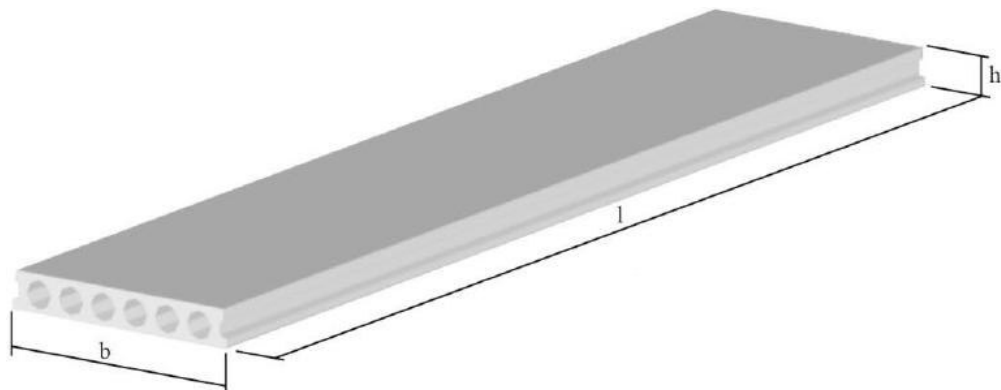


Figura 2 – Laje alveolar

Fonte: Protendit (2008)

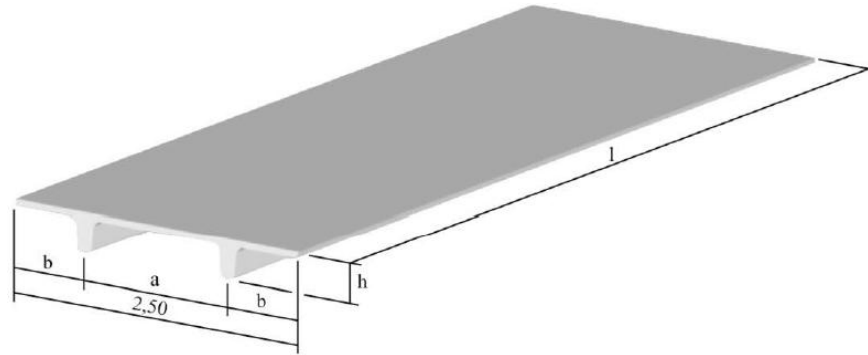


Figura 3 – Laje π

Fonte: Protendit (2008)

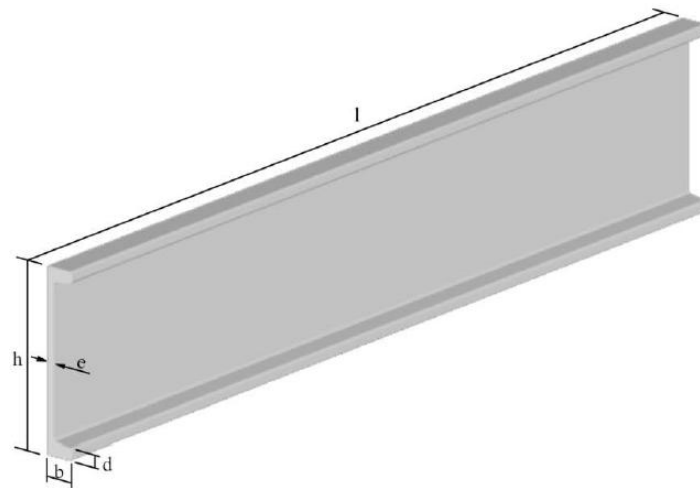


Figura 4 – Painel de fechamento lateral U

Fonte: Protendit (2008)

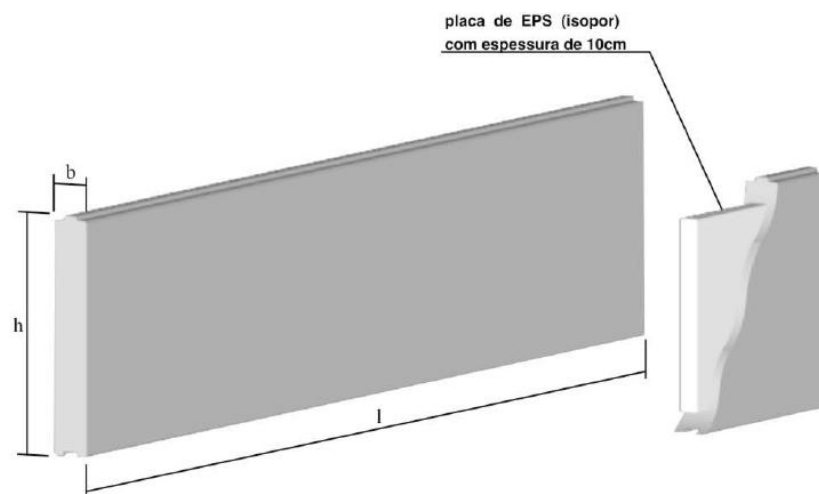


Figura 5 – Painel de fechamento lateral termo-acústico

Fonte: Protendit (2008)

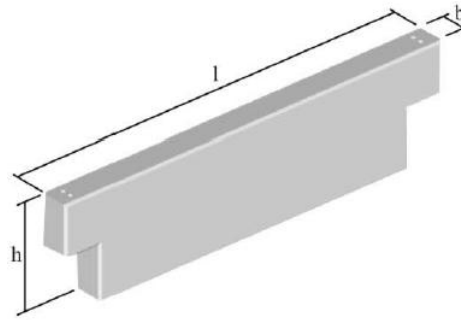


Figura 6 – Viga retangular

Fonte: Protendit (2008)

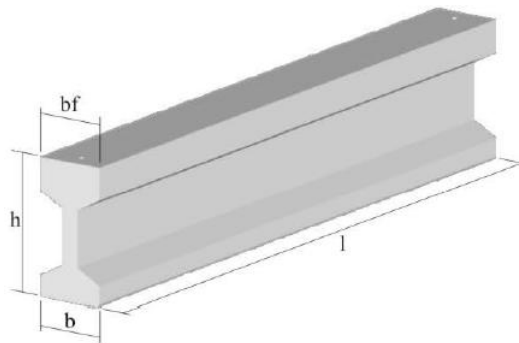


Figura 7 – Viga I

Fonte: Protendit (2008)

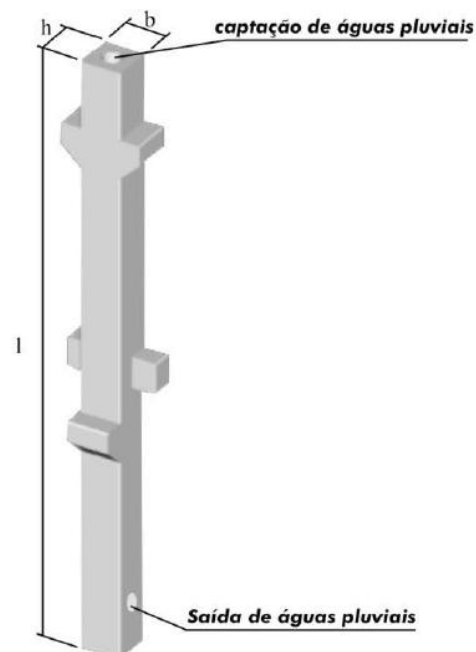


Figura 8 – Pilar retangular vazado

Fonte: Protendit (2008)

Conforme observado por El Debs (2000), a industrialização da construção civil por meio de pré-fabricação e pré-moldagem, ainda que relacionados entre si, possuem conceitos distintos. A pré-moldagem aplicada à produção em grande escala, resulta em pré-fabricação que, por sua vez, é uma forma de buscar a industrialização da construção. Esses elementos fabricados por produção em massa são montados na obra, mediante equipamentos e dispositivos de elevação.

A norma NBR 9062 (2006) da ABNT apresenta uma distinção entre elementos pré-fabricados e elementos pré-moldados diferente da anterior. Esta distinção é feita com base no controle de qualidade da execução do elemento e seu local de produção. Segundo a NBR 9062, o elemento pré-fabricado é aquele “[...] executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadram e atendem aos requisitos mínimos”, requisitos estes, especificados no texto da referida norma e referentes ao uso de mão de obra treinada e especializada e processo de cura com temperatura controlada. Já o elemento pré-moldado, é aquele “[...] moldado previamente e fora do local de utilização definitiva na estrutura”, com controle de qualidade menos rigoroso que o elemento pré-fabricado.

As vantagens da pré-moldagem, de acordo com El Debs (2000), contemplam uma construção mais rápida, mais limpa, facilidade na elaboração de projetos modulados, melhoria da qualidade de trabalhadores, melhor aproveitamento das seções resistentes, desaparecimento quase total de cimbramento e de formas, ocasionam economia de tempo e maior rapidez para retorno do capital investido. Porém, esta tecnologia depende de um maior número de maquinário que a construção convencional, isto devido às peças pré-moldadas necessitarem de equipamentos para transporte e içamento, tornando assim, em geral, mais cara que a tradicional.

3.2. Concreto protendido

Segundo Leonhardt (1983), a deficiente resistência à tração do concreto fez com que se buscasse colocar sob compressão as zonas tracionadas das estruturas de concreto, através de uma força normal de protensão aplicada excentricamente sobre o concreto, de tal modo que as tensões de compressão provenientes da protensão tendam a anular as tensões de tração no concreto, originadas de seu peso próprio e cargas atuantes, conforme apresentado na Figura 9. A convenção de sinais adotada utiliza valores negativos para tensões de compressão e positivos para tensões de tração.

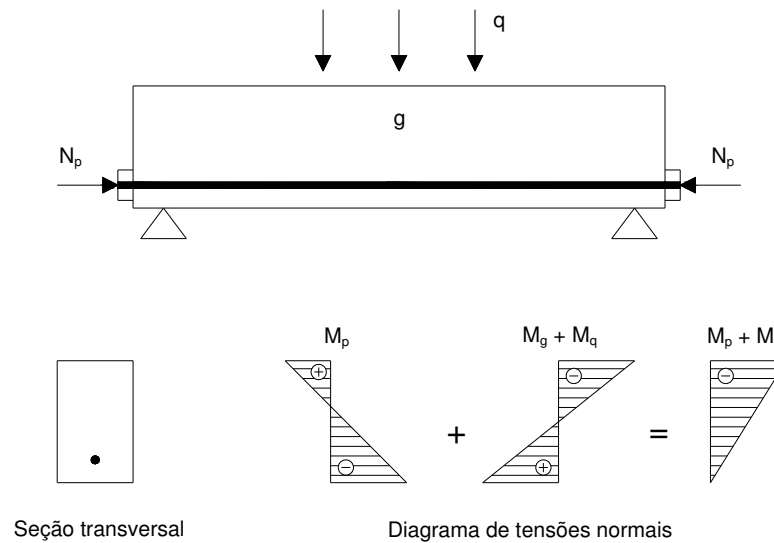


Figura 9 – Efeitos da protensão

Fonte: Adaptado de Leonhardt (1983)

A norma NBR 6118 (2007) da ABNT define estrutura de concreto protendido, como aquela que utiliza elementos “[...] nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no Estado Limite Último (ELU)”.

A protensão, de acordo com Pfeil (1984), é atingida mediante a utilização de cabos de alta resistência, tracionados e ancorados no concreto. Cordoalhas, fios e cabos de aço, também denominadas armaduras de protensão, podem ser pré-tracionados ou pós-tracionados. O sistema de pré-tração é geralmente utilizado em fábricas, onde a concretagem é realizada em instalações fixas, denominadas pistas de protensão. As pistas de protensão são longas, permitindo a produção simultânea de diversas peças.

Segundo Pfeil (1984), o sistema de pré-tração, representado na Figura 10, consiste em armaduras colocadas longitudinalmente na pista de protensão (Figura 11), atravessando todo o seu comprimento, sendo fixadas em uma extremidade por meio de dispositivos mecânicos, geralmente constituídos por cunhas, e mantida a outra extremidade móvel. Com o auxílio de macacos hidráulicos (Figura 12), estes esticam as armaduras até alcançar o esforço de protensão desejado. Por meio de calços ou cunhas as armaduras esticadas são fixadas na placa de ancoragem. O concreto é lançado dentro das formas, envolvendo as armaduras protendidas, que ficam aderentes. Após a cura do concreto e atingida a resistência mínima necessária, é

retirada lentamente a força externa aplicada nas armaduras e a seguir estas são cortadas junto às faces do concreto. O encurtamento das armaduras é impedido pela aderência das mesmas com o concreto, resultando em estruturas protendidas.

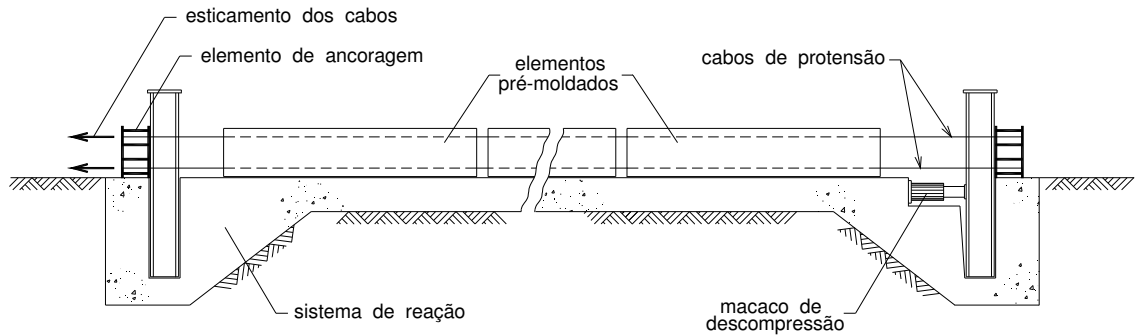


Figura 10 – Sistema com armadura pré-tracionada

Fonte: Migliore Junior e Pastore (2007)



Figura 11 – Pistas de protensão em indústria de pré-moldados



Figura 12 – Macaco de protensão de monocordalha

Fonte: Hanai (2005)

Ainda segundo Pfeil (1984), os sistemas com armaduras pós-tracionadas são mais utilizados quando a protensão é realizada na obra. Neste sistema, a protensão é realizada após o ganho de resistência do concreto. O concreto é lançado em formas e são colocados os cabos de aço no interior de bainhas. Após o concreto ter atingido resistência suficiente, os cabos são esticados pelas extremidades, até atingirem o alongamento desejado. Em seguida, os cabos são ancorados nas faces do concreto com dispositivos mecânicos, aplicando assim o esforço de compressão ao concreto. A Figura 13 apresenta a fase de montagem de macaco hidráulico para protensão de cabos pós-tracionados.



Figura 13 – Montagem de macaco hidráulico para protensão

Fonte: Migliore Junior e Pastore (2007)

Emerick (2005) classifica o sistema de pós-tração quanto à sua aderência entre os cabos e o concreto, em sistemas: aderente e não aderente. No sistema com protensão aderente, após a protensão dos cabos, é injetada nata de cimento dentro das bainhas metálicas (Figura 14), as quais abrigam as cordoalhas a serem protendidas. Já no sistema não aderente, as cordoalhas ficam envolvidas por uma camada de graxa e bainhas de polietileno, como observado na Figura 15.



Figura 14 – Bainhas metálicas e luva de emenda

Fonte: Lacerda (2007)



Figura 15 – Cordoalhas engraxadas com e sem bainhas

Fonte: Lacerda (2007)

O objetivo principal do concreto protendido, segundo Rocha (1972), é criar um processo que permite usar aços de alta resistência à tração, obtendo assim, estruturas mais leves e esbeltas com o uso de concreto de resistência elevada à compressão.

Leonhardt (1983) acrescenta, na utilização de concreto protendido, a vantagem de vencer vãos maiores com estruturas mais esbeltas e de menor peso próprio do que o concreto armado, com a melhoria da capacidade de utilização e de elevada resistência à fadiga.

A possibilidade de vencer maiores vãos com lajes protendidas, permitindo maior liberdade arquitetônica e redução do número de pilares, com conseqüente aumento na área útil e número de vagas em estacionamento é observado por Emerick (2005). Outra vantagem é a possibilidade de suprimir o uso de vigas, permitindo a redução total na altura do edifício e conseqüentemente, diminuindo o peso da estrutura, com ganho de velocidade na desforma, menor presença de escoramentos, redução de flechas e economia, em relação às estruturas de laje em concreto armado, para vãos superiores a sete metros.

3.3. Lajes de concreto

As lajes, segundo Fusco (1995), são elementos estruturais bidimensionais planos de superfície lisa com cargas preponderantemente normais ao seu plano, como ilustrado na Figura 16. Considerando uma estrutura convencional, as lajes transmitem as cargas do piso às vigas, que as transmitem, por sua vez, aos pilares, através dos quais conduzem as cargas para a fundação, que dirige estas cargas ao solo.

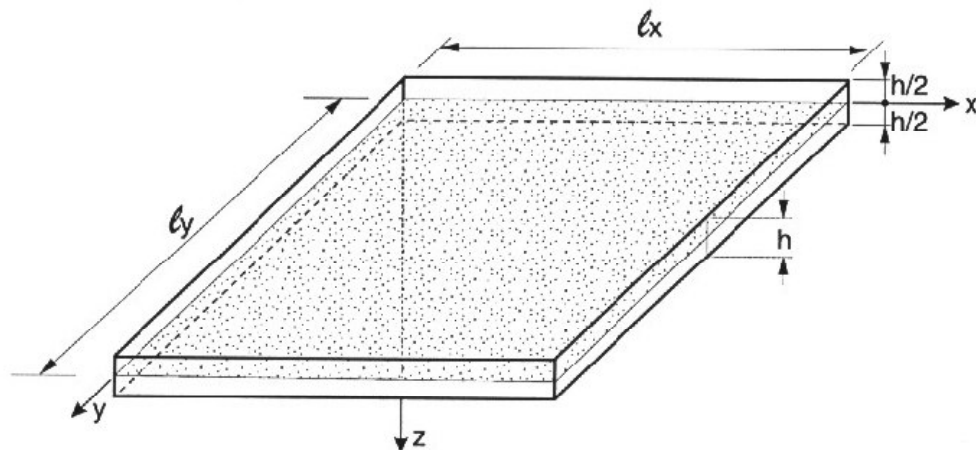


Figura 16 – Representação de uma laje de concreto

Fonte: Fusco (1995)

De acordo com Fusco (1995), as lajes possuem um papel importante no esquema resistente para as ações horizontais, com rigidez praticamente infinita no plano horizontal, se comportam como diafragmas rígidos ou chapas, promovendo a

distribuição dos esforços entre os elementos estruturais e assim funcionando como estruturas de contraventamento, importantes para a estabilidade global do edifício.

As lajes convencionais podem ser maciças ou nervuradas. As maciças são mais tradicionais, vencem vãos de cerca de cinco metros, são mais pesadas e funcionam melhor como diafragmas rígidos, porém há maior utilização de formas e escoramento. A laje nervurada é uma boa opção para vencer grandes vãos. Apesar de possuir maior espessura, há menor consumo de concreto por conta dos vazios entre as nervuras que podem ser aparentes ou preenchidos com materiais inertes, como tijolos cerâmicos e EPS, resultando em um conjunto mais leve. O consumo de aço também é menor, pois a espessura maior aumenta a eficiência da laje. Outra vantagem das lajes nervuradas é permitir que as vigas e capitéis sejam embutidos na espessura da laje podendo torna-se lajes lisas (CICHINELLI, 2008).

A Figura 17 mostra um exemplo de um pavimento com laje moldada no local de concreto armado, apoiada diretamente em pilares. A laje é construída por formas de polipropileno com nervuras aparentes. Para esconder os vazios, gerados pelas formas de polipropileno, pode-se utilizar placas de gesso ou de outro material, que se fixa na própria laje, na face inferior das nervuras (SILVA, 2005).



Figura 17 – Laje nervurada construída com formas de polipropileno

Fonte: Silva (2005)

Outro recurso possível é apresentado por Emerick (2005), principalmente quando há necessidade de vãos maiores que seis metros. Neste caso é empregada a protensão, tanto em lajes lisas como nervuradas, em sistema de protensão aderente

ou com cordoalha engraxada (Figura 18). A viabilidade econômica deste tipo de protensão permite sua utilização para vãos na faixa de sete metros a dez metros.



Figura 18 – Laje lisa com cordoalha engraxada

Fonte: Migliore Junior e Pastore (2007)

Segundo El Debs (2000), para pequenos vãos é muito empregado no país, lajes formadas por nervuras pré-moldadas, conhecidas como vigotas pré-moldadas, e elementos de enchimento, tais como blocos vazados ou de poliestireno expandido (EPS), que posteriormente recebem uma camada de concreto moldado no local. As nervuras empregadas no Brasil são de seção T invertido, em concreto armado ou em concreto protendido, ou nervura com armadura em forma de treliça que se projeta para fora da seção de concreto inicial. Normalmente, esse tipo de laje alcança vãos da ordem de cinco metros com nervuras em concreto convencional e de dez metros com nervuras em concreto protendido e com nervuras de armação treliçada. A Figura 19 apresenta as vigotas pré-moldadas de concreto de maior utilização no Brasil.

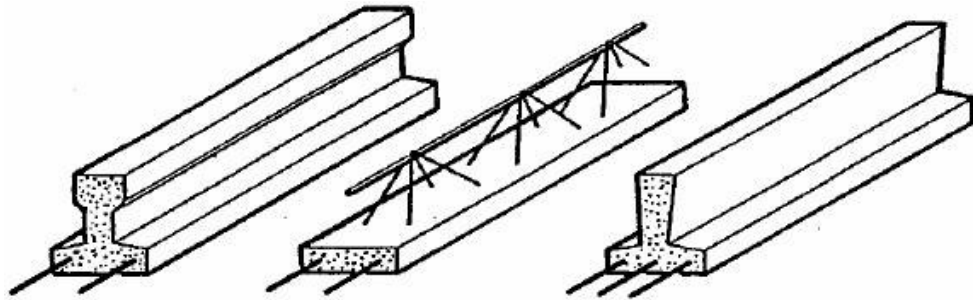


Figura 19 – Vigotas de concreto pré-moldado: armada, treliçada e protendida

Fonte: Adaptado de El Debs (2000)

As lajes de elementos pré-fabricados também contemplam as lajes tipo π e alveolares. As lajes π são elementos em concreto protendido, produzidos normalmente em pistas de protensão, empregados na faixa de vãos de cinco metros a doze metros. As lajes alveolares quando combinadas com protensão, são capazes de cobrir vãos de quatro metros até quinze metros (EL DEBS, 2000).

3.4. Generalidades da laje alveolar

As lajes alveolares são originais da Alemanha, segundo El Debs (2000), e representam um dos mais populares elementos pré-fabricados no mundo, em especial na América do Norte e na Europa Ocidental, onde são peças de grande versatilidade, que podem ser aplicadas em qualquer tipo de sistema construtivo (convencional, pré-fabricado, metálico, alvenaria estrutural e outros), para fim habitacional, comercial, industrial e de estacionamento, empregados tanto para execução de pisos, sendo o mais comum, e como na forma de fechamentos ou painéis.

Devido à fácil instalação e à possibilidade de atingir grandes vãos, estas lajes facilitam o layout e otimizam a estrutura, seja ela de alvenaria estrutural, metálica ou de concreto, convencional ou pré-fabricado. De acordo com Melo (2004), estes são os principais motivos para o grande sucesso do sistema de lajes de piso em lajes alveolares no mercado da construção civil.

Segundo Melo (2004), existem basicamente dois tipos de lajes alveolares: a extrudada e a moldada. As lajes extrudadas, apresentam como característica do concreto um fator água-cimento muito baixo, apresentam uma melhor qualidade final, garantindo maior resistência à compressão e menor porosidade do concreto. A Figura 20 apresenta a produção por extrusão de uma laje pré-fabricada.



Figura 20 – Produção de lajes por extrusão

Fonte: Hanai (2005)

De acordo com El Debs (2000), as lajes alveolares são produzidas em formas fixas (moldada) ou executadas por fôrma deslizante (extrudada) em longas pistas de concretagem, e com utilização de concreto protendido. As lajes extrudadas são produzidas no comprimento da pista e, posteriormente, cerradas nos comprimentos desejados, como ilustrado na Figura 21. A limitação à modulação da laje fica restrita apenas na largura da pista de protensão, com larguras usuais de 1,00 a 1,25 metros e com espessuras de 12 a 50 centímetros.



Figura 21 – Corte por disco diamantado de laje alveolar extrudada

Fonte: R4 (2008)

Em geral é utilizado o sistema de protensão com a colocação da armadura ativa aderente na mesa inferior, sendo os cabos de protensão posicionados na direção longitudinal da laje e também na mesa superior. O concreto utilizado para a produção das lajes é executado com cimentos de alta resistência inicial. Devido à inexistência de armadura para resistir à força cortante e para solicitações na direção transversal, estes esforços são suportados apenas pela resistência à tração do concreto (EL DEBS, 2000).

Segundo Elliott (1996), a protensão está presente em mais de 90% de todos os elementos estruturais de concreto pré-fabricado utilizados na Europa como estruturas de piso, por apresentar uma relação maximizada da capacidade estrutural em comparação com um menor peso próprio.

As lajes alveolares de piso, segundo Ferreira et al. (2007), recebem uma capa estrutural de concreto moldado no local de espessura mínima de cinco centímetros para formar uma seção composta que trabalha em conjunto com a laje pré-moldada, aumentando a capacidade de resistência à flexão. Desde que exista aderência entre a capa e a superfície da laje junto ao apoio, esta capa também aumenta a capacidade de resistência ao cisalhamento. A capa fornece maior enrijecimento das nervuras e permite a solidarização e o nivelamento do conjunto, devido às diferenças de contra flecha neste tipo de peça. A Figura 22 ilustra a solidarização das lajes pela capa de concreto moldado no local com malha de distribuição.

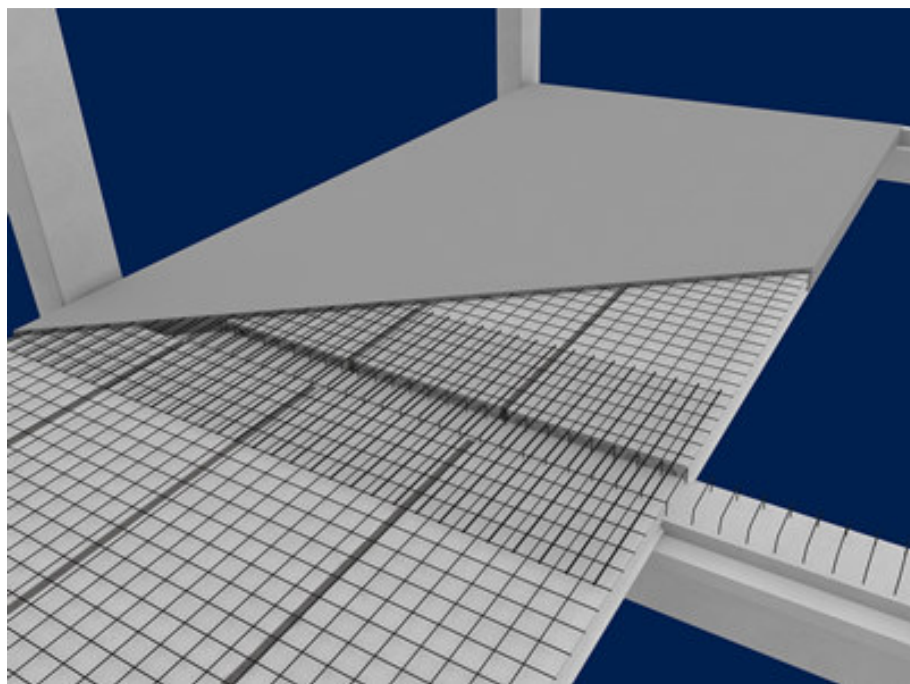


Figura 22 – Lajes solidarizadas com capa estrutural de concreto

Fonte: Lajeal (2008)

De acordo com Araujo (2007), as lajes alveolares possuem alvéolos longitudinais que reduzem o consumo de material e a massa de concreto na estrutura e que apresentam diferentes formas de vazio segundo cada fabricante. As seções transversais destas lajes podem apresentar alvéolos circulares, ovais, retangulares e mistos. Sua variação está relacionada a limitações construtivas.

Conforme Melo (2004), a movimentação das lajes pré-fabricadas pode ocorrer com auxílio de fita, que laça a laje por baixo e a cerca de 30 centímetros das extremidades da peça, como ilustra a Figura 23. Outros fabricantes utilizam alças ou dispositivos de içamento para o transporte de lajes alveolares.

Para a situação apresentada na Figura 23, a fita foi posicionada a mais de 30 centímetros de uma das extremidades da peça, isto ocorreu devido a esta extremidade já estar posicionada no apoio de uma viga de concreto. Na outra extremidade, a fita está posicionada a cerca de 30 cm da extremidade, para assim ser posicionada na viga de concreto.



Figura 23 – Posicionamento de laje alveolar com auxílio de fita

Fonte: Tatu (2008)

De acordo com Melo (2004), na estocagem (Figura 24), as lajes alveolares são posicionadas sempre na posição horizontal e são colocados calços de madeira no mínimo a 30 centímetros de cada extremidade da peça pré-moldada.



Figura 24 – Estocagem de lajes alveolares com calços de madeira

4. METODOLOGIA

Para acompanhar e documentar o processo de fabricação de lajes alveolares protendidas, bem como a montagem e a execução no canteiro de obras, foram realizadas visitas técnicas à indústria de pré-fabricados denominada Premoldados Protendit Ltda., situada na cidade de São José do Rio Preto – SP. Desta etapa, pretendeu-se identificar as vantagens e as desvantagens do processo construtivo de pré-moldados.

Para o desenvolvimento do roteiro de cálculo de pré-dimensionamento de lajes alveolares foi necessário realizar a revisão bibliográfica dos detalhes de dimensionamento de lajes protendidas. Para relatar a rotina de cálculo do estudo de laje alveolar, dada a importância e a extensão, julgou-se necessário situar este estudo específico no item 5.2, bem como um exemplo numérico no item 5.3. Os resultados obtidos com o exemplo numérico de dimensionamento de lajes alveolares foram comparados com os obtidos por planilha eletrônica utilizada em escritório de projetos estruturais e software comercial denominado ProUni versão 2.0 desenvolvido pela empresa TQS Informática Ltda.

A construção do ábaco para a escolha do tipo mais adequado de laje alveolar para um determinado vão foi efetuada com auxílio do software ProUni e da planilha eletrônica considerando a capacidade portante à flexão, à força cortante, às tensões do concreto e ao atendimento da flecha máxima, variando o vão e a carga para um mesmo tipo de laje alveolar. Para confecção deste ábaco foram estudados quatro arranjos de cordoalhas para a laje de piso LP20 da Premoldados Protendit Ltda.

Os consumos de materiais e os custos da implantação do sistema construtivo de lajes alveolares foram comparados para aqueles obtidos com os tipos de lajes usuais, nervuradas e pré-moldadas treliçadas, para a mesma obra com vão teórico de 7,50 m em uma típica edificação comercial. Para o dimensionamento dos elementos estruturais laje, viga e pilar foi utilizado o software comercial CAD/Formas versão 13.5 desenvolvido pela empresa TQS Informática Ltda.

Foram também comparados os índices de consumos de materiais para cada sistema de laje. Os índices analisados foram estabelecidos com relação aos elementos de pilares, vigas e lajes, desconsiderando os elementos de fundação, escadas e outros, em razão de não serem o foco principal deste trabalho.

Para este estudo os índices de consumo de concreto, de aço e de forma foram determinados pelas seguintes relações:

$$IC_A = \frac{Vol}{A_{pav}} \text{ (m}^3/\text{m}^2\text{)} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: A_{pav} : área do pavimento

IC_A : índice de consumo de concreto por área de construção

Vol : volume de concreto

$$IA_A = \frac{P}{A_{pav}} \text{ (kgf / m}^2\text{)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$IA_V = \frac{P}{Vol} \text{ (kgf / m}^3\text{)} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: IA_A : índice de consumo de aço por área de construção

IA_V : índice de consumo de aço por volume de construção

P : peso de aço

Neste trabalho os índices de consumo de aço foram separados em armadura passiva composta por vergalhões de aço CA-50 e telas de aço CA-60 e armadura ativa composta por cordoalhas CP-190 e fios CP-150.

$$IF_A = \frac{A_f}{A_{pav}} \text{ (m}^2/\text{m}^2\text{)} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$IF_V = \frac{A_f}{Vol} \text{ (m}^2/\text{m}^3\text{)} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde: A_f : área de forma

IF_A : índice de consumo de forma por área de construção

IF_V : índice de consumo de forma por volume de construção

Os índices de consumo de forma foram compostos pela área total de forma de madeira e de forma plástica. Cabe lembrar que as formas do sistema de lajes alveolares consideram os elementos de viga e de pilar moldados no local. Foram considerados elementos pré-moldados apenas as pré-lajes alveolares e treliçadas.

5. CARACTERIZAÇÃO DA LAJE ALVEOLAR

5.1. Produção e execução

Foram realizadas visitas técnicas à indústria de pré-fabricados Premoldados Protendit Ltda., situada na cidade de São José do Rio Preto – SP, com o intuito de documentar o processo produtivo de lajes alveolares.

A produção das lajes alveolares é dividida em seis etapas, a saber: preparação da pista de protensão; estiramento da armadura; posicionamento das formas dos alvéolos; concretagem; cura a vapor e desprotensão.

A primeira etapa de produção consiste na limpeza da pista de protensão. Nesta etapa são eliminados os excessos de material da etapa de protensão anterior, bem como é aplicado desmoldante. Este processo tem duração aproximada de 1h30min, sendo regularmente realizado no período da manhã entre 8h00min e 9h30min.

Após a limpeza da pista de protensão, as cordoalhas são posicionadas sobre a pista, para assim serem ancorados em uma das extremidades. A Figura 25 ilustra a fixação das cordoalhas mediante a utilização de cunhas.

As cordoalhas devem ser posicionadas na outra extremidade da pista para realizar o estiramento das mesmas. Estas são alongadas por macaco de protensão de monocordoalha (Figura 26) até alcançar a força de tração desejada em projeto. Esta força é verificada por meio do controle da pressão lida no manômetro do macaco de protensão (Figura 27) e no alongamento total da cordoalha. Para cada força de tração em cada tipo de cordoalha ou fio utilizado, já está padronizada a pressão correspondente a ser obtida no manômetro e o alongamento desejado.

Na Figura 28 pode se observar a presença do gancho de içamento, posicionado junto à armadura de protensão por arame recozido. Esta mesma figura também mostra o perfil limitador metálico chamado de pente, que posiciona tanto as cordoalhas quanto os tubos de laje alveolar. As peças individuais de laje alveolar são separadas pelo perfil limitador, pois não é lançado concreto no trecho interior do separador.



Figura 25 – Fixação de cordoalhas



Figura 26 – Alongamento de cordoalhas



Figura 27 – Manômetro de bomba hidráulica



Figura 28 – Gancho de içamento e perfil limitador de laje alveolar

Os tubos de aço são posicionados na pista de protensão para a formação dos alvéolos na laje pré-moldada, como mostra a Figura 29. Para facilitar a retirada, estes

recebem a aplicação de desmoldante. Entre os tubos são posicionadas barras de aço guias, perpendiculares à pista para manter o espaçamento entre tubos.



Figura 29 – Tubos de aço para formação de alvéolos

A Figura 30 mostra um detalhe da extremidade dos tubos internos com o dispositivo para sacar estes tubos no início da pega do concreto ainda a ser lançado.



Figura 30 – Extremidade de tubos internos

A etapa de alongamento dos cabos, posicionamento de ganchos e forma interna dos alvéolos, inicia regularmente por volta das 9h30min, com duração média de duas horas. Às 11h30min são encerradas as etapas matinais de produção com início do almoço.

Após o almoço, às 14h é iniciada a etapa de concretagem das lajes alveolares. Nesta indústria de pré-moldados o concreto é lançado por meio de caçambas, que são suspensas e transportadas pela ponte rolante da fábrica por toda extensão da pista de protensão. A Figura 31 ilustra a concretagem de uma viga retangular com auxílio da caçamba. O concreto é lançado por gravidade a partir da abertura do acesso localizado na face inferior da caçamba.



Figura 31 – Lançamento de concreto em viga retangular

A Figura 32 mostra a operação de distribuição e adensamento do concreto em laje alveolar. Nesta etapa é necessária a utilização de enxada para auxiliar na distribuição do concreto, bem como a utilização de vibradores de imersão para promover o adensamento do concreto.

Enquanto uma equipe trabalha para adensar o concreto já lançado sobre a forma das lajes alveolares, outra trabalha em trecho posterior no acabamento de superfície das lajes, como ilustra a Figura 33, pois é necessário que exista adequada rugosidade na face que deverá receber posteriormente a capa moldada no local da obra. Nesta figura pode se notar que na mesma pista de protensão existem lajes

alveolares com diferentes larguras. Isto é possível mediante a utilização de formas laterais auxiliares.



Figura 32 – Concretagem de laje alveolar



Figura 33 – Acabamento de laje alveolar

A etapa de concretagem tem duração de quatro a cinco horas. Concluída a concretagem no final da tarde, é realizada em seguida a cura a vapor do concreto. A laje alveolar é coberta por manta plástica que ajuda a diminuir o escape de vapor para o ambiente.

O processo de cura a vapor é automatizado, sendo imposta a temperatura desejada, que varia de 40 a 50 °C, a ser mantida em período de tempo de seis a oito horas. Atingido o tempo necessário de cura a vapor, o sistema é desligado automaticamente entre meia noite e 3h da manhã seguinte.

Depois de encerrado o processo de cura a vapor, o concreto adquire resistência suficiente para suportar a protensão proveniente do corte das cordoalhas. Logo pela manhã do segundo dia, às 7h, é realizada esta etapa chamada comumente de desprotensão. Em seguida, as cordoalhas são cortadas com serra de disco abrasivo ou maçarico, rentes à face das lajes pré-moldadas. A Figura 34 apresenta o aspecto da extremidade da peça antes do acabamento final. A etapa de desprotensão é concluída em apenas uma hora.



Figura 34 – Extremidade da laje pré-moldada antes do corte final das cordoalhas

Concluído o processo de produção de lajes alveolares, estas são sacadas das formas fixas e transportadas até o local de estocagem pela ponte rolante presente na fábrica. As lajes alveolares em seguida são transportadas até caminhões que as

conduzirão ao canteiro de obra. Estas são retiradas dos caminhões através de içamento pelos ganchos com guindaste ou equipamento de içamento no local da obra. Normalmente, as lajes são retiradas do caminhão de transporte e já posicionadas no local definitivo de montagem da laje de piso.

A obra aqui documentada para ilustrar a execução de piso foi o canteiro da nova fábrica da Premoldados Protendit Ltda., como mostra a Figura 35. Nesta obra, algumas lajes alveolares foram simplesmente bi-apoiadas nas vigas e outras possuem trecho em balanço.



Figura 35 – Laje alveolar bi-apoiada em vigas pré-moldadas

Para a formação do piso, as lajes alveolares são posicionadas lado a lado (Figura 36), de forma que possa ser realizado o nivelamento entre elas. Pode se observar na Figura 37 a presença de ferramentas para nivelamento e de graute entre as faces laterais das lajes pré-moldadas. O processo de concretagem entre as faces laterais da laje é chamado de chaveteamento e desempenha papel importante para igualar deslocamentos e transmitir ações entre duas peças vizinhas, através da chave de cisalhamento formada entre elas.

A Figura 38 ilustra a armadura de ligação ou arranques da viga que são dobrados sobre a laje alveolar para garantir a solidarização entre estas peças após a concretagem da capa de concreto moldado no local. Além dos arranques, sobre as lajes alveolares são posicionadas telas eletro soldadas de aço CA-60 (Figura 39), que

serão incorporadas à capa estrutural moldada no local, bem como os ganchos de içamento e arranques de vigas.



Figura 36 – Lajes alveolares montadas no pavimento



Figura 37 – Conclusão da etapa de nivelamento entre as lajes alveolares



Figura 38 – Armadura de ligação entre viga e laje alveolar



Figura 39 – Trecho de laje em balanço e detalhe da tela da capa

A Figura 40 mostra o aspecto de laje alveolar equalizada e solidarizada com o chaveteamento e capa de concreto moldado no local, após o polimento do concreto do piso. A Figura 41 apresenta uma vista por baixo das lajes alveolares depois de

niveladas. Do ponto de vista estrutural não é necessário realizar qualquer acabamento na parte inferior. Dependendo de aspectos arquitetônicos do tipo de obra, a face inferior das lajes é mantida como ilustrada na Figura 41 ou é fixado forro de gesso, de PVC (policloreto de vinila) ou outro material apenas com finalidade estética.



Figura 40 – Laje alveolar com capa de concreto polido



Figura 41 – Vista por baixo das lajes alveolares acabadas

5.2. Roteiro de cálculo

Para a apresentação do roteiro de cálculo de lajes alveolares, primeiramente é necessário revisar alguns conceitos importantes de concreto protendido, tal como feito a seguir.

No momento em que se aplica a força de protensão N_{po} ao concreto, imediatamente após a ancoragem das cordoalhas, esta força de protensão sofre redução de sua intensidade, denominada perda imediata de protensão. Esta perda ocorre devido às seguintes situações: atrito com peças adjacentes, relaxamento inicial da cordoalha, acomodação da cordoalha no cone de ancoragem e encurtamento da peça de concreto (PFEIL, 1984). No caso de protensão por pré-tração, é importante apenas a perda devido ao encurtamento elástico do concreto.

Deste modo, a força de protensão existente após as perdas imediatas, é obtida com a seguinte equação:

$$N_{pi} = \gamma_{pi} \cdot N_{po} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde: N_{po} : força de protensão sem perdas

N_{pi} : força de protensão com perdas imediatas

γ_{pi} : fator de perda imediata de protensão

Segundo Pfeil (1984), na situação de serviço, com o decorrer do tempo, a força de protensão sofre ainda redução chamada de perda progressiva devido à relaxação do aço, retração do concreto e fluência do mesmo. Essa força é determinada pela equação a seguir:

$$N_p = \gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \cdot N_{po} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde: N_p : força de protensão final com perdas imediatas e progressivas

γ_{pp} : fator de perda progressiva de protensão

A partir da Eq. 7, verifica-se que as perdas de protensão na pré-tração totalizam o produto das perdas imediatas e das perdas progressivas. Deste modo, pode se admitir como fator de perda total de protensão γ_p a Eq. 8:

$$\gamma_p = \gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \quad (\text{Eq. 8})$$

Devido à dificuldade em conhecer o valor exato da perda de protensão, em escritório de projetos estruturais os valores de perdas de protensão no pré-dimensionamento são admitidos em função da prática e da observação de resultados para o mesmo tipo de obra. Sendo assim, neste estudo são adotados os valores usuais de perdas de protensão para a situação de armadura reta aderente pré-tracionada:

- $\gamma_{pi} = 0,950$ (valor equivalente a perdas imediatas de 5,0%)
- $\gamma_{pp} = 0,915$ (valor equivalente a perdas progressivas de 8,5%)
- $\gamma_p = 0,869$ (valor equivalente a perdas totais de 13,1%)

A força de protensão N_p quando aplicada na face inferior, excêntrica ao centro geométrico (CG) da seção transversal da peça de concreto, provoca um momento fletor M_p . Tal momento fletor é o produto da força de protensão N_p pela excentricidade de protensão e_p , como apresentado na Eq. 9:

$$M_p = N_p \cdot e_p \quad (\text{Eq. 9})$$

Este momento fletor M_p traciona a face superior da peça e comprime a face inferior. Deste modo são obtidas tensões normais σ de compressão na fibra inferior e tensões normais σ de tração na fibra superior. A convenção de sinais adotada utiliza valores negativos para tensões de compressão e positivos para tensões de tração. A Figura 42 apresenta o diagrama de tensões normais decorrente da aplicação de força de protensão excêntrica.

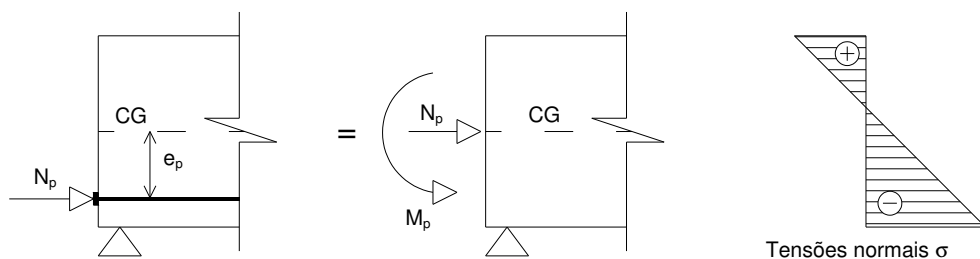


Figura 42 – Esquema de protensão e diagrama de tensões

No caso de lajes alveolares, são posicionadas cordoalhas na face inferior e superior. A Figura 43 mostra a situação de aplicação de forças de protensão excêntricas, tanto em relação à face inferior como em relação à superior. Para essa situação é conveniente determinar o cabo resultante para simplificação do dimensionamento. Assim, é possível admitir as seguintes equações:

$$N_p = N_{p,i} + N_{p,s} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$e_p = \frac{N_{p,i} \cdot e_{p,i} + N_{p,s} \cdot e_{p,s}}{N_p} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde: $e_{p,i}$: excentricidade do cabo de protensão inferior

$e_{p,s}$: excentricidade do cabo de protensão superior

$N_{p,i}$: força de protensão com perdas totais no cabo inferior

$N_{p,s}$: força de protensão com perdas totais no cabo superior

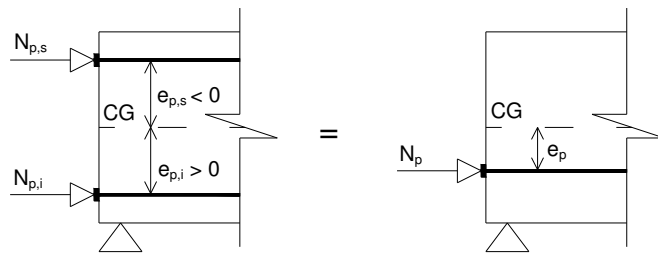


Figura 43 – Cabo de protensão resultante

Para o pré-dimensionamento da laje alveolar foi adotado o processo elástico apresentado por Rocha (1972), que admite as seções em regime elástico. Deste modo, as tensões calculadas no instante de aplicação da protensão, situação identificada como ato de protensão (ATO) e na combinação de carregamento máximo, situação identificada como combinação rara (CR), não devem ser superiores às tensões admissíveis estabelecidas em norma técnica.

Neste trabalho, a identificação das tensões normais é composta por dois índices. O primeiro indica a posição da fibra, onde o índice s corresponde à fibra superior e o índice i, à fibra inferior. O segundo índice indica a situação de carregamento, onde ATO corresponde ao ato de protensão e CR ao carregamento máximo. Os diagramas de tensões para as situações de ATO e de CR são ilustrados na Figura 44, onde a troca de sinal corresponde à aplicação de momento fletor devido ao carregamento aplicado, que traciona as fibras inferiores.

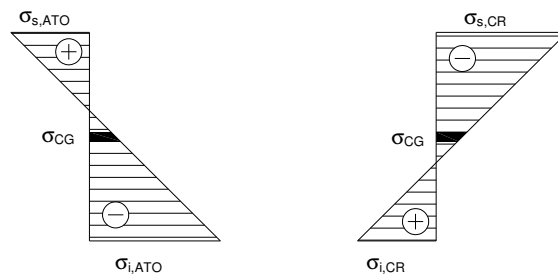


Figura 44 – Diagrama de tensões no ATO e na CR

É possível notar que, para qualquer situação onde a seção transversal e a força de protensão são mantidas constantes, a tensão na fibra do CG deve ser sempre de compressão.

Segundo Rocha (1972), a determinação das tensões para a situação de aplicação da protensão (ATO), pode ser feita com as equações Eq. 12 e Eq. 13. Para a situação de ações de combinação rara (CR), as tensões são determinadas pelas equações Eq. 14 e Eq. 15.

$$\sigma_{s,ATO} = -\frac{\gamma_{pi} \cdot N_{po}}{A_c} + \frac{\gamma_{pi} \cdot M_{po} - M_{go}}{W_s} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\sigma_{i,ATO} = -\frac{\gamma_{pi} \cdot N_{po}}{A_c} - \frac{\gamma_{pi} \cdot M_{po} - M_{go}}{W_i} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\sigma_{s,CR} = -\frac{\gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \cdot N_{po}}{A_c} + \frac{\gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \cdot M_{po} - M}{W_s} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\sigma_{i,CR} = -\frac{\gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \cdot N_{po}}{A_c} - \frac{\gamma_{pp} \cdot \gamma_{pi} \cdot M_{po} - M}{W_i} \quad (\text{Eq. 15})$$

onde: A_c : área da seção transversal bruta de concreto, sem descontar ou acrescentar o efeito da armadura (Estádio I)

M : momento fletor devido ao carregamento máximo

M_{go} : momento fletor devido ao peso próprio

M_{po} : momento de protensão sem perdas

W_i : módulo resistente da seção em relação à fibra inferior

W_s : módulo resistente da seção em relação à fibra superior

Sendo denominados como módulos resistentes da seção transversal as relações:

$$W_i = \frac{I_c}{y_i} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$W_s = \frac{I_c}{y_s} \quad (\text{Eq. 17})$$

onde: I_c : momento de inércia da seção bruta de concreto

y_i : distância da fibra inferior em relação ao CG

y_s : distância da fibra superior em relação ao CG

Para a situação de combinação rara de ações (CR), o momento fletor M devido ao carregamento máximo na laje alveolar, é obtido através da equação:

$$M = M_{go} + M_{g1} + M_{g2} + M_q \quad (\text{Eq. 18})$$

onde: M_{g1} : momento fletor devido ao peso próprio da capa de concreto e do chaveteamento da peça pré-moldada

M_{g2} : momento fletor devido ao peso próprio de pavimentação e revestimentos

M_q : momento fletor devido à ação acidental aplicada

Multiplicando a Eq. 12 pelo fator de perdas progressivas γ_{pp} e subtraindo nesta equação o valor da Eq. 14, resulta a relação:

$$\gamma_{pp} \cdot \sigma_{s,ATO} - \sigma_{s,CR} = \frac{M - \gamma_{pp} \cdot M_{go}}{W_s} \quad (\text{Eq. 19})$$

Para que as tensões máximas coincidam com as tensões admissíveis, é imposto na Eq. 19 tensões com seus valores admissíveis $\bar{\sigma}$. Deste modo, pode ser obtida a seguinte relação para a determinação do módulo resistente superior necessário $W_{s,n}$:

$$W_s \geq W_{s,n} = \frac{M - \gamma_{pp} \cdot M_{go}}{\gamma_{pp} \cdot \bar{\sigma}_{s,ATO} - \bar{\sigma}_{s,CR}} \quad (\text{Eq. 20})$$

De modo análogo, as equações Eq. 13 e Eq. 15 permitem obter a seguinte relação para o módulo resistente inferior necessário $W_{i,n}$:

$$W_i \geq W_{i,n} = \frac{M - \gamma_{pp} \cdot M_{go}}{\bar{\sigma}_{i,CR} - \gamma_{pp} \cdot \bar{\sigma}_{i,ATO}} \quad (\text{Eq. 21})$$

As relações obtidas com a Eq. 20 e a Eq. 21 determinam qual o módulo resistente necessário para o carregamento máximo no meio do vão, sem ultrapassar os valores admissíveis das tensões. Desta forma, é possível pré-dimensionar a seção através dos módulos resistentes.

Para não ocorrerem fissuras no concreto, a norma NBR 6118 (2007), recomenda utilizar coeficientes de ponderação para as tensões máximas do concreto, sendo admitido o coeficiente de 0,7 para tensões de compressão e de 1,2 para tensões de tração. Assim, as tensões admissíveis no ato de protensão e na combinação rara de ações ficam como sendo:

$$\bar{\sigma}_{s,ATO} = 1,2 \cdot f_{ctj} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$- \bar{\sigma}_{i,ATO} = 0,7 \cdot f_{cj} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$- \bar{\sigma}_{s,CR} = 0,7 \cdot f_{ck} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$\bar{\sigma}_{i,CR} = 1,2 \cdot f_{ctk} \quad (\text{Eq. 25})$$

onde: f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias

f_{cj} : resistência característica do concreto à compressão aos j dias

f_{ctk} : resistência característica do concreto à tração direta aos 28 dias

f_{ctj} : resistência característica do concreto à tração direta aos j dias

Usualmente em fábricas de pré-moldados, é adotado para tensão f_{cj} o valor correspondente a 60% da resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias, como indica a equação:

$$f_{cj} = 0,6 \cdot f_{ck} \quad (\text{Eq. 26})$$

Para avaliar a resistência característica do concreto à tração na flexão, deve ser considerado o seu valor característico, conforme determinado pela Eq. 27. De modo análogo, f_{ctj} é obtido a partir da tensão f_{cj} .

$$f_{ctk} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Eq. 27})$$

Rocha (1972) determina qual é a força de protensão necessária $N_{po,n}$ a partir das solicitações existentes de projeto. Esta força de protensão também é limitada pelos valores de tensões admissíveis do concreto.

A força de protensão máxima aplicada para a seção meio do vão no ato de protensão deve contemplar as seguintes situações:

$$N_{po,n} \leq \left\{ \begin{array}{l} \text{para borda superior com tração máxima:} \\ \frac{M_{go} + \bar{\sigma}_{s,ATO} \cdot W_s}{\gamma_{pi} [e_{p,ATO-VAO} - (W_s / A_c)]} \\ \\ \text{para borda inferior com compressão máxima:} \\ \frac{M_{go} - \bar{\sigma}_{i,ATO} \cdot W_i}{\gamma_{pi} [e_{p,ATO-VAO} + (W_i / A_c)]} \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 28})$$

onde: $e_{p,ATO-VAO}$: excentricidade de protensão para seção meio do vão no ATO

Devido ao momento fletor M_{go} ser nulo na seção do apoio no ato de protensão em lajes bi-apoiadas, a força de protensão máxima nesta situação deve contemplar:

$$N_{po,n} \leq \begin{cases} \text{para borda superior com tração máxima:} \\ \frac{\bar{\sigma}_{s,ATO} \cdot W_s}{\gamma_{pi} [e_{p,ATO-APO} - (W_s / A_c)]} \\ \\ \text{para borda inferior com compressão máxima:} \\ \frac{-\bar{\sigma}_{i,ATO} \cdot W_i}{\gamma_{pi} [e_{p,ATO-APO} + (W_i / A_c)]} \end{cases} \quad (\text{Eq. 29})$$

onde: $e_{p,ATO-APO}$: excentricidade de protensão para seção do apoio no ATO

Para o Estado Limite de Serviço (ELS) com carregamento máximo na seção meio do vão, a força de protensão necessária deve contemplar as seguintes situações:

$$N_{po,n} \geq \begin{cases} \text{para borda superior com compressão máxima:} \\ \frac{M + \bar{\sigma}_{s,CR} \cdot W_s}{\gamma_p [e_{p,CR-VAO} - (W_s / A_c)]} \\ \\ \text{para borda inferior com tração máxima:} \\ \frac{M - \bar{\sigma}_{i,CR} \cdot W_i}{\gamma_p [e_{p,CR-VAO} + (W_i / A_c)]} \end{cases} \quad (\text{Eq. 30})$$

onde: $e_{p,CR-VAO}$: excentricidade de protensão para seção meio do vão na CR

Para verificar a resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-moldadas sem armadura passiva, será demonstrado o modelo teórico proposto pela NBR 6118 (2007) e apresentado por Ferreira et al. (2007). Esta análise consiste em comparar o valor da força cortante V devido ao carregamento máximo, com a força cortante resistente característica V_{rk} , dada por:

$$V \leq V_{rk} = \frac{\tau_{wu} \cdot b_w \cdot d}{\gamma_f} \quad (\text{Eq. 31})$$

onde: b_w : largura da alma

d : altura útil

γ_f : coeficiente de ponderação das ações

τ_{wu} : tensão de cisalhamento última

Para o caso de lajes alveolares, b_w é obtido pela somatória das espessuras de paredes entre os alvéolos. A altura útil d é determinada pela altura total da laje h_{laje} na seção composta, subtraída pela distância entre o eixo da armadura em relação à face inferior d'_i . A tensão de cisalhamento última τ_{wu} é obtida pela seguinte equação:

$$\tau_{wu} = \tau_{rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_p) + 0,15 \cdot \sigma_{CG} \quad (\text{Eq. 32})$$

onde: k : coeficiente

ρ_p : taxa geométrica de armadura de protensão

σ_{CG} : tensão de compressão no centro geométrico da peça

τ_{rd} : tensão de cisalhamento resistente de cálculo

Para a situação em que há pelo menos 50% da armadura inferior no apoio, é utilizada para coeficiente k a seguinte relação, para d expresso em metros:

$$k = |1,6 - d| \geq 1,0 \quad (\text{Eq. 33})$$

A relação da taxa geométrica de armadura de protensão ρ_p é obtida por:

$$\rho_p = \frac{A_{s,p}}{d \cdot (b_w + n_a \cdot \varnothing_a)} \quad (\text{Eq. 34})$$

onde: $A_{s,p}$: área da seção transversal de armadura de protensão

n_a : quantidade de alvéolos preenchidos

\varnothing_a : diâmetro do alvéolo

A tensão de compressão no CG da peça (σ_{CG}) é obtida pela seguinte relação, onde o efeito favorável da força N_p é considerado com redução de 10%:

$$\sigma_{CG} = \frac{0,9 \cdot N_p}{A_c + 0,4 \cdot A_{c,a}} \quad (\text{Eq. 35})$$

onde: $A_{c,a}$: área da seção transversal de concreto devido ao preenchimento de alvéolos

A partir da observação dos resultados experimentais de Ferreira et al. (2007), no escritório de projetos estruturais é admitido que o preenchimento dos alvéolos na

obra não é totalmente eficiente, sendo arbitrada eficiência de 40% sobre a área hipotética de alvéolos preenchidos, razão pela qual comparece na Eq. 35 o termo 0,4 como multiplicador de $A_{c,a}$.

A tensão de cisalhamento resistente de cálculo τ_{rd} é determinada por:

$$\tau_{rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} \quad (\text{Eq. 36})$$

onde: f_{ctd} : resistência de cálculo à tração direta do concreto

A resistência de cálculo à tração direta do concreto f_{ctd} é obtida por:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (\text{Eq. 37})$$

onde: γ_c : coeficiente de ponderação da resistência do concreto

$f_{ctk,inf}$: resistência característica inferior do concreto à tração direta

A resistência característica inferior do concreto à tração direta $f_{ctk,inf}$ determinada pela Eq. 38, correspondente ao valor de 70% da resistência característica do concreto à tração direta f_{ctk} , definida na Eq. 27.

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctk} \quad (\text{Eq. 38})$$

Para agilizar o pré-dimensionamento de lajes alveolares, foi construída uma planilha eletrônica em formato Excel baseada nos conceitos e equações aqui apresentadas.

Nesta planilha é realizada a entrada de dados das seguintes características: geometria da seção transversal, vão teórico, esforços solicitantes, classe do concreto pré-moldado, armadura ativa e perdas de protensão.

Com esta planilha é possível analisar: as tensões admissíveis do concreto, considerando o cabo resultante de protensão, os módulos resistentes necessários para o carregamento máximo, a força de protensão inicial necessária, as tensões normais no apoio e no meio do vão, bem como a resistência à força cortante da laje pretendida.

A Figura 45 ilustra uma parte da planilha para o pré-dimensionamento de laje alveolar, para a seguinte situação: vão teórico de nove metros, carregamento acidental de 5,0 kN/m², quatro cordoalhas CP-150 RN de Ø 5 mm na face superior e doze

cordoalhas na face inferior de CP-190 RB de \varnothing 9,5 mm. Para a mesma situação, é apresentada na Figura 46 a verificação da resistência à força cortante.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
39	Cabo resultante										
40	Seção:	Simples/Apoio			Composta/Meio do vão						
41	Npo =	888			1048 kN						
42	Npe =	843			995 kN						
43		Np =			911 kN						
44											
45	ep =	5,9			9,0 cm						
46											
47											
48	Módulos resistentes necessários para o carregamento máximo										
49	Ws >	3.613 cm ³			OK		314%				
50	Wi >	5.640 cm ³			OK		181%				
51											
52											
53	Verificação da força de protensão inicial										
54											
55	Seção do apoio no ato da protensão										
56	borda superior com tração máxima										
57		Npo <			1.664 kN		OK		53%		
58	borda inferior com compressão máxima										
59		Npo <			959 kN		OK		93%		
60											
61	Seção meio do vão no ato da protensão										
62	borda superior com tração máxima										
63		Npo <			4.877 kN		OK		21%		
64	borda inferior com compressão máxima										
65		Npo <			1.312 kN		OK		80%		

Figura 45 – Tela parcial da planilha para pré-dimensionamento

Como observado na Figura 45, a planilha eletrônica informa se a verificação é válida, identificada por OK. É apresentada também a porcentagem do valor existente em relação ao necessário, desta forma identificando numericamente a relação entre os valores necessários e adotados.

Por exemplo, na Figura 45 o módulo resistente inferior W_i é satisfatório para a condição de carregamento máximo, sendo que o valor obtido com a peça pré-moldada é 181% do módulo resistente inferior necessário $W_{i,n}$. Se esta condição não fosse satisfatória, seria necessário alterar a classe do concreto ou a geometria da peça considerada. Esta alternativa é satisfatória, devido à verificação dos módulos resistentes dependerem da inércia da peça e das tensões resistentes do concreto, como já apresentado pela Eq. 21.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4		largura Σ bw =		31,3 cm						
5		largura de 1 alvéolo =		14,1 cm						
6		nro. alv. preenchidos=		0						
7		eficiência preench. =		40%						
8		altura útil =		22,5 cm						
9		Área da seção =		2.086 cm ²						
10		Área c/ preench. =		2.086 cm ²						
11		k =		1,375		(As1 > 50% As)				
12										
13		Armadura protendida								
14		Nsd =		694 kN						
15		As1 =		5,55 cm ²						
16		ρ 1 =		0,79%						
17		σ cp =		3,33 MPa						
18										
19		Concreto		C35						
20		γ c =		1,3						
21		τ rd =		0,43 MPa						
22										
23		Força cortante resistente								
24		τ wu1 =		1,40 MPa						
25		γ f =		1,4						
26		Vrk =		70,41 kN						
27		Vrd =		98,57 kN						
28										
29		Força cortante solicitante								
30		Vsk =		58,62 kN		83%	OK			
31		Vsd =		82,07 kN						

Figura 46 – Tela parcial da planilha para verificação do cisalhamento

A força cortante resistente é determinada pela planilha eletrônica, como pode ser observado no exemplo apresentado na Figura 46, onde não há preenchimento de alvéolos. Pode se notar que V_{rd} é satisfatório, pois a força cortante solicitante corresponde a 83% da máxima permitida. Se estes valores não fossem aceitáveis, seria necessário realizar o preenchimento de alvéolos, ou aumentar a força de protensão, ou aumentar a resistência do concreto.

5.3. Exemplo numérico

Para a apresentação deste exemplo numérico foi adotada para estudo a laje alveolar LP20 da indústria de pré-fabricados Premoldados Protendit Ltda. A Figura 47 apresenta o corte genérico da laje pré-moldada LP20 aqui estudada.

A laje alveolar LP20 apresenta as seguintes características principais: altura da peça pré-moldada de 20 cm, largura típica de 125 cm, seis alvéolos de \varnothing 14,1 cm, quatro possíveis posições na face superior para cordoalhas CP-150 RN de \varnothing 5 mm e dezessete na face inferior para cordoalhas CP-190 RB de \varnothing 9,5 mm.

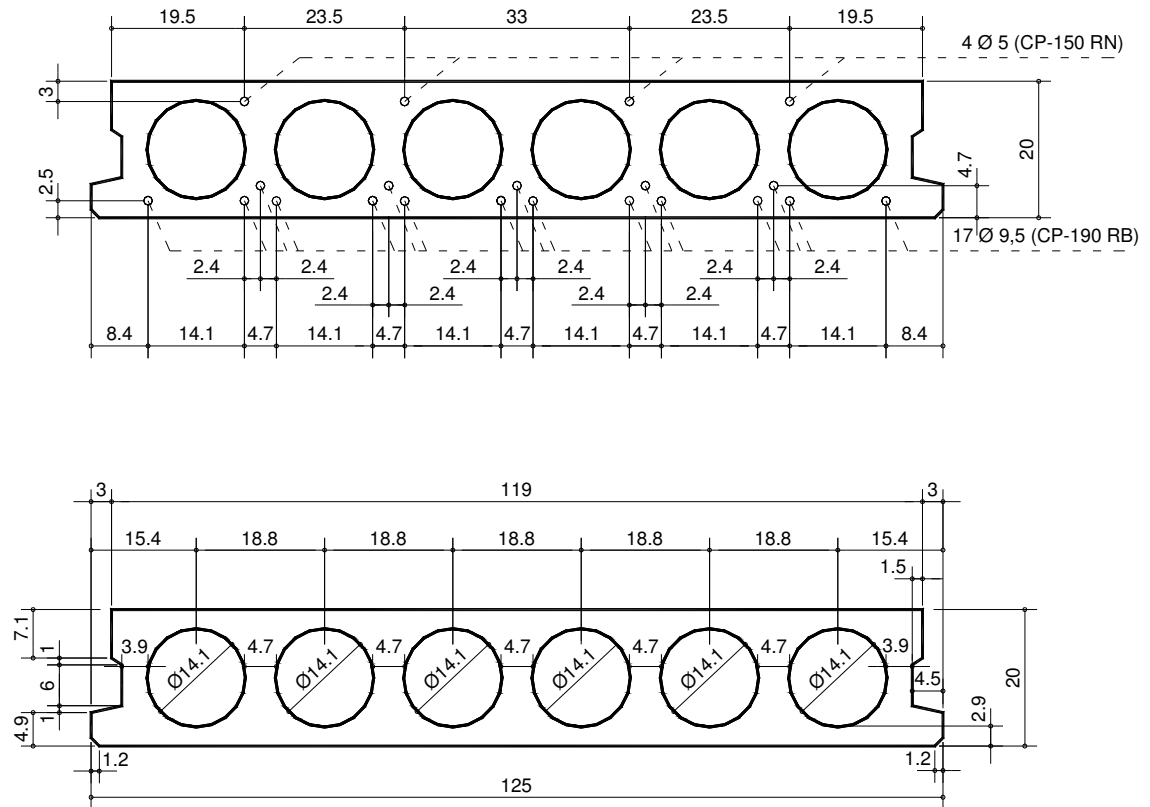


Figura 47 – Corte genérico de laje alveolar LP20

Com a utilização do software ProUni versão 2.0 da TQS Informática Ltda. foi possível determinar as seguintes características geométricas da laje alveolar: distância da fibra inferior em relação ao CG y_i , área da seção transversal bruta de concreto A_c , momento de inércia da seção bruta de concreto I_c , módulo resistente superior W_s e módulo resistente inferior W_i .

Para determinar tais características geométricas, foi necessário realizar a entrada de dados no software ProUni com as coordenadas dos pontos de contorno da peça pré-moldada, bem como da seção moldada no local. Essas coordenadas devem ser inseridas pelo usuário apenas para meia seção transversal, pois o software considera a peça simétrica. A Figura 48 ilustra a tela do software ProUni para a entrada de dados da geometria da laje alveolar, incluindo a capa moldada no local.

Após realizar a entrada de dados da geometria da seção transversal no software, foi possível visualizar os resultados da seção ideal da peça adotada. A seção ideal da peça é resultado da homogeneização da seção bruta de concreto da peça, acrescida de armadura ativa e passiva.

Para determinar as características geométricas da seção transversal da LP20, foi realizada a entrada de dados no software com ausência total de armadura, tanto

ativa como passiva. A Figura 49 apresenta uma tela de resultados do software com as principais informações geométricas da peça.

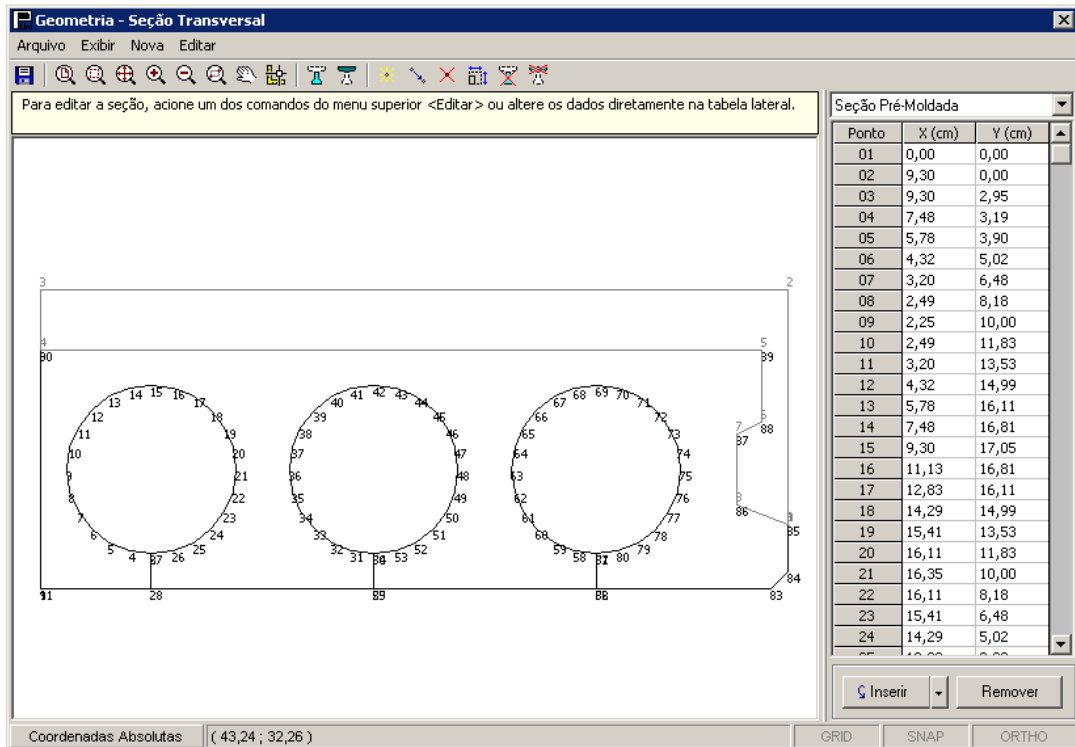


Figura 48 – Tela do ProUni para entrada de dados da seção transversal

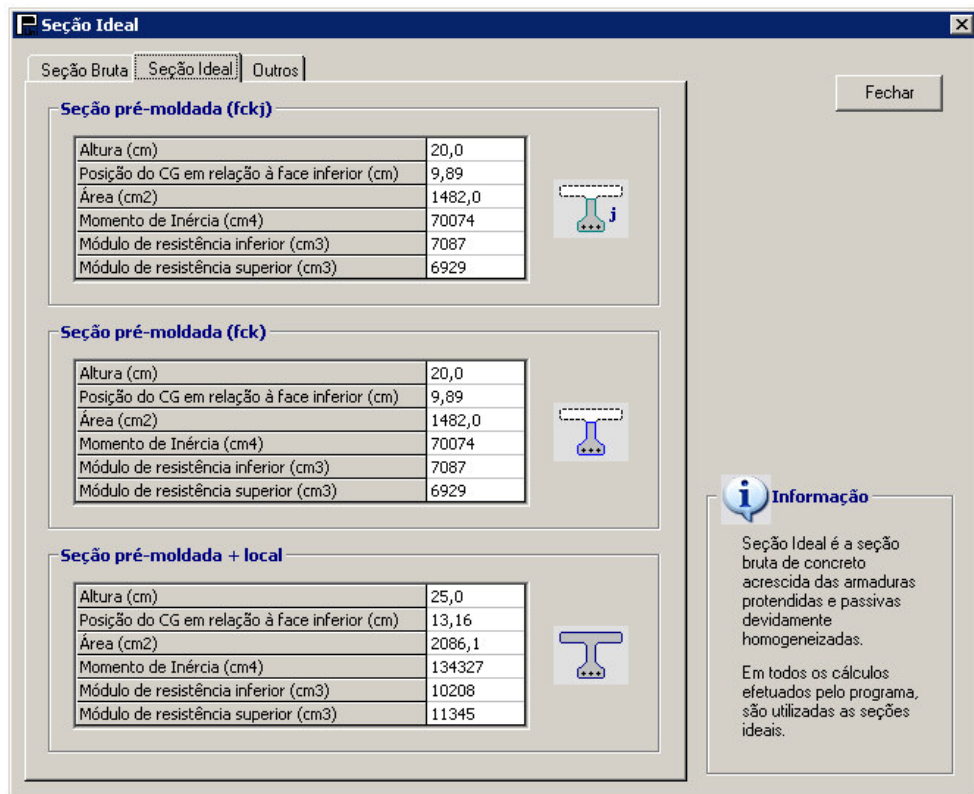


Figura 49 – Características geométricas apresentadas na tela do ProUni

Desta forma foram determinadas as características geométricas da laje alveolar para a seção pré-moldada, bem como para a seção composta. A seção da peça pré-moldada representa a seção inicial; já a seção composta é formada pela seção inicial mais a capa moldada no local com espessura de cinco centímetros.

Para a situação inicial de seção simples, as características geométricas foram: $h_{\text{laje}} = 20 \text{ cm}$, $y_i = 9,89 \text{ cm}$, $A_c = 1.482 \text{ cm}^2$, $I_c = 70.074 \text{ cm}^4$, $W_s = 6.929 \text{ cm}^3$ e $W_i = 7.087 \text{ cm}^3$. Para a situação de seção composta os resultados foram: $h_{\text{laje}} = 25 \text{ cm}$, $y_i = 13,16 \text{ cm}$, $A_c = 2.086 \text{ cm}^2$, $I_c = 134.327 \text{ cm}^4$, $W_s = 11.345 \text{ cm}^3$ e $W_i = 10.208 \text{ cm}^3$.

Para este exemplo numérico de laje alveolar protendida, foi adotado o vão teórico l de 9,50 m e adotadas os seguintes carregamentos por metro quadrado de laje:

- carregamento permanente constituído pelo peso próprio da peça pré-moldada: $g_0 = 2,96 \text{ kN/m}^2$;
- carregamento permanente constituído pelo peso próprio da capa de concreto de cinco centímetros e do chaveteamento da peça pré-moldada: $g_1 = 1,33 \text{ kN/m}^2$;
- carregamento permanente constituído pelo peso próprio de pavimentação e revestimento: $g_2 = 1,00 \text{ kN/m}^2$;
- carregamento acidental: $q = 6,00 \text{ kN/m}^2$.

Para efeito do estudo neste exemplo numérico, tanto na planilha eletrônica quanto no software ProUni, o carregamento aplicado por área foi linearizado para a largura padrão de laje de $b = 1,25 \text{ m}$.

Considerando a laje simplesmente apoiada apenas nas extremidades do vão teórico, a determinação do momento fletor devido ao peso próprio M_{g_0} é:

$$M_{g_0} = \frac{g_0 \cdot b \cdot l^2}{8} \quad (\text{Eq. 39})$$

De modo análogo foram determinados M_{g_1} , M_{g_2} e M_q . Assim, a laje alveolar em estudo estará sujeita aos seguintes momentos fletores:

- $M_{g_0} = 41,74 \text{ kN.m}$;
- $M_{g_1} = 18,76 \text{ kN.m}$;
- $M_{g_2} = 14,10 \text{ kN.m}$;
- $M_q = 84,61 \text{ kN.m}$.

O momento fletor máximo M para a situação de combinação rara (CR) é obtido pela Eq. 18 resultando em:

$$M = 41,74 + 18,76 + 14,10 + 84,61 = 159,21 \text{ kN.m} \quad (\text{Eq. 40})$$

Para este estudo, foi considerado que a peça pré-moldada é produzida com concreto de classe C35. Conforme as Eq. 22 a Eq. 25, a determinação das tensões admissíveis para o concreto de classe C35 permite escrever:

$$\bar{\sigma}_{s,ATO} = 1,2 \times 0,3 \times (0,6 \times 35)^{2/3} = 2,7 \text{ MPa} = 0,27 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 41})$$

$$- \bar{\sigma}_{i,ATO} = 0,7 \times 0,6 \times 35 = 14,7 \text{ MPa} = 1,47 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 42})$$

$$- \bar{\sigma}_{s,CR} = 0,7 \times 35 = 24,5 \text{ MPa} = 2,45 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 43})$$

$$\bar{\sigma}_{i,CR} = 1,2 \times 0,3 \times 35^{2/3} = 3,9 \text{ MPa} = 0,29 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 44})$$

Admitindo perdas imediatas de 5,0% e perdas progressivas de 8,5%, a determinação dos módulos resistentes necessários foi realizada com a Eq. 20 e a Eq. 21, resultando em:

$$W_{s,n} = \frac{(159,21 - 0,915 \times 41,74) \times 100}{0,915 \times 0,27 - (-2,45)} = 4.487 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 45})$$

$$W_{i,n} = \frac{(159,21 - 0,915 \times 41,74) \times 100}{0,39 - 0,915 \times (-1,47)} = 6.975 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 46})$$

Conhecidos os módulos resistentes, W_i e W_s , determinados pelo software ProUni, foi possível comparar as relações entre os módulos resistentes da laje alveolar com os módulos resistentes necessários para a situação de CR:

$$W_s = 11.345 \text{ cm}^3 > W_{s,n} = 4.487 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 47})$$

$$W_i = 10.208 \text{ cm}^3 > W_{i,n} = 6.975 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 48})$$

A verificação da Eq. 47 e da Eq. 48 quando atendidas, significam que a laje alveolar adotada não ultrapassará os valores admissíveis de tensões para a seção meio do vão nas situações de ATO e de CR, caso a seção transversal não varie.

O arranjo de cordoalhas adotado para o exemplo numérico em estudo é apresentado na Figura 50. Foram adotadas na face superior quatro cordoalhas CP-150 RN de \varnothing 5mm e na face inferior quinze cordoalhas CP-190 RB de \varnothing 9,5mm, sendo quatro dessas isoladas nas extremidades. Foram admitidas forças de protensão sem perdas N_{po} de 22,05 kN para uma cordoalha de \varnothing 5mm e N_{po} de 79,95 kN para uma cordoalha de \varnothing 9,5mm.

Considerando o efeito de perdas de protensão, foram determinadas com a Eq. 6 e a Eq. 7 as forças de protensão devido às perdas imediatas N_{pi} na situação de ATO e as forças de protensão com as perdas imediatas e progressivas N_p na situação de CR.

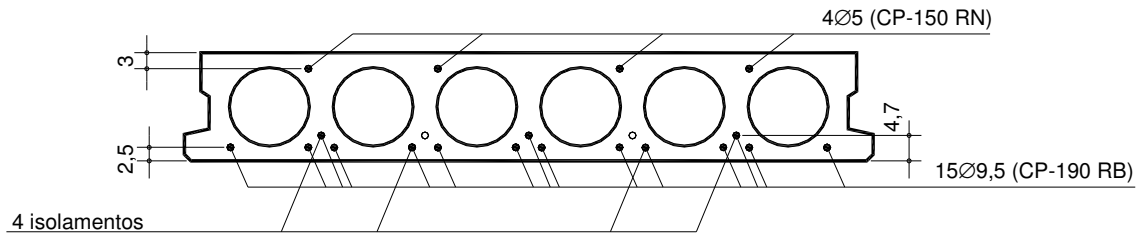


Figura 50 – Arranjo adotado de cordoalhas

A Eq. 49 e a Eq. 50 determinam a força de protensão com perda imediata para as camadas superior e inferior com as cordoalhas adotadas de $\varnothing 5,0$ mm e de $\varnothing 9,5$ mm para a seção do meio do vão. Devido ao isolamento das extremidades de quatro cordoalhas de $\varnothing 9,5$ mm, para a seção do apoio a força de protensão com perda imediata é determinada pela Eq. 51. A Eq. 52 e a Eq. 53 indicam as forças de protensão com as perdas progressivas para a camada superior e inferior na seção meio do vão.

$$N_{pi,s-VAO} = 4 \times 22,05 \times 0,950 = 84 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 49})$$

$$N_{pi,i-VAO} = 15 \times 79,95 \times 0,950 = 1140 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 50})$$

$$N_{pi,i-APO} = 11 \times 79,95 \times 0,950 = 836 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 51})$$

$$N_{p,s-VAO} = 4 \times 22,05 \times 0,950 \times 0,915 = 77 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 52})$$

$$N_{p,i-VAO} = 15 \times 79,95 \times 0,950 \times 0,915 = 1043 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 53})$$

Da Figura 50 pode se observar que a distância entre o eixo da armadura superior em relação à face superior d'_s da peça pré-moldada é de 3,0 cm. A armadura inferior é composta por doze cordoalhas na posição de 2,5 cm e três cordoalhas na posição de 4,7 cm para a seção meio do vão.

Para a seção do apoio a camada inferior é composta por dez cordoalhas na posição 2,5 cm e uma cordoalha na posição 4,7 cm. Sendo assim, a distância entre o eixo da armadura inferior em relação à face inferior d'_i é determinada para a seção meio do vão pela Eq. 54 e para a seção do apoio pela Eq. 55.

$$d'_{i-VAO} = \frac{12 \times 2,5 + 3 \times 4,7}{12 + 3} = 2,9 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 54})$$

$$d'_{i-APO} = \frac{10 \times 2,5 + 1 \times 4,7}{10 + 1} = 2,7 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 55})$$

A distância da fibra inferior em relação ao CG y_i , foi calculada pelo software ProUni para duas situações: inicial de seção simples com $y_i = 9,89$ cm e final de seção composta com $y_i = 13,16$ cm. Cabe destacar que a espessura da peça pré-moldada é $h_{laje} = 20$ cm e $h_{laje} = 25$ cm para a laje com capa moldada no local.

A Figura 51 representa a situação no ato de protensão para a seção do apoio com as excentricidades dos cabos de protensão determinadas por:

$$e_{p,s} = y_i - (h_{laje} - d'_s) = 9,9 - (20,0 - 3,0) = -7,1 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 56})$$

$$e_{p,i} = y_i - d'_{i-APO} = 9,9 - 2,7 = 7,2 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 57})$$

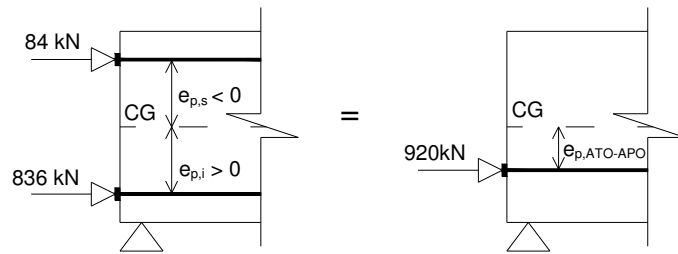


Figura 51 – Excentricidade dos cabos no ATO para seção do apoio

Para a seção meio do vão na situação do ato de protensão, a excentricidade da camada inferior é determinada por:

$$e_{p,i} = y_i - d'_{i-VAO} = 9,9 - 2,9 = 7,0 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 58})$$

A situação de combinação rara de ações é representada pela Figura 52 onde as excentricidades dos cabos são:

$$e_{p,s} = y_i - (h_{laje} - d'_i) = 13,2 - (20,0 - 3,0) = -3,8 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 59})$$

$$e_{p,i} = y_i - d'_{i-VAO} = 13,2 - 2,9 = 10,3 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 60})$$

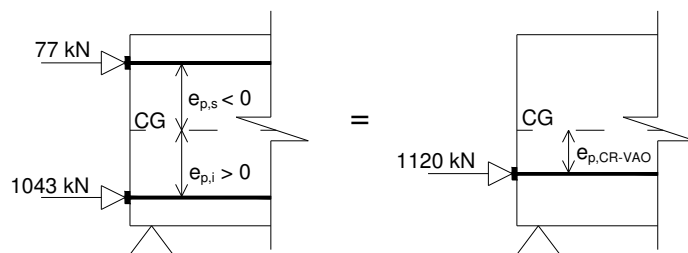


Figura 52 – Excentricidade dos cabos na CR para seção meio do vão

Pode se observar que na Eq. 59 foi utilizado o valor h_{laje} da peça pré-moldada e não da laje com capa, pois a posição da armadura superior de protensão não muda e, no caso deste exemplo, está sempre posicionada a 17 cm da face inferior da peça.

Sendo assim, foram determinadas as excentricidades dos cabos resultantes para três situações: seção do apoio no ATO, seção meio do vão no ATO e seção meio do vão na CR, com auxílio da Eq. 11.

$$e_{p,ATO-APO} = \frac{836 \times 7,2 + [84 \times (-7,1)]}{836 + 84} = 5,9 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 61})$$

$$e_{p,ATO-VAO} = \frac{1140 \times 7,0 + [84 \times (-7,1)]}{1140 + 84} = 6,0 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 62})$$

$$e_{p,CR-VAO} = \frac{1043 \times 10,3 + [77 \times (-3,8)]}{1043 + 77} = 9,3 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 63})$$

A área da seção transversal bruta de concreto A_c foi determinada pelo software ProUni para as duas seções em estudo: seção inicial simples e seção final composta, sendo, respectivamente 1.482 cm^2 e 2.086 cm^2 , para as situações supracitadas.

A força de protensão necessária $N_{po,n}$, foi avaliada em três situações: seção do apoio no ATO, seção meio do vão no ATO e seção meio do vão na CR. Quando aplicada no ATO, esta força deve atender às condições impostas pela Eq. 28 para seção meio do vão e pela Eq. 29 para seção do apoio, resultando em:

$$N_{po,n} \leq \begin{cases} \text{para borda superior com tração máxima:} \\ \frac{(41,74 \times 100) + (0,27 \times 6929)}{0,950 [6,0 - (6929 / 1482)]} = 4.804 \text{ kN} \\ \\ \text{para borda inferior com compressão máxima:} \\ \frac{(41,74 \times 100) - (-1,47 \times 7087)}{0,950 [6,0 + (7087 / 1482)]} = 1.425 \text{ kN} \end{cases} \quad (\text{Eq. 64})$$

$$N_{po,n} \leq \begin{cases} \text{para borda superior com tração máxima:} \\ \frac{(0 \times 100) + 0,27 \times 6929}{0,950 [5,9 - (6929 / 1482)]} = 1.608 \text{ kN} \\ \\ \text{para borda inferior com compressão máxima:} \\ \frac{(0 \times 100) - (-1,47 \times 7087)}{0,950 [5,9 + (7087 / 1482)]} = 1.026 \text{ kN} \end{cases} \quad (\text{Eq. 65})$$

Para a situação de carregamento máximo na seção meio do vão, a Eq. 30 impõe as seguintes condições para a força de protensão necessária:

$$N_{po,n} \geq \begin{cases} \text{para borda superior com compressão máxima:} \\ \frac{(159,21 \times 100) + (-2,45 \times 11345)}{0,869 [9,3 - (11345 / 2086)]} = -3.539 \text{ kN} \\ \\ \text{para borda inferior com tração máxima:} \\ \frac{(159,21 \times 100) - (0,39 \times 10208)}{0,869 [9,3 + (10208 / 2086)]} = 968 \text{ kN} \end{cases} \quad (\text{Eq. 66})$$

Com os resultados obtidos, para as condições de borda inferior na seção meio do vão, a força $N_{po,n}$ deve estar no intervalo entre 968 e 1.425 kN. A condição é satisfatória, pois foi adotado $N_{po} = 1.288$ kN.

Após a verificação da força de protensão necessária, foram determinadas as tensões na fibra superior e inferior, para as condições de ATO no apoio e no meio do vão e de CR no meio do vão, tal como apresentado a seguir, a partir das Eq. 12 a Eq. 15:

$$\sigma_{s,ATO-APO} = -\frac{920}{1.482} + \frac{920 \times 5,9 - (0 \times 100)}{6.629} = -0,20 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 67})$$

$$\sigma_{i,ATO-APO} = -\frac{920}{1.482} - \frac{920 \times 5,9 - (0 \times 100)}{7.087} = -1,39 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 68})$$

$$\sigma_{s,ATO-VAO} = -\frac{1.224}{1.482} + \frac{1.224 \times 6,0 - (41,74 \times 100)}{6.629} = -0,37 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 69})$$

$$\sigma_{i,ATO-VAO} = -\frac{1.224}{1.482} - \frac{1.224 \times 6,0 - (41,74 \times 100)}{7.087} = -1,27 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 70})$$

$$\sigma_{s,CR-VAO} = -\frac{1.120}{2.086} + \frac{1.120 \times 9,3 - (159,21 \times 100)}{11.345} = -1,02 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 71})$$

$$\sigma_{i,CR-VAO} = -\frac{1.120}{2.086} - \frac{1.120 \times 9,3 - (159,21 \times 100)}{10.208} = +0,01 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 72})$$

Admitindo a laje simplesmente apoiada apenas nas extremidades do vão teórico e momento fletor máximo de 159,21 kN.m obtido pela Eq. 40, a determinação da força cortante máxima V é dada por:

$$V = \frac{4 \cdot M}{l} = 67 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 73})$$

Para verificar se a laje alveolar protendida resiste à força cortante de 67 kN obtida na Eq. 73, é necessário determinar a força cortante resistente característica V_{rk} . Tal força resistente é obtida com a Eq. 31 onde comparecem: a tensão de cisalhamento última τ_{wu} , a somatória da largura das almas $b_w = 31,3$ cm e a altura útil d da seção composta. Esta altura útil é determinada por:

$$d = h_{lajje} - d'_{i-ATO} = 25,0 - 2,7 = 22,3 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 74})$$

A tensão de cisalhamento última τ_{wu} é obtida com a Eq. 32 pelo produto de k , ρ_p , σ_{CG} e τ_{rd} , onde o coeficiente k é determinado pela Eq. 33 resultando em:

$$k = |1,6 - (22,3 / 100)| = 1,38 \quad (\text{Eq. 75})$$

Admitido $A_s = 0,555$ cm² para uma cordoalha de $\varnothing 9,5$ mm e ausência de preenchimento de alvéolos, através da Eq. 34 a taxa geométrica de armadura de protensão ρ_p para a seção do apoio é obtida por:

$$\rho_p = \frac{11 \times 0,555}{22,3 \times (31,3 + 0)} = 0,88\% \quad (\text{Eq. 76})$$

A tensão de compressão no centro geométrico da peça σ_{CG} para a seção do apoio é obtida com a Eq. 35 e resulta em:

$$\sigma_{CG} = \frac{0,9 \times 842}{2.086 + 0} = 0,36 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 77})$$

Admitindo coeficiente de ponderação da resistência do concreto $\gamma_c = 1,3$, a tensão de cisalhamento resistente de cálculo τ_{rd} foi determinada pela combinação das equações Eq. 27, Eq. 36, Eq. 37 e Eq. 38 resultando em:

$$\tau_{rd} = \frac{0,25 \times 0,70 \times 0,30 \times 35^{2/3}}{1,3 \times 10} = 0,04 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 78})$$

Assim, com a Eq. 32 a tensão de cisalhamento última foi determinada como sendo:

$$\tau_{wu} = 0,04 \times 1,38 \times (1,2 + 40 \times 0,88\%) + 0,15 \times 0,36 = 0,14 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Eq. 79})$$

Conhecidos τ_{wu} , b_w e d , com a Eq. 31 é possível determinar a força cortante resistente característica V_{rk} . Admitindo o coeficiente de ponderação das ações $\gamma_f = 1,4$ resulta V_{rk} como sendo:

$$V_{rk} = \frac{0,14 \times 31,3 \times 22,3}{1,4} = 70 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 80})$$

Comparando a força cortante máxima $V = 67$ kN obtida pela Eq. 73 com a força cortante resistente característica $V_{rk} = 70$ kN dada pela Eq. 80, conclui-se que a laje alveolar estudada suporta o carregamento máximo. Se esta condição não fosse atendida, seria necessário realizar o preenchimento de alvéolos e/ou alterar a classe do concreto.

6. RESULTADOS

6.1. Ábaco

Para determinar, de maneira simples e rápida, qual o tipo de laje alveolar mais adequada para um determinado vão, sob ação de um determinado carregamento, é útil uma ferramenta de consulta tal como um ábaco. Este apresenta de forma gráfica resultados previamente calculados, facilitando assim a escolha do tipo mais adequado de laje alveolar. Como um dos resultados deste trabalho, foi proposta a elaboração de um ábaco com estas características.

Para que o usuário do ábaco possa realizar a consulta de forma mais precisa, para a confecção deste ábaco foram adotados quatro tipos de lajes alveolares LP20 da indústria de pré-fabricados Premoldados Protendit Ltda. com as seguintes características gerais: concreto pré-moldado classe C35, capa de cinco centímetros de altura de concreto moldado no local classe C20, quatro fios de \varnothing 5 mm na face superior, tipo CP-150 RN com força de protensão sem perdas N_{po} de 88 kN e tela Q159 ($a_s = 1,59 \text{ cm}^2/\text{m}$) de aço CA-60 utilizada na região da capa estrutural.

As lajes alveolares estudadas foram separadas em quatro séries: 6-0, 9-0, 12-2, 15-4. Estas séries apresentam variação: na armadura de protensão (CP-190 RB) na face inferior; na quantidade necessária de cordoalhas com isolamento; e no tipo de concreto pré-moldado (CPM) e moldado no local (CML). Estas características específicas estão apresentadas na Tabela 1.

As séries são nomeadas por dois números de modo genérico. O primeiro número representa a quantidade de cordoalhas de \varnothing 9,5 mm na face inferior e o segundo representa a quantidade de cordoalhas isoladas nas extremidades.

A necessidade de isolamento de cordoalhas nas extremidades na peça pré-moldada ocorre devido à limitação das tensões de tração do concreto, principalmente críticas na face superior da peça na região do apoio. Com o isolamento da cordoalha, não há aderência entre a cordoalha e o concreto e desta forma não são transmitidas as tensões desta cordoalha isolada para o concreto.

Tabela 1 – Características das séries de lajes estudadas

Série	Armadura inferior		Quant. Ø Isoladas	CPM	CML
	Quant. Ø 9,5 mm	Np ₀ (kN)		f _{ck} (MPa)	f _{ck} (MPa)
6-0	6	480	0	35	20
9-0	9	720	0	35	20
12-2 (1)	12	960	2	35	20
15-4 (2)	15	1200	4	35 / 40	25

Obs. (1): necessidade de isolar duas cordoalhas nas extremidades da peça.

Obs. (2): necessidade de isolar quatro cordoalhas nas extremidades da peça, utilizar C40 na produção da peça pré-moldada e C25 na capa estrutural.

Neste estudo, a utilização de concreto de classe C40 foi necessária devido à limitação de tensões de compressão no concreto, principalmente críticas no ato de protensão na fibra inferior da seção do apoio. A utilização de concreto C25 na capa estrutural foi necessária devido à série 15-4 com concreto C20, a partir de um determinado vão, não apresentar escoamento do aço no Estado Limite Último (ELU), estando assim no Domínio 4. A utilização de concreto C25 na capa permite atender ao dimensionamento no domínio 3 no ELU.

A laje alveolar LP20 da Premoldados Protendit Ltda. tem disponível 17 posições para cordoalhas de Ø 9,5 mm na face inferior, porém neste estudo o número máximo de cordoalhas utilizado foi limitado a 15. Para atingir um número maior de cordoalhas na face inferior, seria necessário utilizar um concreto de melhor resistência que os adotados, ou utilizar maior força de protensão na fibra superior. O número de cordoalhas na face inferior está limitado principalmente à tensão de compressão na fibra inferior. A Figura 53 apresenta os arranjos de fios e de cordoalhas de protensão adotados neste estudo.

O ábaco deste trabalho foi construindo com auxílio de uma planilha em formato Excel, desenvolvida em escritório de projetos estruturais, para o pré-dimensionamento de vigas e lajes pré-moldadas protendidas. Em paralelo com a utilização da planilha, as lajes foram estudadas no software comercial ProUni versão 2.0 desenvolvido pela empresa TQS Informática Ltda.

No software, bem como na planilha eletrônica, foi realizada a entrada de dados dos seguintes itens: perfil geométrico transversal, tipo de concreto, tipo e quantidade de armadura ativa, carregamentos e vão teórico. Diferentemente do software, na planilha não foram informadas a armadura passiva e a presença da capa estrutural, esta última considerada com a seção homogeneizada final.

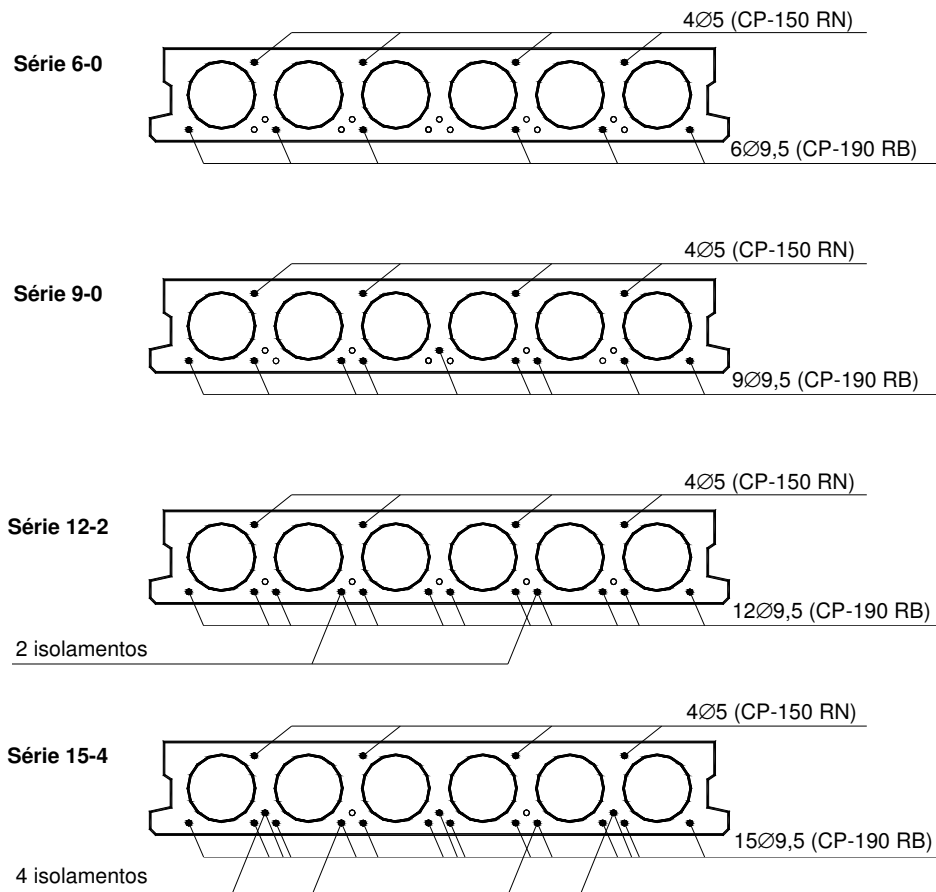


Figura 53 – Arranjos de cordoalhas adotados

Com a utilização da planilha foi possível pré-dimensionar as lajes alveolares, obtendo rapidamente resultados preliminares, como os seguintes: módulos resistentes necessários, W_s e W_i , para o carregamento máximo; força de protensão atuante e necessária; tensões de tração e de compressão nas fibras superior e inferior para as situações críticas, no ato de protensão, no apoio e no meio do vão e para a situação de carregamento máximo no meio do vão.

O software ProUni foi útil para o refinamento de resultados, obtendo assim, valores mais precisos que os determinados pela planilha eletrônica. A planilha calcula os valores de tensões para os casos de carregamento máximo e no ato de protensão, no apoio e no meio do vão. Já o software determina os resultados de tensões para oito

situações de etapas de carregamento pré-definidas pelo usuário, em décimos de vão ou qualquer outra disposição ao longo do vão. A Figura 54 ilustra a tela do software ProUni para a verificação de tensões com o carregamento máximo, para a série 9-0, com vão teórico de 7,5 m, sob ação acidental de 5,0 kN/m².

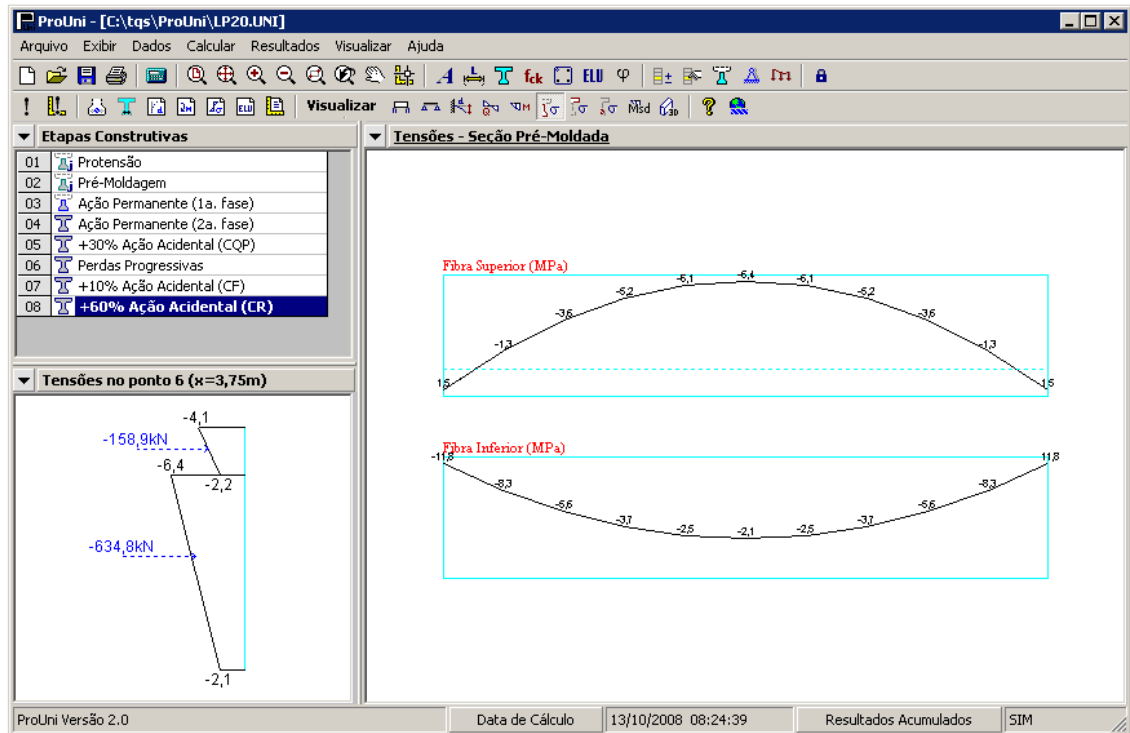


Figura 54 – Verificação de tensões com o software ProUni

Como pode se observar na Figura 54 foram admitidas oito etapas construtivas com o software. Na etapa de Pré-Moldagem, a seção resistente é formada apenas pela parte pré-moldada e com resistência do concreto f_{cj} , sujeita à ação somente de peso próprio. A ação permanente g_1 é inserida na etapa de Ação Permanente (1a. fase), com seção resistente da peça pré-moldada e com resistência f_{ck} . A etapa de Ação Permanente (2a. fase) é formada pela seção resistente final composta da peça pré-moldada e da capa moldada no local, sob ação de g_2 . Para as demais etapas, são consideradas como seções resistentes a seção composta da etapa de Ação Permanente (2a. fase).

A ação acidental é dividida em três parcelas para compor três combinações: combinação quase permanente de ações (CQP), combinação freqüente de ações (CF) e combinação rara de ações (CR). A etapa CQP é sujeita a ação de 30% do carregamento acidental considerado além de todas as ações permanentes. Para a etapa CF é adicionado apenas 10% da ação acidental. Na CR é adicionado o 60% restante do carregamento acidental. O software ainda considera a etapa de perdas progressivas de protensão, situado logo após a etapa CQP.

Para este estudo de lajes alveolares foram adotadas as mesmas ações permanentes por metro quadrado de laje apresentadas no exemplo numérico do item 5.3, onde:

- $g_0 = 2,96 \text{ kN/m}^2$;
- $g_1 = 1,33 \text{ kN/m}^2$;
- $g_2 = 1,00 \text{ kN/m}^2$.

Para a construção do ábaco, foi admitida a ação acidental q como variável, em intervalos de $2,5 \text{ kN/m}^2$. No caso, esta ação foi estudada entre $2,5$ a $25,0 \text{ kN/m}^2$.

Estabelecidos os quatro arranjos de protensão inferior, a quantidade de isolamentos necessários, o tipo de concreto a utilizar e os carregamentos acima indicados, foram impostas quatro condições de verificações, bem como sua limitação, para obter o máximo vão possível. Pretendeu-se com este estudo identificar qual é a condição de maior limitação para a laje alveolar pré-moldada.

A primeira condição imposta para obter o vão máximo foi a condição de momento fletor máximo. Nesta condição, em todos os casos, a limitação foi o momento fletor resistente característico M_{rk} obtido a partir do Estado Limite Último (ELU). A Tabela 2 apresenta o vão máximo determinado para cada série e cada carregamento acidental para a condição de máximo momento fletor no meio do vão.

Tabela 2 – Vão máximo (m) para a condição de momento fletor

Acidental (kN/m^2)	Série			
	6-0	9-0	12-2	15-4
2,5	7,69	9,11	10,36	11,42
5,0	6,69	7,93	9,02	9,94
7,5	6,00	7,12	8,09	8,92
10,0	5,49	6,51	7,40	8,15
12,5	5,09	6,04	6,86	7,56
15,0	4,76	5,65	6,42	7,08
17,5	4,49	5,33	6,06	6,68
20,0	4,27	5,06	5,75	6,34
22,5	4,07	4,83	5,49	6,05
25,0	3,90	4,62	5,25	5,79

Como apresentado anteriormente na Tabela 1, a série 15-4 apresenta duas classes de concreto, C35 e C40. O concreto de classe C35 foi utilizado na peça pré-moldada para o carregamento acidental de 2,5 kN/m² a 12,5 kN/m². A partir da ação acidental de 15,0 kN/m² foi utilizado concreto de classe C40.

A presença de isolamentos nas extremidades da peça foi necessária somente para as tensões de tração e de compressão no apoio, não interferindo assim, nas tensões de compressão no meio do vão, no ato de protensão.

Para a série 12-2 foram necessários dois isolamentos de 50 cm em cada extremidade. A série 15-4 necessitou de quatro isolamentos nas extremidades. Com a utilização de concreto C35 esta série necessitou de diferentes comprimentos de isolamento, variando de 80 cm para o carregamento acidental de 2,5 kN/m² a 240 cm para a carga acidental de 12,5 kN/m². Com a utilização de concreto C40 a série 15-4 necessitou de isolamento constante de 100 cm.

A segunda tabela de vão máximo, Tabela 3, foi construída com a condição de força cortante máxima, limitada à força cortante resistente característica V_{rk} em conformidade com a Eq. 31 do item 5.2.

Tabela 3 – Vão máximo (m) para a condição de força cortante

Acidental (kN/m ²)	Série			
	6-0	9-0	12-2	15-4
2,5	11,92	13,94	14,61	15,28
5,0	9,03	10,55	11,06	11,57
7,5	7,26	8,49	8,90	9,31
10,0	6,07	7,10	7,44	7,79
12,5	5,22	6,10	6,40	6,69
15,0	4,58	5,35	5,61	6,21
17,5	4,07	4,76	4,99	5,53
20,0	3,67	4,29	4,50	4,98
22,5	3,34	3,91	4,09	4,53
25,0	3,06	3,58	3,76	4,16

Em seguida, o vão máximo foi estudado para a condição de tração máxima na fibra inferior da peça pré-moldada no meio do vão, para a situação de carregamento máximo. Neste estudo, o vão foi limitado pela tensão admissível de tração do concreto, na combinação rara de ações (CR), resultando nos valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Vão máximo (m) para a condição de tração no meio do vão na CR

Acidental (kN/m ²)	Série			
	6-0	9-0	12-2	15-4
2,5	8,69	9,95	11,18	12,06
5,0	7,73	8,83	9,92	10,71
7,5	7,03	8,03	9,01	9,73
10,0	6,49	7,41	8,31	8,98
12,5	6,05	6,91	7,75	8,38
15,0	5,70	6,50	7,29	7,87
17,5	5,40	6,16	6,90	7,50
20,0	5,14	5,86	6,57	7,14
22,5	4,92	5,61	6,29	6,83
25,0	4,72	5,38	6,03	6,55

A quarta e última condição de vão máximo analisada foi a de flecha máxima no meio do vão para a combinação quase permanente de ações (CQP). Esta análise foi realizada somente com auxílio do software ProUni, devido à limitação da planilha eletrônica para a avaliação de flechas.

O deslocamento máximo foi limitado a $l/300$, sendo este um valor intermediário ao proposto pela norma NBR 6118 (2007) da ABNT. Foi admitido o limite de $l/300$, em razão de não ocorrer a atuação total da carga acidental no mesmo instante, gerando assim um efeito de vibração menor que o proposto por norma.

O deslocamento final máximo é composto pela variação da flecha em duas situações: flecha no ato de protensão (a_{ATO}) e flecha na combinação quase permanente de ações (a_{CQP}). A flecha calculada pelo software na situação de CQP considera as perdas imediatas e progressivas de protensão.

A Figura 55 ilustra a apresentação do software ProUni para o deslocamento obtido na etapa de Pré-Moldagem, para a série 9-0 com $\ell = 7,50$ m e $q = 5,0\text{kN/m}^2$. Como pode se observar, esta etapa apresentou contra flecha de 1,47 cm para a seção meio do vão.

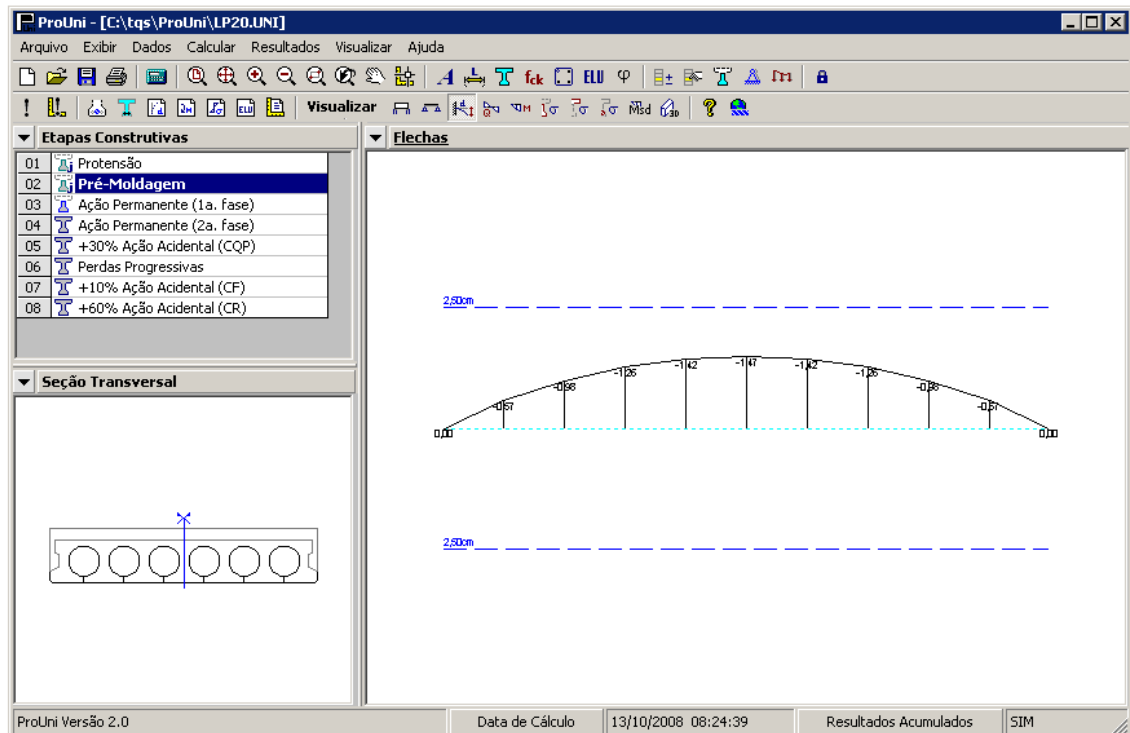


Figura 55 – Avaliação de flecha com o software ProUni

O vão máximo para a condição de flecha, Tabela 5, foi determinado por meio de tentativas, onde com o mesmo arranjo de cordoalhas e ações, o vão foi variado até se obter a flecha limite correspondente ao vão adotado. Foram realizadas tentativas sucessivas de obter o vão máximo para cada série com cada carregamento acidental.

Sendo assim, para todo vão máximo apresentado na Tabela 5, o deslocamento limite corresponde a $\ell/300$, para todas as situações. Como exemplo deste resultado, a série 6-0 com o carregamento acidental de $12,5\text{ kN/m}^2$ apresentou vão máximo de 9,60 m, assim o deslocamento máximo correspondeu a 3,2 cm.

São apresentados na Tabela 6 os resultados obtidos pelo deslocamento limite, para cada série com as flechas obtidas no ato de protensão (a_{ATO}) e na combinação quase permanente de ações (a_{CQP}), separadas em colunas individuais. Os deslocamentos com valores negativos são indicações de contra flecha e os deslocamentos positivos são valores de flecha.

Tabela 5 – Vão máximo (m) para a condição de flecha máxima

Acidental (kN/m ²)	Série			
	6-0	9-0	12-2	15-4
2,5	10,52	11,43	12,26	12,33
5,0	10,26	11,13	11,60	11,70
7,5	10,02	10,86	11,07	11,18
10,0	9,81	10,59	10,62	10,73
12,5	9,60	10,22	10,25	10,34
15,0	9,42	9,88	9,91	10,17
17,5	9,24	9,59	9,62	9,89
20,0	9,08	9,33	9,36	9,62
22,5	8,93	9,09	9,12	9,37
25,0	8,79	8,88	8,91	9,15

Tabela 6 – Flecha máxima (cm) no ATO e na CQP

Ação acidental (kN/m ²)	Série							
	6-0		9-0		12-2		15-4	
	a _{ATO}	a _{CQP}	a _{ATO}	a _{CQP}	a _{ATO}	a _{CQP}	a _{ATO}	a _{CQP}
2,5	1,25	3,50	0,68	3,80	-0,48	3,61	-1,71	2,39
5,0	1,01	3,41	0,39	3,70	-1,07	2,80	-2,11	1,79
7,5	0,82	3,33	0,16	3,61	-1,41	2,27	-2,26	1,47
10,0	0,66	3,27	-0,05	3,48	-1,63	1,90	-2,31	1,26
12,5	0,51	3,19	-0,29	3,12	-1,77	1,65	-2,34	1,10
15,0	0,40	3,14	-0,47	2,82	-1,85	1,45	-2,54	0,84
17,5	0,30	3,07	-0,60	2,59	-1,90	1,30	-2,51	0,79
20,0	0,21	3,02	-0,70	2,40	-1,93	1,19	-2,53	0,68
22,5	0,14	2,97	-0,78	2,24	-1,95	1,09	-2,50	0,62
25,0	0,08	2,93	-0,83	2,12	-1,95	1,02	-2,48	0,57

Os valores destacados nas colunas com fundo cinza escuro correspondem à situação de laje onde ocorre flecha, para o vão máximo determinado na situação no ato de protensão. Os demais valores correspondem à peça com contra flecha inicial, devido ao ato de protensão para o vão máximo determinado.

Era esperado sempre ocorrer contra flecha no ATO, porém como a série 6-0, necessitou de pouca força de protensão para grandes vãos, ocorreu que o efeito do peso próprio da peça foi superior ao efeito oposto da força de protensão aplicada, resultando em flecha na situação do ato de protensão. O mesmo ocorreu para a série 9-0 para ações acidentais menores que $7,5 \text{ kN/m}^2$. Como exemplo, para a série 6-0 com ação acidental de $12,5 \text{ kN/m}^2$, resultou em vão máximo de $9,60 \text{ m}$ e flecha de $0,51 \text{ cm}$ para a situação de ato de protensão.

Cabe ressaltar que o software ProUni apresenta os deslocamentos de modo acumulado, onde a flecha obtida na situação final, CQP, é o deslocamento máximo, se existir flecha no ATO. Porém, a flecha apresentada na CQP, não é o deslocamento máximo, se existir contra flecha no ATO. Assim, neste caso, devem ser somados os valores em módulo de deslocamentos no ATO e na CQP.

Para a série 6-0 com vão de $10,52 \text{ m}$ e ação acidental de $2,5 \text{ kN/m}^2$, é apresentada $a_{\text{CQP}} = 3,50 \text{ cm}$ e $a_{\text{ATO}} = 1,25 \text{ cm}$, desta forma o deslocamento máximo é a flecha apresentada na CQP, pois existe flecha no ATO. Isto ocorre devido aos valores obtidos na CQP já conterem os obtidos no ATO. Assim o valor obtido no CQP foi equivalente ao deslocamento limite $l/300$.

Na situação com $q = 17,5 \text{ kN/m}^2$ e $l = 9,62 \text{ m}$ para a série 12-2, o deslocamento máximo é composto pela somatória em módulo dos seguintes valores: $a_{\text{ATO}} = -1,90 \text{ cm}$ e $a_{\text{CQP}} = 1,30 \text{ cm}$. Devido à presença de contra flecha no ATO, o deslocamento máximo foi determinado pela variação destas duas situações. Assim o valor da flecha limite $l/300$ foi igual ao valor da somatória em módulo dos deslocamentos, resultando em $3,20 \text{ cm}$.

Definidos os vãos máximos para cada tipo de condição, estes foram organizados em gráficos para facilitar a identificação da condição limitante e, assim, verificar possíveis sobreposições de resultados. Os gráficos a seguir foram construídos no programa Excel, a partir das informações apresentadas nas tabelas anteriores de vão máximo.

A construção dos gráficos foi realizada mediante a utilização dos pontos apresentados nas tabelas de condição limite anteriores. Desta forma, foi possível determinar as curvas para cada série de arranjo de cordoalhas. Nos gráficos seguintes

não foram apresentados os pontos das curvas, de maneira a não dificultar a visualização dos gráficos.

Para os gráficos construídos, o vão máximo está presente no eixo das abscissas, onde este foi dividido em módulos de um metro, variando de três a doze metros. O eixo das ordenadas representa o carregamento acidental utilizando módulos de $2,5 \text{ kN/m}^2$ e variando entre $2,5$ a $25,0 \text{ kN/m}^2$.

A Figura 56 apresenta o gráfico de vão máximo para a condição de momento fletor no Estado Limite Último (ELU). Neste gráfico pode ser observado que as curvas de cada série estão dispostas de forma aproximadamente paralela umas às outras.

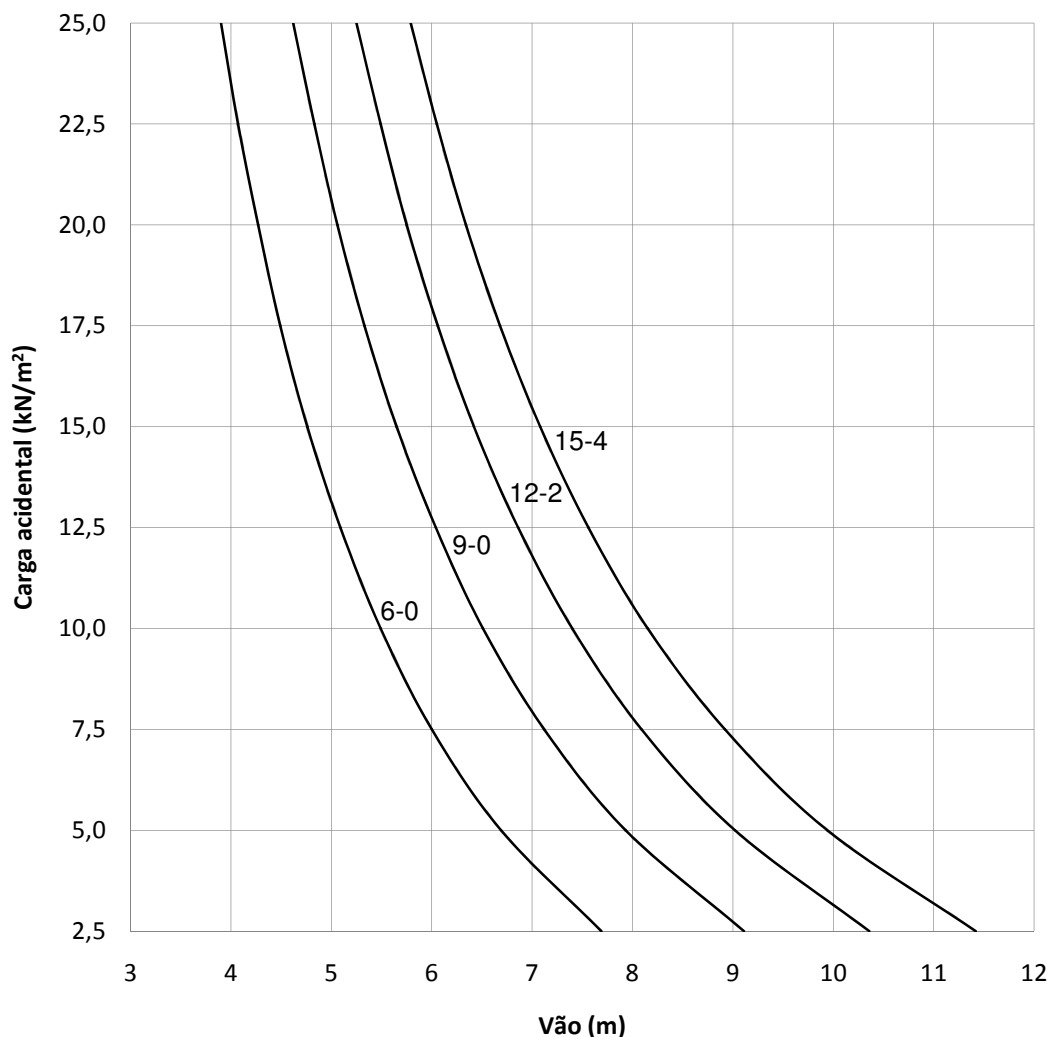


Figura 56 – Vão máximo para a condição de momento fletor

Para exemplo da condição limite de momento fletor, pode se observar que para carregamento acidental de $10,0 \text{ kN/m}^2$ é possível utilizar laje com vão máximo da ordem de 5,5 m para a série 6-0. Com o mesmo carregamento, a mesma laje pode ser

utilizada para vão máximo de um pouco mais de 8,1 m com o arranjo de protensão da série 15-4. É ainda possível atingir vãos maiores com este carregamento, desde que alterado o arranjo de protensão e aumentada a resistência do concreto.

As curvas apresentadas no gráfico de vão máximo para a condição de força cortante (Figura 57) apresentam também comportamento de modo aproximadamente paralelo umas às outras, porém há uma maior aproximação das curvas nas séries 9-0, 12-2 e 15-4, diferente assim, das curvas para a condição de momento fletor.

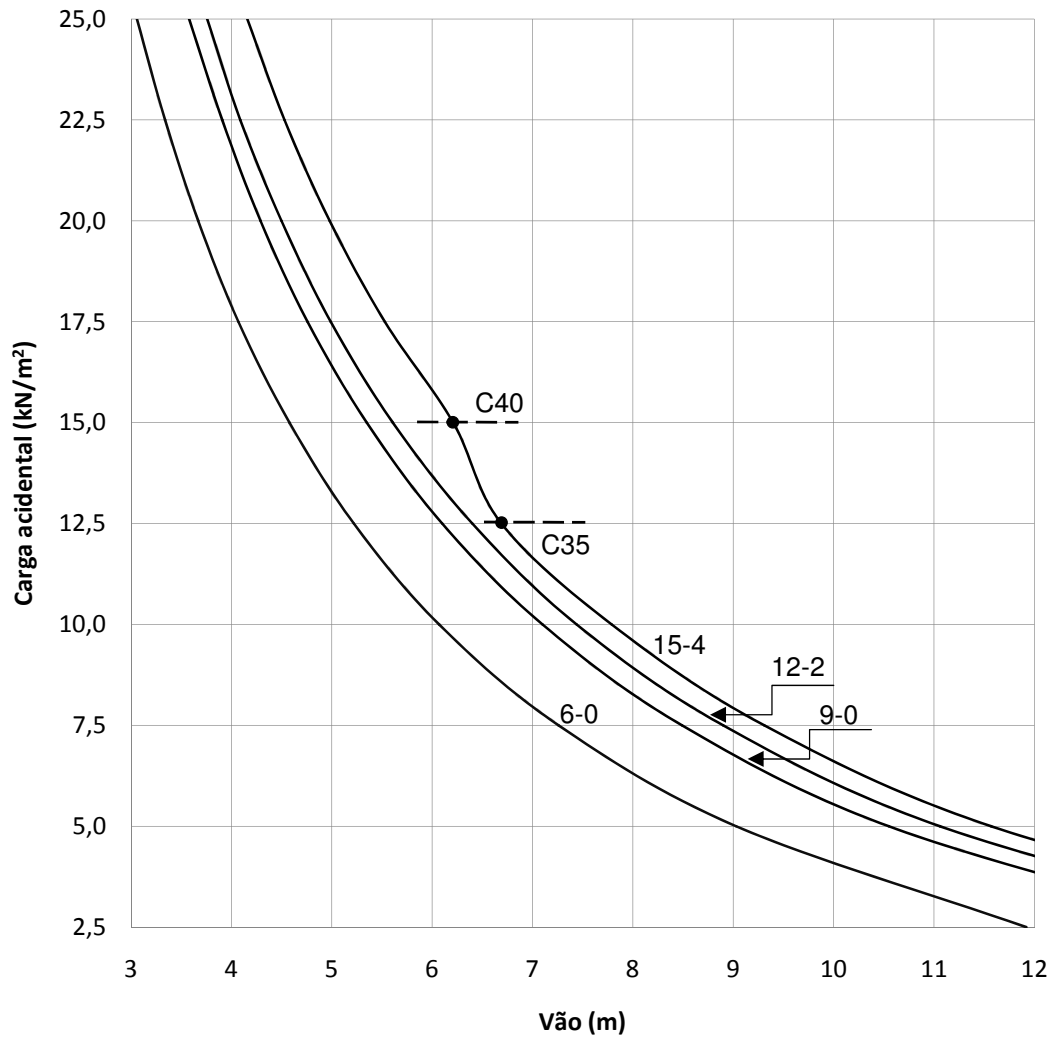


Figura 57 – Vão máximo para a condição de força cortante

Pode ser observada na Figura 57 a mudança significativa na trajetória da curva na série 15-4. Isto ocorreu devido à alteração da classe do concreto, de C35 para C40. Tal alteração é apresentada no intervalo de carregamento acidental de 12,5 para 15,0 kN/m² com o vão de 6,21 a 6,69 m. Este trecho de variação foi indicado por uma curva de aproximação, realizada pelo programa Excel.

Pode se notar pela linha tracejada horizontal, que a utilização de concreto de classe C35 foi possível até carregamento acidental de $12,5 \text{ kN/m}^2$. Para ações acidentais maiores que $15,0 \text{ kN/m}^2$ foi necessário utilizar concreto classe C40.

Com a Figura 57 é possível observar que o vão máximo está mais limitado do que o encontrado na condição de momento fletor, para a situação de pequenos vãos com cargas elevadas. Como exemplo, no caso da série 15-4 para ação acidental de $20,0 \text{ kN/m}^2$, a condição de força cortante máxima permite atingir vão na ordem de cinco metros. Na condição de momento fletor, esta mesma série, com o mesmo carregamento tem a capacidade de atingir vãos na ordem de 6,30 m.

A Figura 58 apresenta o gráfico de vão máximo para a condição de tração na fibra inferior da peça pré-moldada no meio do vão, para a combinação rara. Neste gráfico pode ser observado que as curvas das séries são semelhantes às apresentadas na Figura 56.

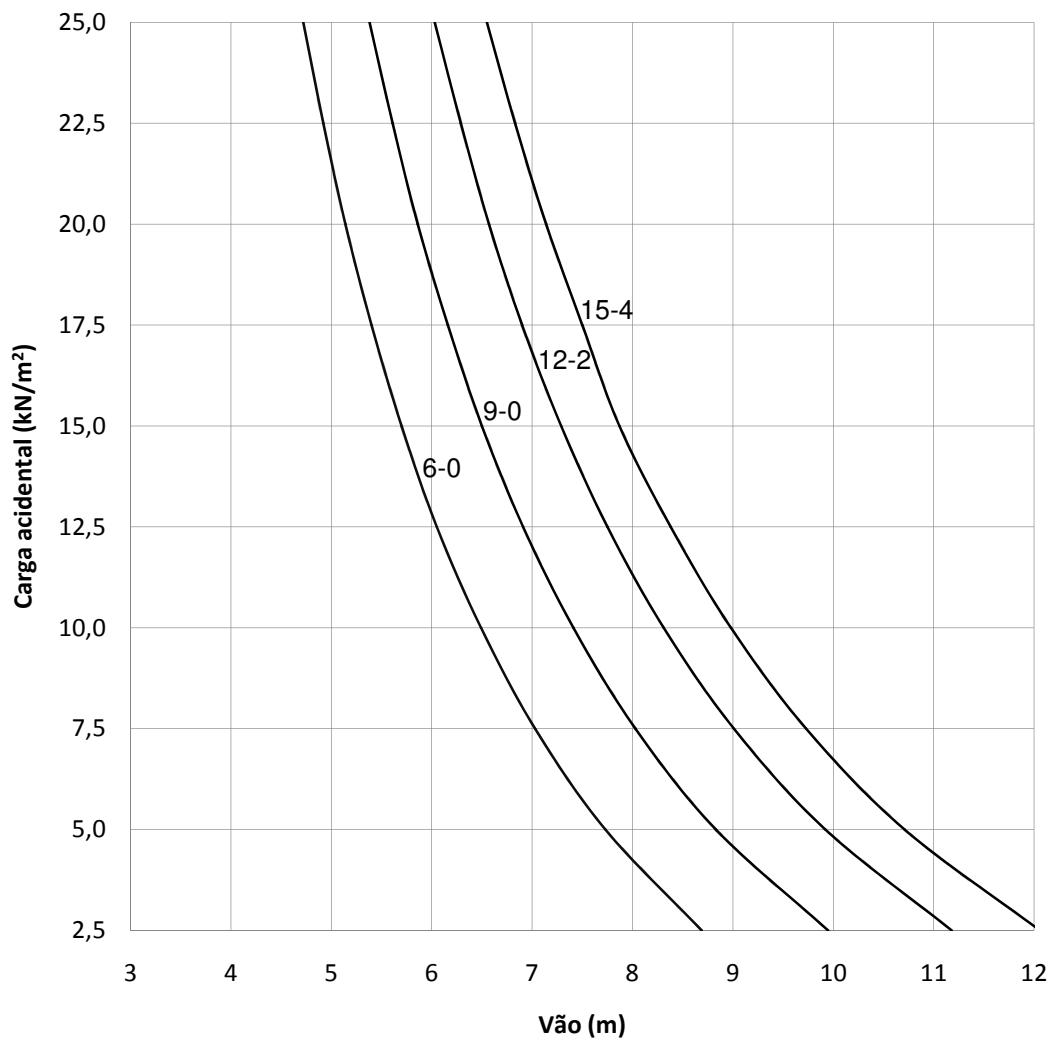


Figura 58 – Vão máximo para a condição de tração no meio do vão na CR

Porém, a condição de momento fletor apresenta uma limitação de vão máximo maior que a encontrada na condição de tração. Como exemplo, a série 12-2 para a condição de momento fletor atinge vão máximo de 10,36 m para $q = 2,5 \text{ kN/m}^2$; já para a condição de tração máxima no meio do vão, para a mesma ação accidental esta série alcança vão máximo de 11,18 m.

A Figura 59 apresenta o gráfico de vão máximo para a condição de flecha, na situação de CQP. Neste gráfico é observada a variação na curva da série 15-4, devido à alteração da classe do concreto, de modo equivalente ao gráfico para a condição de força cortante. Nesta figura e também na Figura 57, a partir da ação accidental de $15,0 \text{ kN/m}^2$ começou a ser utilizado concreto de classe C40, e para ações accidentais inferiores de $12,5 \text{ kN/m}^2$ foi utilizado concreto de classe C35.

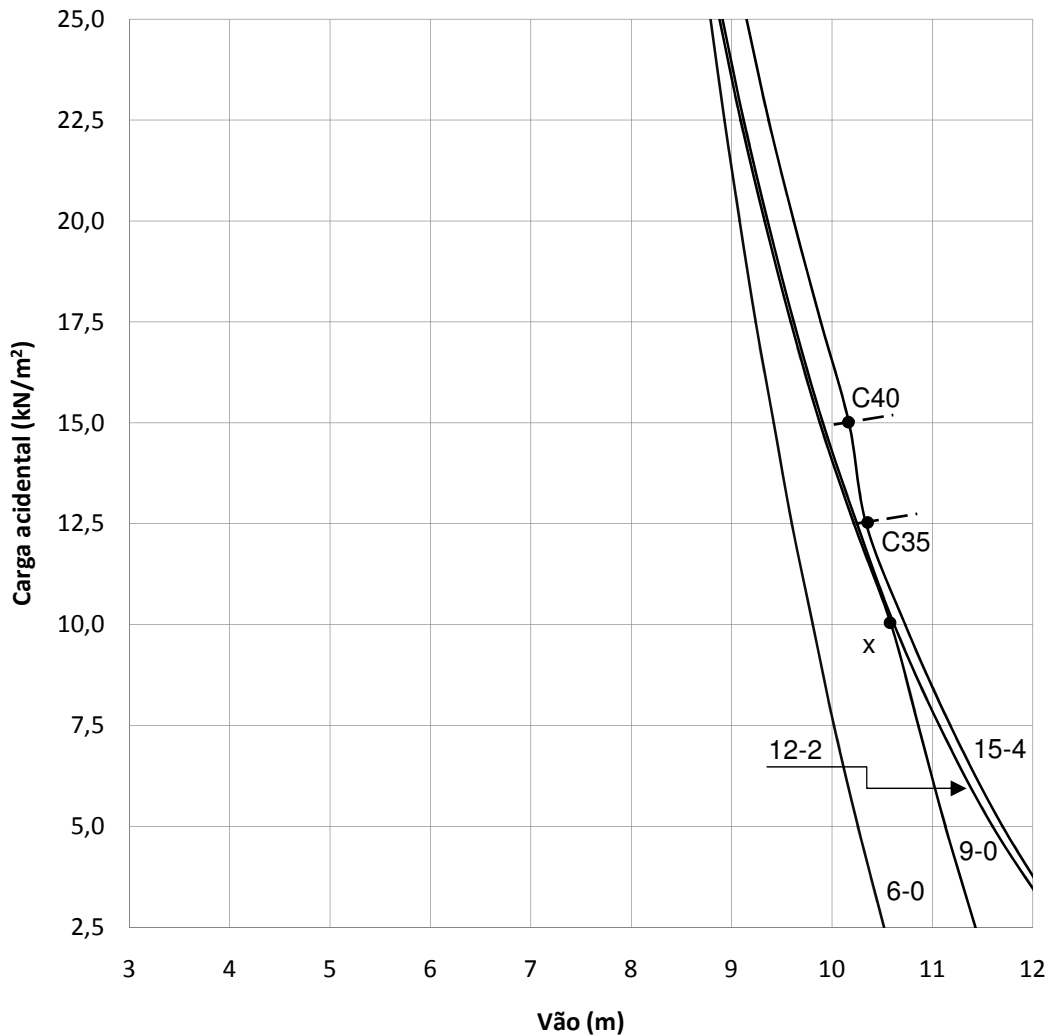


Figura 59 – Vão máximo para a condição de flecha na CQP

Desta forma pode ser notado que a variação na classe do concreto de C35 para C40 foi significativa somente para as condições de força cortante e de flecha. Tal variação não foi significativa para alterar a trajetória da curva nos gráficos para condição de momento fletor e de tensão de tração.

Como apresentado na Tabela 6, a série 6-0 apresenta no ato da protensão apenas deslocamentos de flecha. As séries 12-2 e 15-4 apresentam apenas deslocamentos de contra flecha para a situação no ato de protensão. Assim é explicado o comportamento da trajetória das curvas, similar para as séries 12-2 e 15-4.

Porém, a curva da série 9-0 apresenta os dois tipos de comportamento. Isto ocorre devido à série 9-0, na situação de ato de protensão, apresentar deslocamentos de flecha para vãos maiores que 10,86 m; e para vãos menores que 10,59 m, esta série apresentou deslocamento de contra flecha na situação de ATO.

Esta variação de comportamento é apresentada na Figura 59, pelo ponto demarcado como x. Este ponto, situado no carregamento acidental de 10 kN/m² e no vão de 10,59 m, determina o início de deslocamentos de contra flecha. Pela Tabela 6 é possível determinar seu valor inicial, ou seja, contra flecha de 0,05 cm.

Pode se notar que o vão máximo determinado pela condição de flecha representa a condição de menor limitação dentre as outras apresentadas anteriormente. Como exemplo, a série 15-4 na condição de tração na CR, atinge vão máximo na ordem de sete metros para ação acidental de 20,0 kN/m². Com este mesmo carregamento, a série 15-4 consegue vencer vão de aproximadamente até 9,50 m para a condição de flecha na CQP.

A partir da representação gráfica pode ser observado facilmente que as condições de maior restrição para a limitação do vão máximo são as condições de momento fletor e de força cortante, tornando assim, as condições de tensão de tração no meio do vão e de flecha, condições não limitantes para a criação do ábaco.

O ábaco apresentado na Figura 60 foi construído com a sobreposição dos gráficos de condição de momento fletor e de força cortante. Os gráficos anteriores foram sobrepostos com a utilização do software AutoCAD da empresa Autodesk, a partir da importação dos gráficos gerados pelo programa Excel. Com a sobreposição dos gráficos, foram identificados os pontos de cada série que determinam a condição limitante de vão.

Nas curvas de cada série do ábaco da Figura 60 estão marcados pontos que delimitam a condição crítica para a determinação do vão máximo de cada série para cada carregamento.

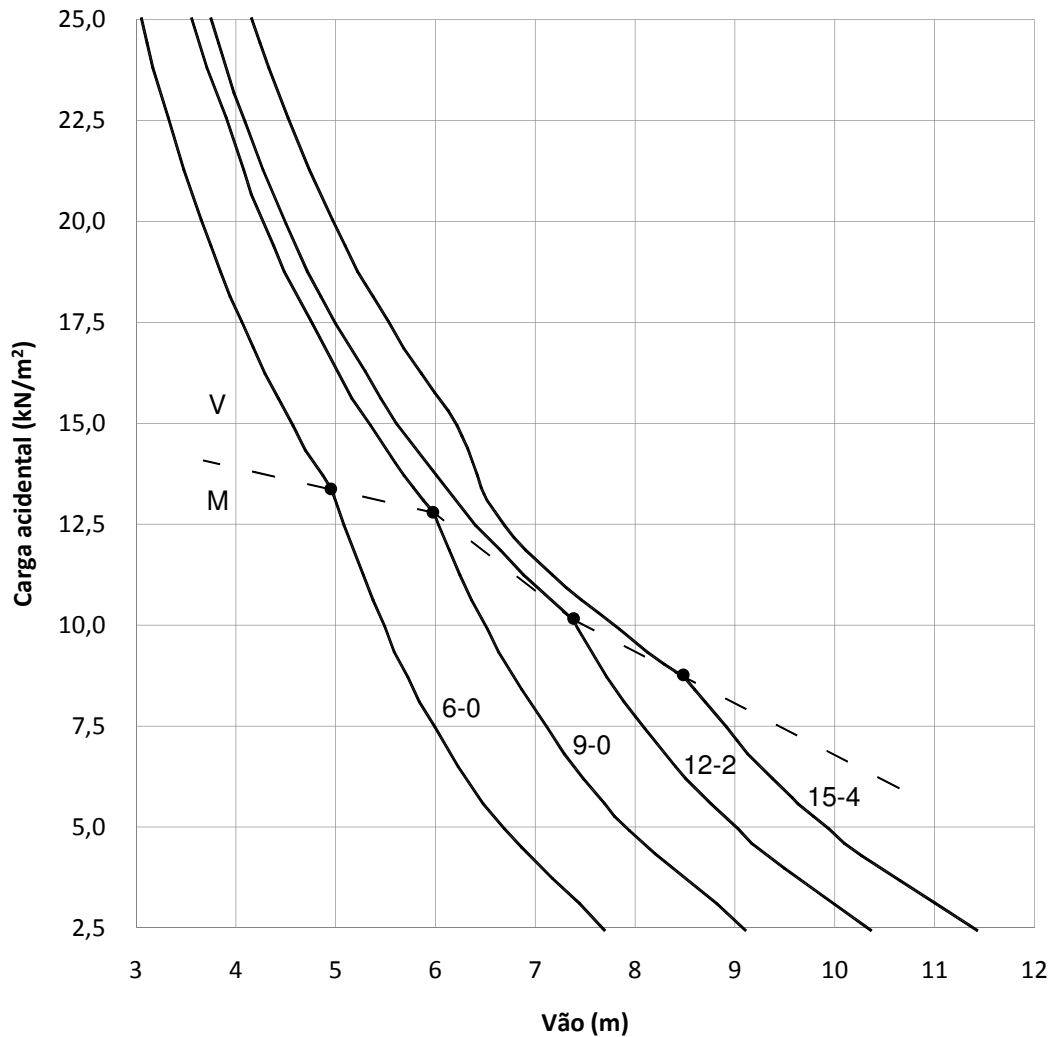


Figura 60 – Ábaco para laje alveolar LP20

Com a união dos pontos críticos foi determinada uma linha tracejada no ábaco, a qual informa o trecho da condição limitadora de vão, onde acima da linha tracejada os vãos são limitados pela condição de cortante máxima (V); e abaixo da linha tracejada, os vãos são limitados pela condição de momento fletor máximo (M).

Assim, como exemplo dos resultados obtidos, pode ser observado que, para a série 6-0, o efeito da força cortante até o vão de cerca de cinco metros determina o vão máximo permitido para ações superiores a cerca de 13,0 kN/m². Para ações menores do que este valor, o vão máximo é superior a cinco metros e fica limitado pela condição de momento fletor máximo.

Pode se observar na série 12-2, que esta atinge vão máximo de 5,61 m para ação accidental de 15,0 kN/m², sendo este vão limitado pela força cortante máxima. Porém, para esta série com esta mesma ação accidental, poderia ser atingido vão de

6,42 m, limitado pela condição de momento fletor, tal como pode ser observado na Figura 56.

Para utilizar este maior vão de 6,42 m é necessário vencer a condição limitante de força cortante. Para tanto, é necessário realizar o preenchimento de alvéolos e, se não for suficiente, será ainda necessário aumentar a resistência do concreto. Assim, a série 12-2 com a aplicação da ação acidental de $15,0 \text{ kN/m}^2$ pode ser limitada pelo momento fletor, uma vez que seja solucionada a limitação de força cortante.

Dessa forma, é possível ampliar a limitação da condição de força cortante apenas efetuando o preenchimento dos alvéolos e a utilização do ábaco poderia indicar vãos maiores para as situações com carregamentos mais elevados. Porém, esta condição de preenchimento de alvéolos não foi explorada neste estudo em razão de não ser o foco principal deste trabalho.

Com a observação do ábaco da Figura 60, é possível identificar que para as lajes alveolares LP20, com vãos grandes e com cargas médias para este tipo de peça, a condição limitante é o momento fletor. Já para casos de cargas elevadas e pequenos vãos, o fator limitante é a força cortante.

A partir do estudo deste ábaco foi possível verificar que, para o mesmo carregamento, pode se chegar a maiores vãos, apenas alterando o arranjo de protensão. Como exemplo, para o caso de carregamento acidental de $7,5 \text{ kN/m}^2$, com a série 6-0 é possível vencer vão de 6,0 m e alterando o arranjo para a série 15-4 é possível vencer vão de 8,92 m.

Com o ábaco da Figura 60 é possível identificar que, para o mesmo vão, pode se aplicar carregamentos mais elevados, apenas alterando o arranjo de protensão. Como exemplo, uma laje com vão de 7,0 m é capaz de suportar ações acidentais na ordem de $4,0 \text{ kN/m}^2$ com protensão da série 6-0; para este mesmo vão, alterando o arranjo de protensão para o da série 15-4, a mesma laje pode suportar ações acidentais de aproximadamente $11,0 \text{ kN/m}^2$.

6.2. Consumos e custos

Neste estudo foi realizada a comparação de três sistemas construtivos de lajes, a saber: laje alveolar protendida, laje nervurada com forma plástica e laje treliçada com EPS (poliestireno expandido). Para estes três sistemas construtivos foram determinados índices de consumo de modo a quantificar materiais e custos de cada sistema adotado.

Para elaboração deste estudo comparativo foi admitido um pavimento de piso típico comercial, com ação acidental de $5,0 \text{ kN/m}^2$ e ação permanente de $1,0 \text{ kN/m}^2$ correspondente à carga de pavimentação e revestimentos. Para todos os sistemas construtivos adotados, a estrutura deste pavimento foi constituída por quatro pilares de seção $25 \times 25 \text{ cm}^2$ com $7,50 \text{ m}$ de distância de eixo a eixo e $3,50 \text{ m}$ de distância de piso a piso.

Para o sistema construtivo de lajes alveolares, estas foram consideradas unidirecionais apoiadas nas extremidades do vão teórico de $7,50 \text{ m}$. Deste modo, as vigas que recebem o maior carregamento possuem dimensão de $25 \times 70 \text{ cm}^2$ e as vigas de fechamento possuem seção de $25 \times 50 \text{ cm}^2$. Para os sistemas bidirecionais de lajes nervuradas e de lajes treliçadas, todas as vigas foram adotadas com dimensão de $25 \times 60 \text{ cm}^2$.

De modo a padronizar os resultados, foi adotado que as vigas e os pilares são moldados no local, sendo pré-moldadas apenas as peças componentes das lajes. Para o sistema de lajes alveolares, a peça pré-moldada corresponde à pré-laje alveolar, já para o sistema de lajes treliçadas esta peça pré-moldada corresponde à pré-laje treliçada.

Para este estudo comparativo foi adotada a laje alveolar LP20 da Premoldados Protendit Ltda. com características da série 9-0 apresentada na Figura 53 do item 6.1. A partir da análise do ábaco apresentado na Figura 60 foi possível determinar que a série 9-0 satisfaz a condição de vão de $7,5 \text{ m}$ com ação acidental de $5,0 \text{ kN/m}^2$.

A planta de forma do pavimento de piso de laje alveolar é ilustrada na Figura 61. Esta apresenta a distância de 750 cm nos eixos horizontais e verticais, bem como cotas da largura padrão de laje alveolar de 125 cm e dimensões dos pilares e das vigas para este sistema considerado.

A laje nervurada deste estudo foi projetada com formas plásticas tipo Atex 800 da empresa Atex Brasil Ltda. com capa estrutural de 5 cm . A forma plástica tipo Atex 800 possui intoreixo de 80 cm , espessura de 30 cm e altura total de 35 cm . A Figura 62 mostra a planta de forma da laje nervurada indicando a espessura média da alma e das formas plásticas, bem como a distância do intoreixo.

O corte transversal da forma da laje nervurada é apresentado na Figura 63, assim como a identificação dos elementos de cimbramento e montagem das formas plásticas Atex 800.

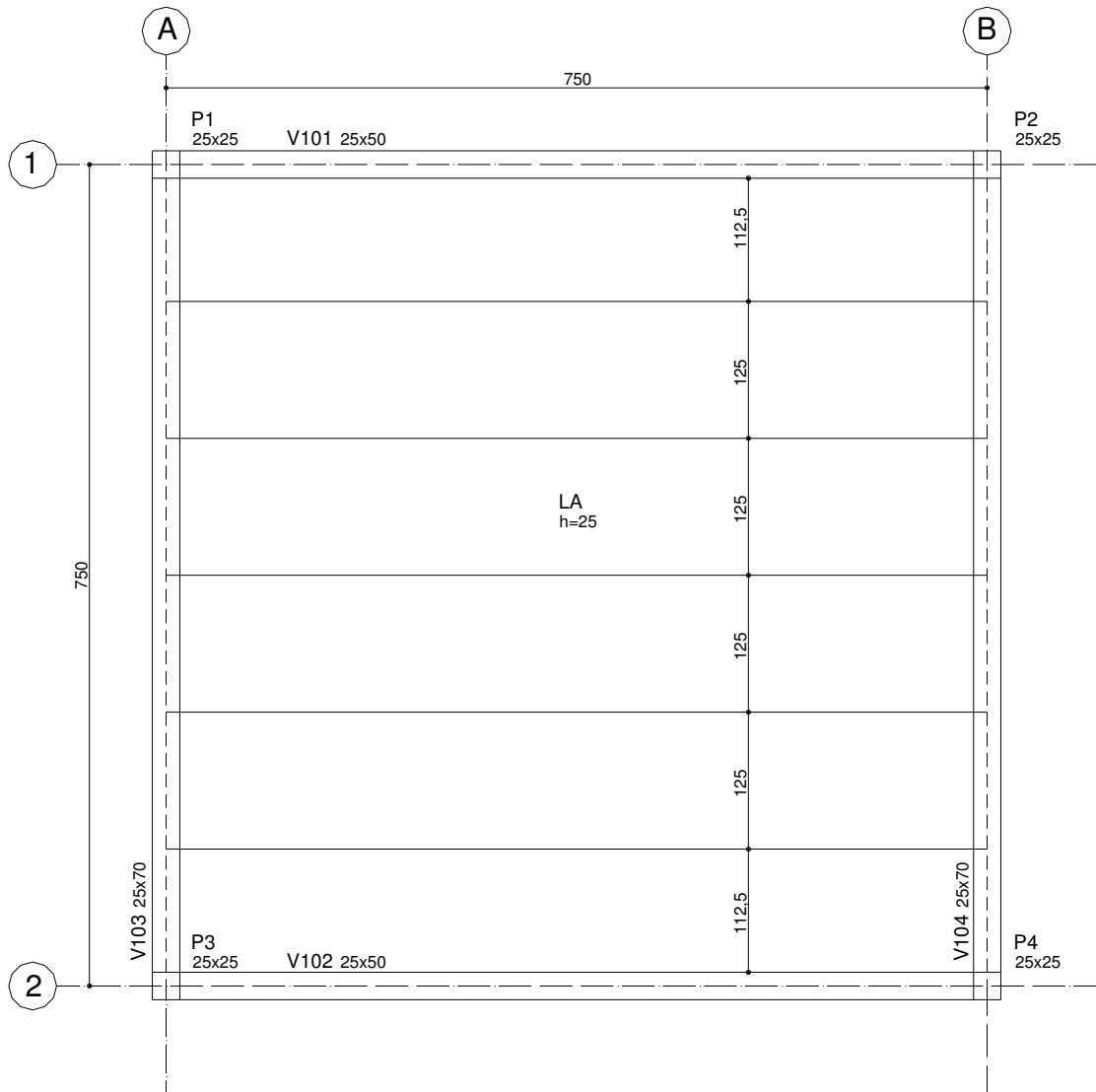


Figura 61 – Planta de forma da laje alveolar

Para a laje treliçada deste estudo foi adotada uma laje padrão da empresa Avilla Engenharia de Lajes Ltda. Esta laje possui altura total de 30 cm com enchimento de EPS de 25 cm, intereixo de 60 cm e capa estrutural de 5 cm. A Figura 64 mostra a planta de forma da laje treliçada considerada e a Figura 65 mostra a seção transversal.

Para análise estrutural foi utilizado o módulo CAD/Formas versão 13.5 da empresa TQS Informática Ltda., sendo considerado uso de concreto C30 para os elementos estruturais moldados no local. Apesar da consideração de um módulo de laje isolada, para efeito de dimensionamento de pilares foi adotada a carga correspondente a quatro lajes para que o dimensionamento de armadura do pilar ficasse compatível com resultados usuais para a seção de pilar considerada.

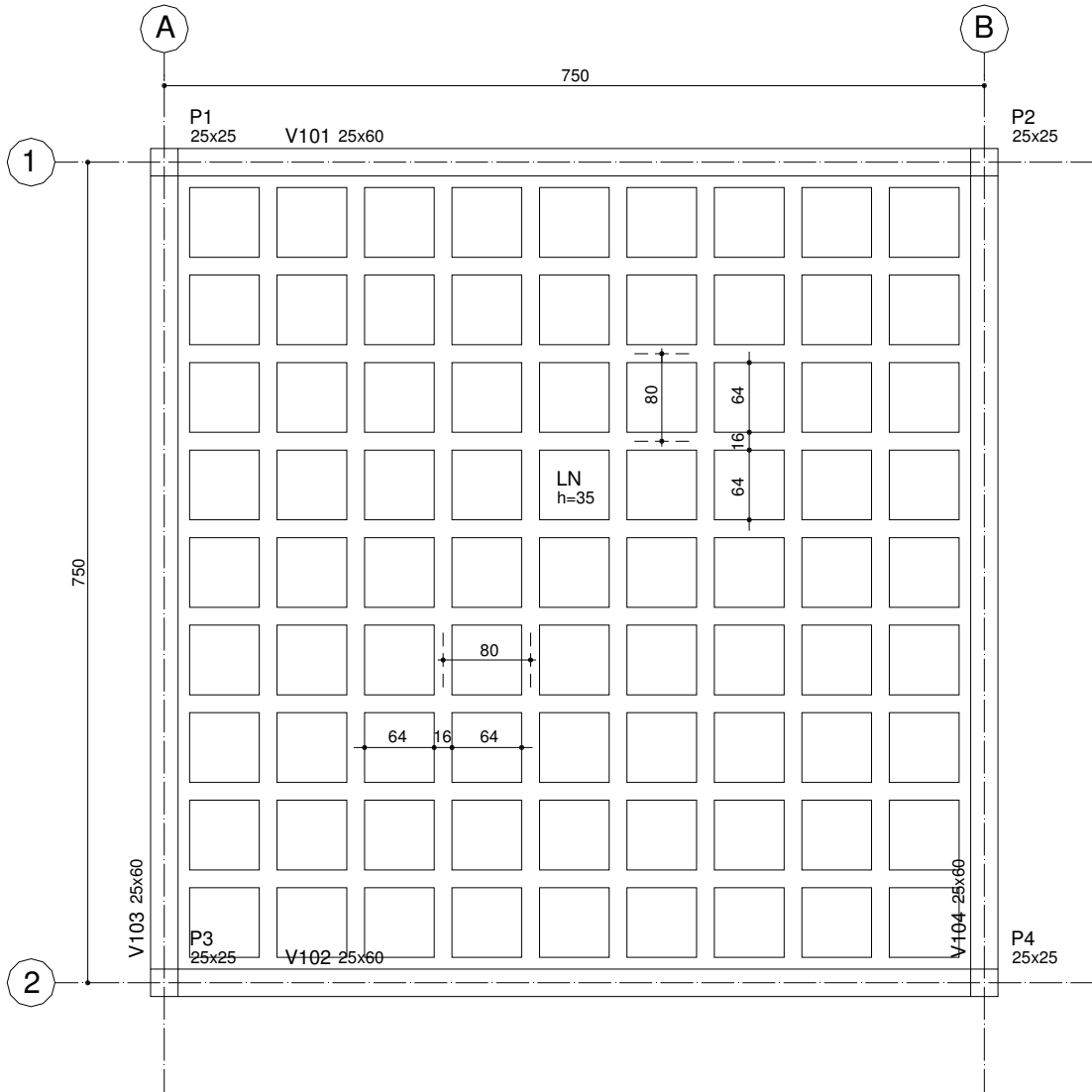


Figura 62 – Planta de forma da laje nervurada

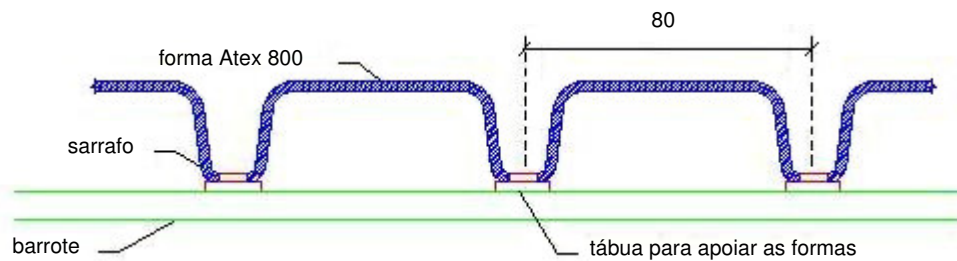


Figura 63 – Seção transversal da laje nervurada

Fonte: Adaptado de Atex (2008)

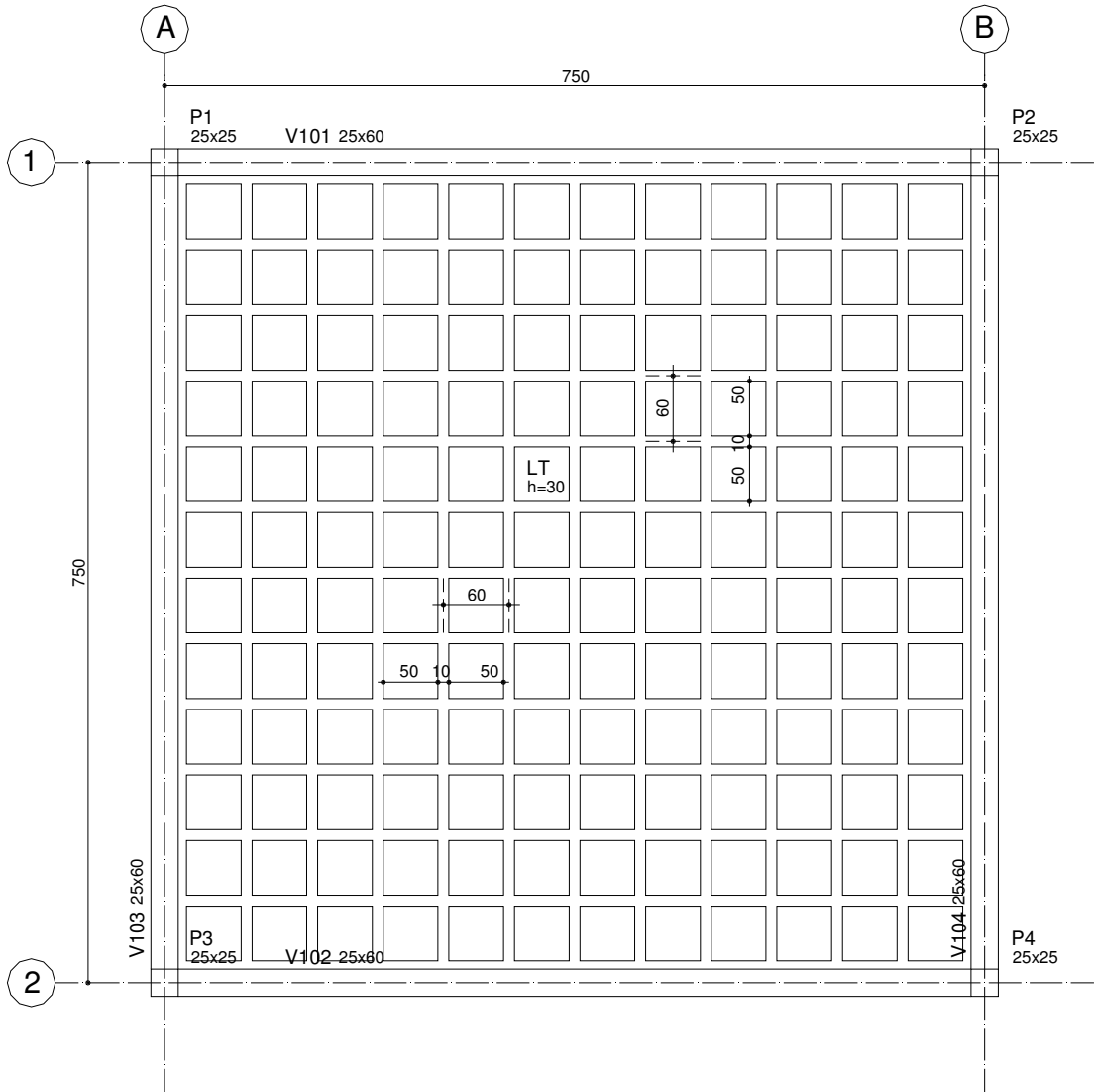


Figura 64 – Planta de forma da laje treliçada

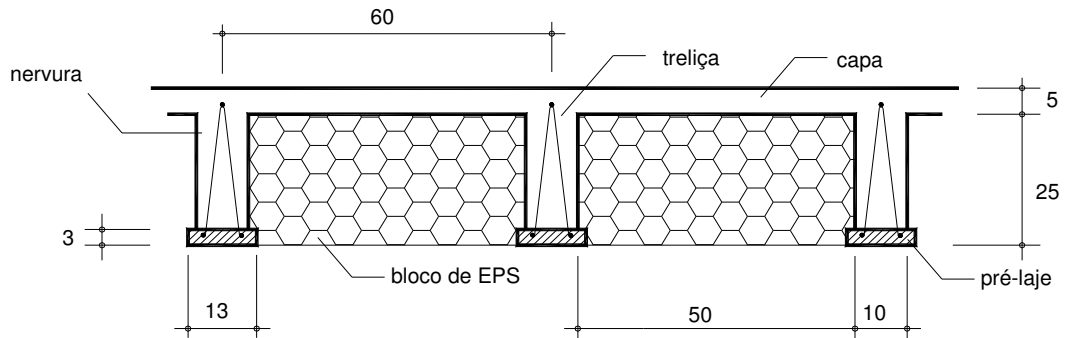


Figura 65 – Seção transversal da laje treliçada

O sistema de laje unidirecional foi analisado considerando que as vigas que não apóiam diretamente as lajes pré-moldadas alveolares recebem contribuição de 10% da carga correspondente a seu apoio nessa direção. Tal consideração é usual para o caso de lajes pré-moldadas em face do efeito da capa sobre a distribuição de carga para as vigas paralelas à direção da laje.

Deste modo, as vigas principais receberam 100% do carregamento total e as vigas laterais de fechamento receberam 20% do carregamento total. Para efeito de dimensionamento dos pilares, o acréscimo de 20% ao carregamento total foi eliminado, resultando na carga real do pilar.

Neste estudo hipotético, as vigas do pavimento foram consideradas estruturas isostáticas bi-apoiadas nas extremidades e recebem cargas apenas de um único módulo de laje. Para o estudo de uma situação real com pavimento de múltiplos tramos em duas direções, seria necessário admitir que as vigas sejam contínuas e que recebem cargas de módulos adjacentes de laje. Deste modo, as vigas do estudo hipotético apresentam diferente consumo de concreto e de aço que as vigas contínuas de uma situação real, em razão das últimas receberem esforços diferentes que as vigas estudadas. Assim, seria necessário estudar as seções e a armadura das vigas contínuas para uma situação de múltiplos tramos.

Porém, neste trabalho e de modo a simplificar a comparação entre as lajes consideradas, as vigas de pavimento foram consideradas estruturas isostáticas bi-apoiadas que recebem cargas de apenas um módulo de laje. Deste modo, os pilares foram dimensionados para situações usuais e as vigas para uma situação hipotética. Cabe destacar que o foco principal deste trabalho foi o estudo de lajes, sendo estas dimensionadas para situações reais.

A fundação não foi estudada neste trabalho, em razão de não ser o foco principal deste estudo e depender de outras variáveis que não foram consideradas. Apenas foram determinadas as reações dos pilares de modo a quantificar o esforço solicitante na fundação.

Para as alternativas de lajes de piso estudadas, foi admitida a não utilização de alvenarias, pois as vigas e lajes apresentam flecha superior a 1 cm, valor este superior ao permitido pela norma NBR 6118 (2007). Estas lajes são típicas para obras de estacionamentos ou supermercados, devido ao grande vão e carregamento moderado.

A Tabela 7 apresenta os carregamentos considerados por metro quadrado de laje para cada sistema adotado, bem como a carga no pilar. Nesta tabela e em todo

texto subsequente, foram identificados por LA, LN e LT os sistemas construtivos de lajes alveolares, lajes nervuradas e lajes treliçadas, respectivamente.

Na Tabela 7, $g_0 + g_1$, corresponde ao peso próprio do elemento pré-moldado mais capa estrutural (sistemas LA e LT) ou peso próprio total da laje nervurada (LN). A terceira coluna da Tabela 7 apresenta a ação $g_2 + q$ correspondente ao peso de pavimentação e revestimentos e a ação accidental considerada. A última coluna da Tabela 7 apresenta a ação vertical total sobre o pilar para cada sistema construtivo considerando lajes vizinhas idênticas em cada direção.

Tabela 7 – Ação sobre os sistemas considerados

Sistema	$g_0 + g_1$ (kN/m ²)	$g_2 + q$ (kN/m ²)	Carga no pilar (kN)
LA	4,29	6,00	690
LN	3,98	6,00	670
LT	3,23	6,00	620

A partir dos dados da Tabela 7, pode ser observado que a ação $g_0 + g_1$ do sistema LA é 7,2% maior que o sistema LN e 24,7% maior que o sistema LT. Porém, quando considerado o carregamento total esta diferença é menor, como mostra a Figura 66. O sistema LA apresentou carregamento total maior de 3,0% quando comparado ao sistema LN e de 10,3% quando comparado ao sistema LT.

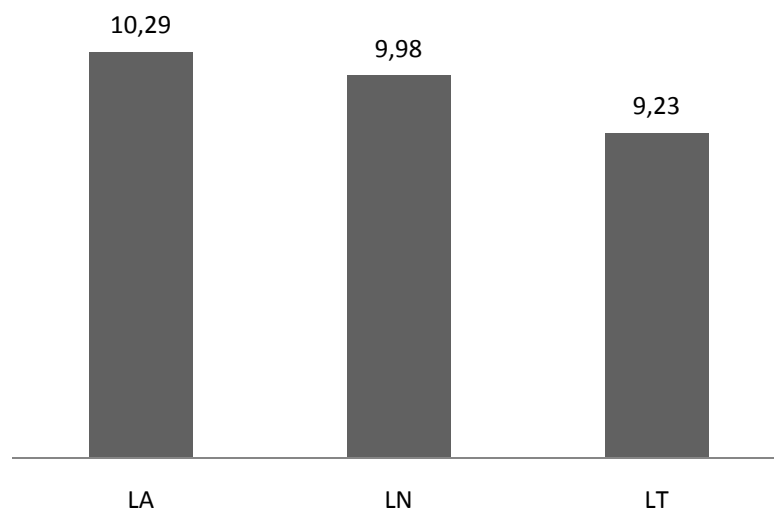


Figura 66 – Carregamento total (kN/m²) sobre os sistemas considerados

Como mostra a Tabela 7, a carga no pilar foi 10,1% maior quando comparado o sistema LA ao LT; esta diferença de carga foi menos significativa quando comparados os sistemas LN e LA resultando em cargas nos pilares diferentes de apenas 2,9%.

Em relação aos sistemas LN e LT, a ação $g_0 + g_1$ tende a aumentar conforme é acrescentado ação acidental e/ou permanente e/ou ampliado o vão teórico. Isto ocorre devido à necessidade de aumentar a espessura total de laje para poder vencer vão ou carregamento maior.

O sistema LA permite considerar ação $g_0 + g_1$ constante e, para o caso de vencer maiores vãos ou maiores carregamentos é necessário apenas alterar o arranjo das cordoalhas, como visto no item 6.1.

Os consumos de materiais obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Consumo total de materiais para os sistemas considerados

Consumo	Elemento	LA	LN	LT	
Concreto (m ³)	Pilar	0,88	0,88	0,88	
	Viga	4,35	4,35	4,35	
	Laje	EPM	6,67	-	0,95
		EML	3,60	8,53	6,16
	Total	15,50	13,76	12,34	
Aço (kgf)	Pilar	112	112	80	
	Viga	396	389	374	
	Laje	Arm. passiva	159	498	374
		Arm. ativa	207	-	-
	Total	874	999	828	
Forma (m ²)	Pilar	14	14	14	
	Viga	34	32	32	
	Laje	8	95	-	
	Total	56	141	46	
Cimbramento (m ³)	Viga	21	21	21	
	Laje	-	168	168	
Outros (m ³)	Laje	EPS	-	-	9,13

Na Tabela 8 são identificados por EPM os elementos pré-moldados de concreto; para as lajes estes elementos correspondem às pré-lajes. Nesta tabela, foram identificados por EML os elementos de concreto moldados no local para as lajes. Os volumes de EML do sistema LA incluem: capa, chaveteamento e complementos. Para os sistemas LN e LT os volumes EML correspondem a nervuras e capa.

Os consumos de concreto, aço e forma de madeira para os pilares e as vigas foram determinados pelo módulo CAD/Formas versão 13.5 da TQS Informática Ltda. A determinação dos demais consumos de materiais é explicada a seguir.

O volume total de concreto do elemento estrutural de laje foi determinado de forma diferente para cada sistema construtivo considerado. Para o sistema LA, foram considerados os seguintes volumes de laje: elemento pré-moldado, capa, chaveteamento e complementos. O elemento pré-moldado foi determinado a partir da área da seção transversal apresentada na Figura 49, assim como o volume da capa e do chaveteamento. O complemento moldado no local foi determinado pelo volume existente entre as faces externas das vigas com a laje alveolar, como apresentado na Figura 67.

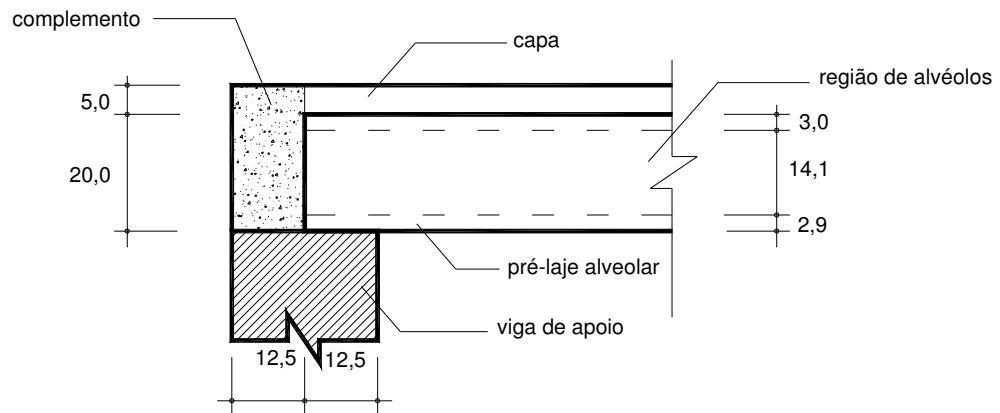


Figura 67 – Detalhe do complemento moldado no local no sistema LA

Para o sistema LN foi considerado apenas o volume total do elemento moldado no local, obtido pelo módulo CAD/Formas. Os volumes do elemento pré-moldado e moldado no local para o sistema LT foram determinados a partir das características geométricas da seção transversal apresentada da Figura 65.

Cabe lembrar que foi considerado como sendo 3,50 m o nível referente ao topo dos pisos. Deste modo a partir da análise da Figura 67 foi determinado que o sistema LA apresenta pé-direito de 3,25 m com as lajes alveolares apoiadas sobre as vigas. Devido à construção dos sistemas LN e LT apresentarem o mesmo nível para o topo

de vigas e lajes, o pé-direito dos sistemas LN e LT foi obtido pela diferença das alturas totais do pavimento e das lajes. Deste modo, foram determinados os valores de 3,15 m e 3,20 m para o pé-direito correspondente aos sistemas LN e LT respectivamente.

Pode se observar na Tabela 8 que o consumo de aço para as lajes foi dividido em armadura passiva e ativa. A armadura ativa está presente somente no sistema LA devido ao uso de cordoalhas e de fios. A armadura passiva do sistema LA corresponde ao uso de tela de aço CA-60 e para os sistemas LN e LT corresponde ao uso de vergalhões de aço CA-50.

O sistema LA utiliza as cordoalhas apresentadas na Figura 53 para a série 9-0, bem como tela de aço CA-60 indicada no item 6.1. Foram admitidos os valores de peso específico linear de 0,154 kgf/m para os fios de \varnothing 5 mm e de 0,441 kgf/m para as cordoalhas de \varnothing 9,5 mm.

Para a determinação do consumo de aço na capa estrutural do sistema LA foi considerada a sobreposição de 5% de tela Q159, bem como peso unitário de 2,53 kgf/m². A armação da capa estrutural do sistema LN foi determinada com o módulo CAD/Formas e para o sistema LT esta foi determinada pelo fabricante para execução.

O consumo de forma apresentado na Tabela 8 corresponde ao consumo de forma de madeira e de forma plástica, sendo necessário o uso de forma plástica apenas no sistema LN. Como pode se observar na Figura 62, o sistema LN necessita de 81 formas plásticas. Estas foram convertidas em m² a partir da determinação da área superficial do cubo equivalente, resultando em 1,17 m² a área equivalente de uma forma plástica e 95 m² a área total de forma plástica.

Foi necessário o uso de forma de madeira na laje do sistema LA devido à necessidade de preencher o volume restante entre as faces externas das vigas com a laje alveolar, tal como indica o detalhe do complemento apresentado na Figura 67. Os demais sistemas LN e LT não necessitam de formas de madeira para execução da laje, mas necessitam de cimbramento, sendo este não necessário para o sistema LA. O estudo de cimbramento das lajes bidirecionais foi determinado pela empresa Avilla Engenharia de Lajes Ltda.

A Tabela 8 também apresenta o volume do material de enchimento para o sistema LT, sendo o volume de EPS determinado pela quantidade presente na forma apresentada na Figura 64 e detalhado no corte transversal apresentado na Figura 65.

A Figura 68 apresenta o gráfico de consumo de concreto para os sistemas de lajes considerados neste estudo. Nessa figura estão indicados em escala de cinza os consumos de concreto para os elementos estruturais pilar, viga e laje.

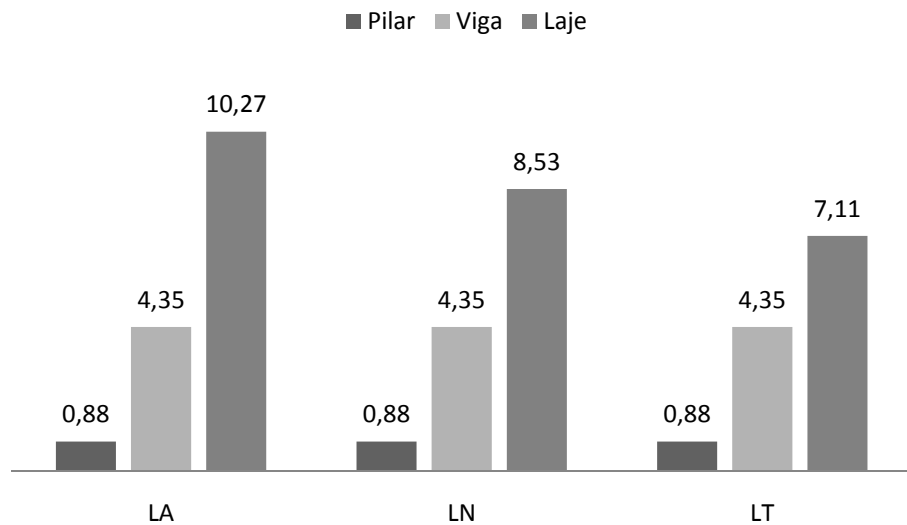


Figura 68 – Consumo de concreto (m³)

A partir da Figura 68, pode ser notado que os consumos de concreto para pilares e vigas são os mesmos para os três sistemas considerados, porém o consumo de concreto de laje apresentou variação entre os sistemas considerados. O sistema LN apresentou consumo de concreto para laje 16,9% menor que o sistema LA; já o sistema LT apresentou consumo 30,8% menor que o sistema LA.

A comparação do consumo total de concreto representa uma diferença menor para a comparação entre os sistemas construtivos. Pela análise da Figura 69 pode se observar que o consumo total de concreto do sistema LN foi 11,2% menor que o sistema LA; já o sistema LT apresentou consumo 20,4% menor que o sistema LA.

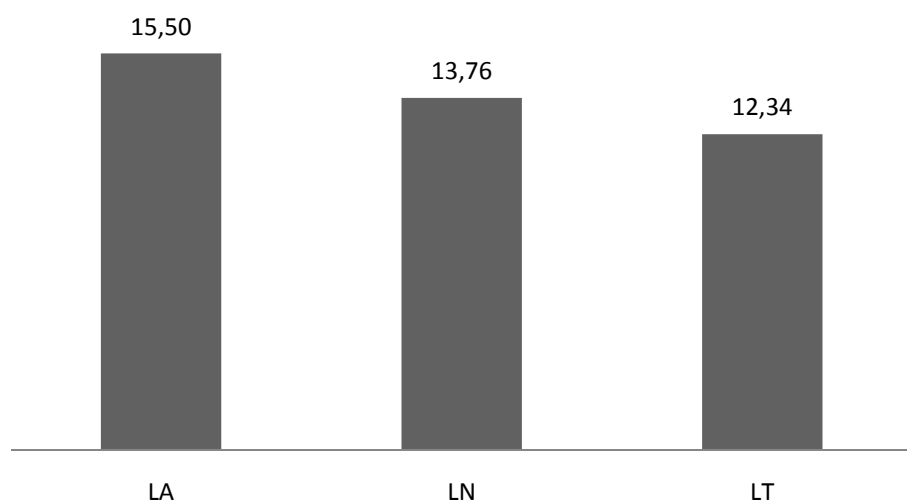


Figura 69 – Consumo total de concreto (m³)

Devido à carga no pilar apresentada na Tabela 7 ser aproximadamente a mesma para os sistemas LA e LN, os consumos de aço obtidos para os pilares foram os mesmos, como mostra a Figura 70. Desta figura, verifica-se também que os consumos de aço para as vigas são praticamente iguais para os três sistemas estudados.

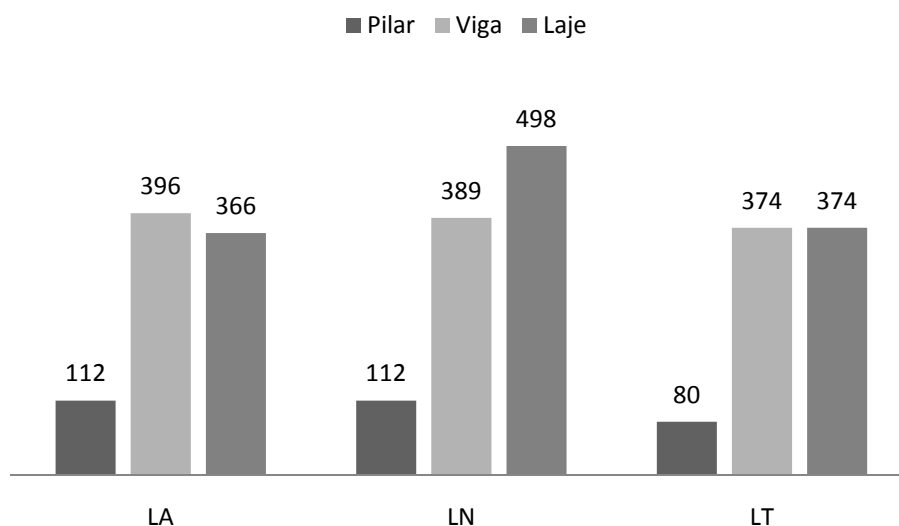


Figura 70 – Consumo de aço (kgf)

Porém quando comparados os consumos de aço para as lajes desses sistemas, pode se observar que a laje do sistema LA apresenta consumo 2,2% menor que o sistema LT e 36,1% menor que o sistema LN. Isso ocorre, em razão da armadura ativa do sistema LA ser mais eficiente que a armadura passiva dos sistemas LN e LT. Para diminuir o consumo elevado de aço do sistema LN seria necessário aumentar a altura da nervura da laje, assim aumentando o consumo de concreto.

Com a Figura 71 pode se observar que o consumo total de aço para o sistema LA foi 14,3% menor para o sistema LN e apenas 5,3% superior ao sistema LT. Apesar do consumo de aço de laje para o sistema LA ser menor que o sistema LT, como observado na Figura 70, o consumo total de aço do sistema LA foi superior ao sistema LT, em razão do consumo maior de aço nos pilares e vigas do sistema LA em relação ao sistema LT.

A Figura 72 ilustra a comparação entre o consumo de forma para os sistemas construtivos de laje considerados. Em razão dos pilares terem as mesmas dimensões, estes apresentam o mesmo consumo de formas, como pode se observar na Figura 72. Nesta também pode se notar que as vigas dos sistemas bidirecionais LN e LT apresentam o mesmo consumo de formas, em razão de terem a mesma seção de

25x60 cm², diferentemente das vigas do sistema unidirecional LA, com seções de 25x70 cm² e de 25x50 cm².

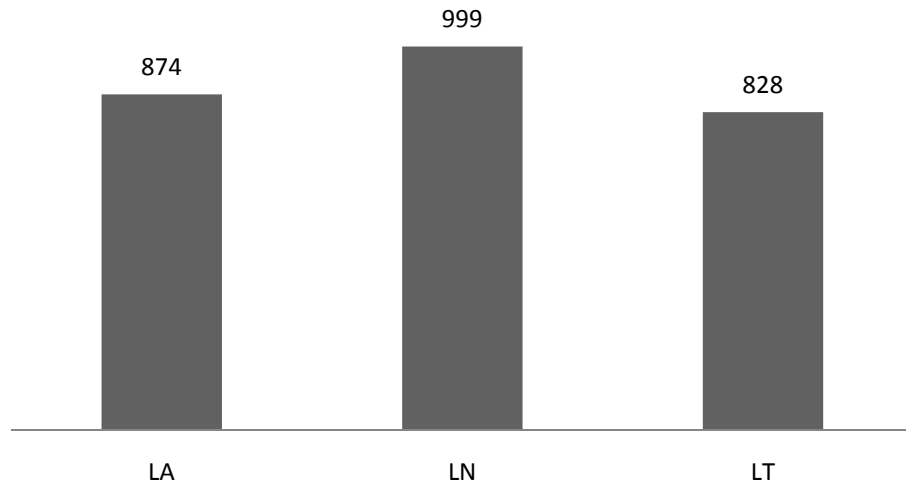


Figura 71 – Consumo total de aço (kgf)

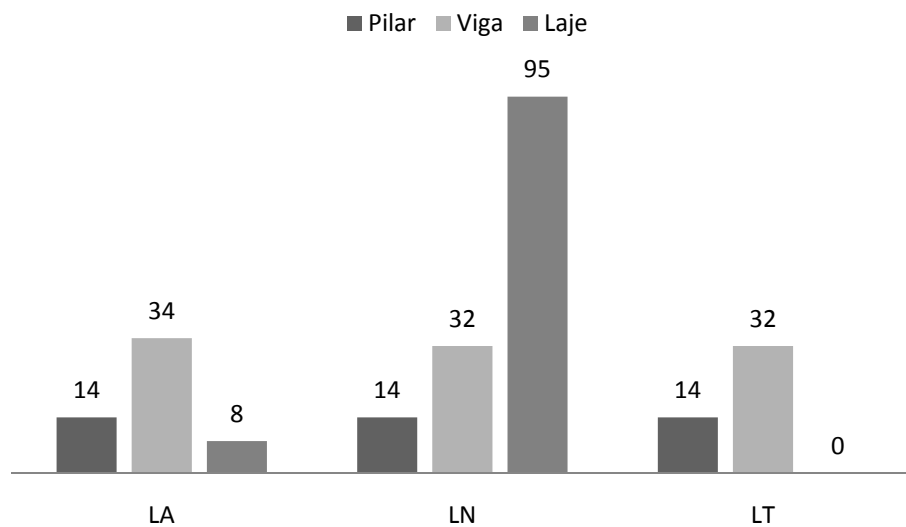


Figura 72 – Consumo de formas (m²)

Porém a maior diferença de consumo ocorreu no elemento estrutural laje. Devido à necessidade da utilização elevada de forma para a construção da laje nervurada, este sistema apresentou consumo de forma de 95 m². Para o sistema LA foi necessário apenas 8 m² e há ausência de formas no sistema LT para a confecção das lajes.

A Figura 73 apresenta o consumo total de formas entre os sistemas de lajes considerados. A partir desta figura pode ser observado que o sistema LN apresentou

consumo de formas 151,8% maior que o sistema LA; já o sistema LT apresentou consumo menor de 17,8% em relação ao sistema LA.

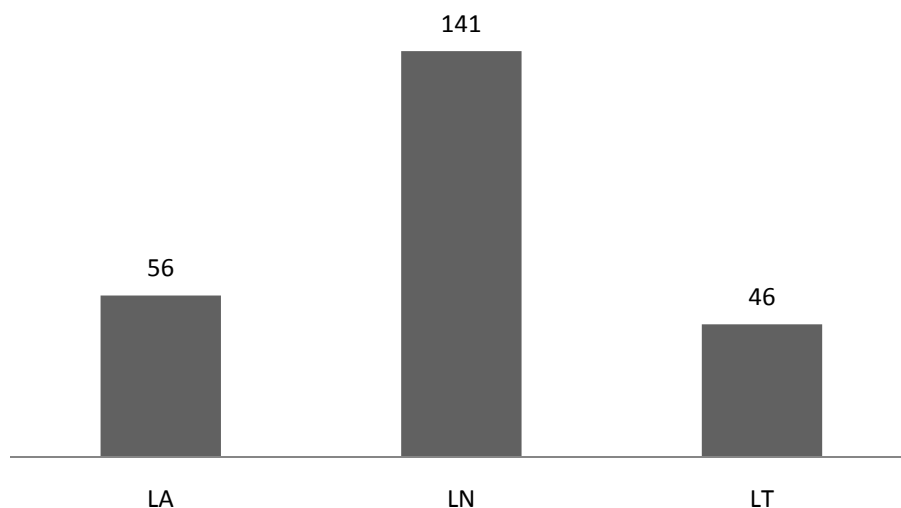


Figura 73 – Consumo total de forma (m²)

A Tabela 9 apresenta os índices de consumo de concreto por área de construção referente a cada sistema considerado, para os elementos estruturais pilares, vigas e lajes. Os índices foram obtidos pela Eq. 1 apresentada no item 4.

Tabela 9 – Índice de consumo de concreto para cada elemento

Índice	Elemento	LA	LN	LT
IC _A (m ³ /m ²)	Pilar	0,02	0,02	0,02
	Viga	0,07	0,07	0,07
	Laje	0,17	0,14	0,12
	Total	0,26	0,23	0,21

A Figura 74 apresenta o IC_A total de cada sistema construtivo considerado. Nesta figura pode se observar que o IC_A do sistema LA foi 11,5% maior que o sistema LN e 19,2% maior que o sistema LT.

Os índices de consumo de aço IA_A e IA_V, obtidos pelas equações Eq.2 e Eq.3 para cada elemento estrutural são apresentados na Tabela 10. Para as lajes, os índices IA_A e IA_V foram separados em dois grupos, armadura ativa composta por cordalhas e fios e armadura passiva composta por vergalhões e telas de aço.

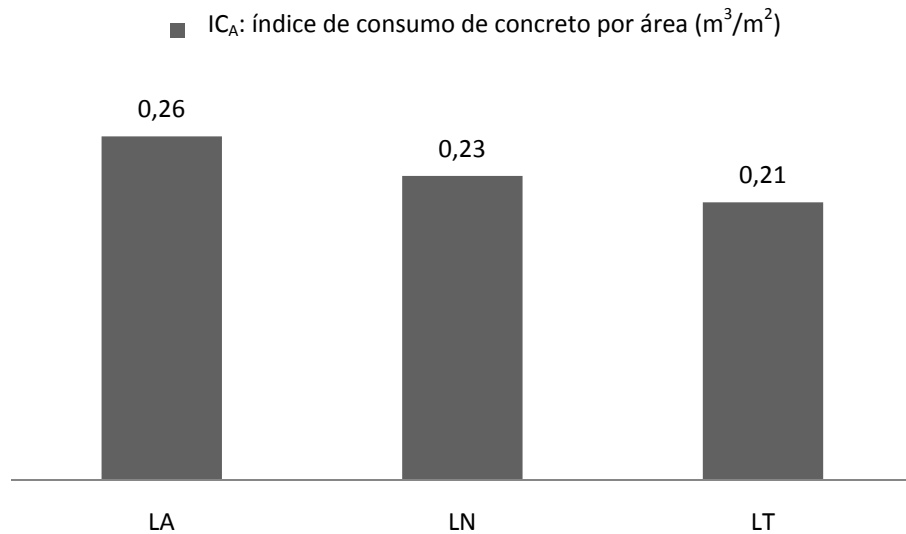


Figura 74 – Índice de consumo de concreto de cada sistema considerado

Tabela 10 – Índice de consumo de aço para cada elemento

Índice	Elemento	LA	LN	LT	
IA_A (kgf/m^2)	Pilar	1,86	1,86	1,33	
	Viga	6,59	6,48	6,23	
	Laje	Arm. passiva	2,65	8,29	6,23
		Arm. ativa	3,45	-	-
	Total	14,55	16,63	13,79	
IA_V (kgf/m^3)	Pilar	127,27	127,27	90,91	
	Viga	91,03	89,43	85,98	
	Laje	Arm. passiva	15,48	58,38	52,60
		Arm. ativa	20,16	-	-
	Total	56,40	72,60	67,10	

A Figura 75 apresenta os índices IA_A e IA_V total de cada sistema de laje considerado. Através desta figura, pode se observar que o índice IA_A do sistema LA foi superior ao do sistema LT em 5,3% e inferior ao sistema LN em 14,3%. Em comparação com o índice IA_V pode ser observado que o sistema LN foi superior ao sistema LA em 28,7% e o sistema LT foi superior ao sistema LA em 19,0%.

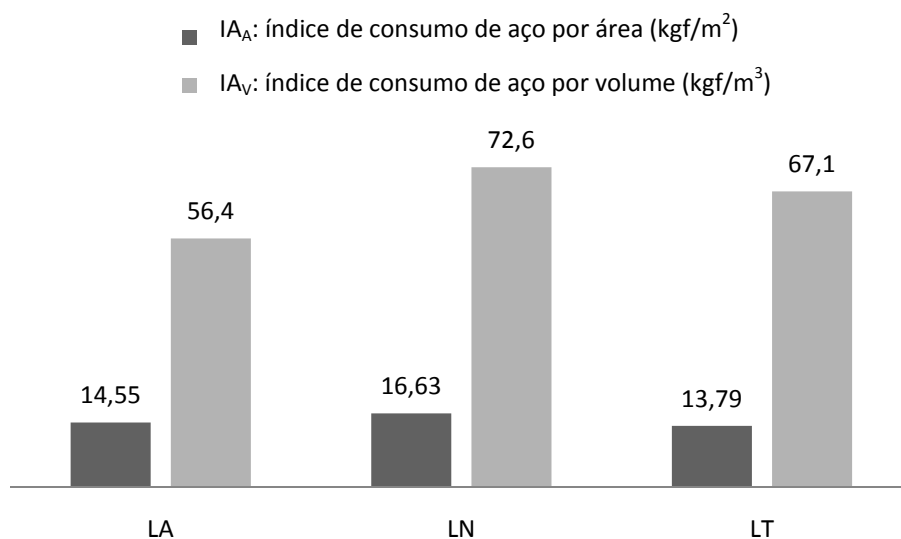


Figura 75 – Índice de consumo de aço de cada sistema considerado

Desta forma pode se observar que, quando comparados os índices de consumo de aço por área de construção, o sistema LA ficou entre os sistemas LN e LT; porém quando a análise foi realizada em função do volume de concreto, o sistema LA apresentou menor consumo que os outros sistemas. Isto ocorreu em razão do maior consumo de concreto apresentado no sistema LA como pode se observar na Figura 69.

Em função da área construída do pavimento e do volume necessário de concreto, estão apresentados na Tabela 11 os índices IF_A e IF_V referentes ao consumo de forma em cada elemento estrutural de cada sistema de laje considerado.

Tabela 11 – Índice de consumo de forma para cada elemento

Índice	Elemento	LA	LN	LT
IF_A (m ² /m ²)	Pilar	0,23	0,23	0,23
	Viga	0,57	0,53	0,53
	Laje	0,13	1,58	-
	Total	0,93	2,43	0,76
IF_V (m ² /m ³)	Pilar	15,91	15,91	15,91
	Viga	7,82	7,36	7,36
	Laje	0,78	11,14	-
	Total	3,61	10,25	3,73

A Figura 76 ilustra os índices IF_A e IF_V total referente a cada sistema considerado. Analisando o índice IF_A pode ser observado que o sistema LA apresentou consumo de forma por área de pavimento maior em 18,3% que o sistema LT; já a comparação dos sistemas LA e LN, resultou que o índice de forma do sistema LN foi superior em 161,3%.

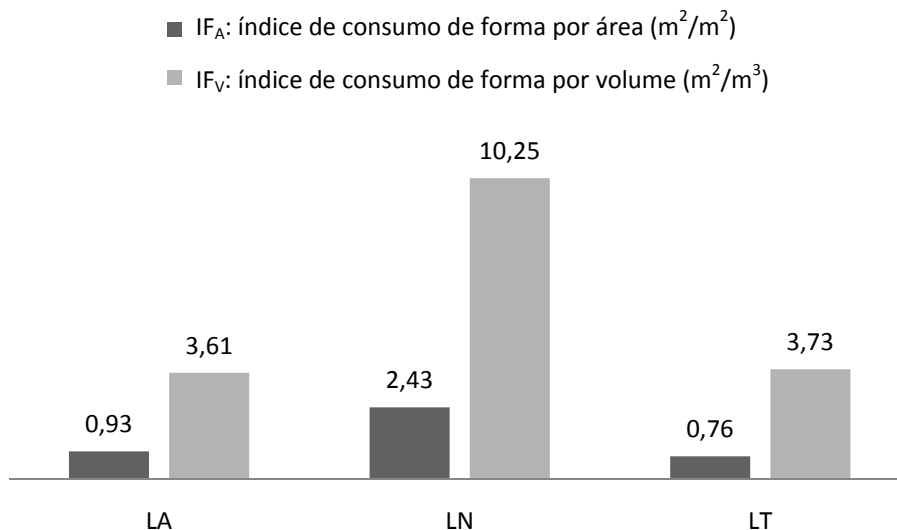


Figura 76 – Índice de consumo de forma de cada sistema considerado

Como decorrência da análise da Figura 76 para comparação dos índices de forma referente ao volume de concreto dos sistemas considerados, resultou que o sistema LN é superior ao LA em 183,9% e o sistema LT é superior ao LA em 3,3%. Como já mencionado anteriormente, existem diferenças entre os índices de área e de volume, em razão da diferença do volume de concreto de cada sistema considerado.

Foram comparados os índices deste estudo com os obtidos por Marino (2007) para pavimentos protendidos com cordoalha engraxada, resultando em valores equivalentes de IC_A para ambos os trabalhos quando analisado o sistema de laje alveolar. De fato, Marino (2007) obteve $IC_A = 0,26 m^3/m^2$, $IA_A = 19,56 kgf/m^2$ e $IF_A = 1,20 m^2/m^2$.

Cabe destacar que os índices e os consumos obtidos neste trabalho se referem a uma simulação de um único módulo de pavimento. Deste modo alguns resultados obtidos devem ser observados com cuidado para comparar com consumos e índices de uma obra real.

Posteriormente à determinação dos consumos de materiais para cada sistema considerado, foram obtidos os custos de implantação para as alternativas dos

sistemas construtivos estudados, LA, LN e LT. A Tabela 12 sumariza os consumos de cada sistema para a composição do custo final.

Tabela 12 – Consumo de materiais para composição do custo final

Elemento	Consumo	LA	LN	LT
Pilar	Concreto C30 (m ³)	0,88	0,88	0,88
	Aço CA-50 (kgf)	112	112	80
	Forma de madeira (m ²)	14	14	14
Viga	Concreto C30 (m ³)	4,35	4,35	4,35
	Aço CA-50 (kgf)	396	389	374
	Forma de madeira (m ²)	34	32	32
	Cimbramento (m ³)	21	21	21
Laje	Concreto C30 (m ³)	-	8,53	6,16
	Concreto C20 (m ³)	3,60	-	-
	Aço CA-60 (kgf)	159	-	-
	Aço CA-50 (kgf)	-	498	163
	Forma de madeira (m ²)	8	-	-
	Forma plástica (m ²)	-	95	-
	Pré-laje (m ²)	56	-	56
Cimbramento (m ³)	-	168	168	

Em razão do custo da armadura de treliças estar embutido no custo do elemento de pré-laje do sistema LT, a Tabela 12 apresenta somente o consumo de aço para a armadura de distribuição de capa e para a armadura principal de nervuras a serem colocadas na obra. Dessa forma, esta tabela apresenta apenas o consumo adicional de 163 kgf de aço CA-50 para o sistema LT e a Tabela 8 apresenta o consumo total de 374 kgf de aço CA-50 incluindo o peso da treliça.

Pela mesma razão, a Tabela 12 não apresenta o consumo das cordoalhas de protensão do sistema LA, devido a estas já estarem consideradas na composição do custo de fornecimento da pré-laje alveolar.

A pré-laje utilizada no sistema LA foi a laje alveolar da série 9-0 apresentada no item 6.1. Nesta série, a capa e o chaveteamento são moldadas com concreto classe C20, assim justificando a presença deste concreto na Tabela 12.

Para a determinação dos custos de execução dos sistemas estudados foram considerados os valores de preços unitários obtidos junto à Fundação para o Desenvolvimento da Educação referente à base do mês de Junho de 2008, FDE (2008) e através de consulta à empresa Lupema Engenharia e Comércio Ltda.

Os custos de cada item para cada sistema considerado estão apresentados na Tabela 14 em conformidade com os preços unitários indicados na Tabela 13. Nesta tabela estão apresentados a descrição dos materiais e serviços, a unidade de cotação, preço e o código nomeado pela FDE (2008). Os preços incluem fornecimento de material, montagem e mão-de-obra para execução.

Tabela 13 – Preço unitário de materiais e serviços

Código	Descrição	Unidade	Preço
03.01.01	Forma de madeira maciça	m ²	R\$ 51,04
03.01.05	Cimbramento de madeira	m ³	R\$ 17,59
03.02.02	Aço CA-50	kgf	R\$ 6,86
03.02.05	Tela de aço CA-60	kgf	R\$ 6,37
03.03.24	Concreto C20 dosado, bombeado e lançado	m ³	R\$ 352,21
03.03.30	Concreto C30 dosado, bombeado e lançado	m ³	R\$ 379,22
03.03.39	Pré-laje alveolar de concreto protendido	m ²	R\$ 185,65
03.03.63	Pré-laje treliçada com EPS	m ²	R\$ 113,22
-	Forma plástica – ATEX 800	un.	R\$ 15,00

O preço de forma plástica é referente à consideração da locação dessas por um mês, obtido por consulta à empresa Lupema Engenharia e Comércio Ltda. Os demais preços foram obtidos através do FDE (2008) que considera para composição os insumos, mão de obra com leis sociais de 122% e BDI (bonificação e despesas indiretas) de 23%.

Devido a não existir repetição vertical, para este estudo não foi considerada a reutilização de forma, em razão deste trabalho considerar uma obra típica comercial tal como de supermercado, onde somente ocorreria repetição horizontal.

Tabela 14 – Custos de materiais para os elementos dos sistemas

Elemento	Material	LA	LN	LT
Pilar	Concreto C30	R\$ 333,72	R\$ 333,72	R\$ 333,72
	Aço CA-50	R\$ 768,32	R\$ 768,32	R\$ 548,80
	Forma de madeira	R\$ 714,56	R\$ 714,56	R\$ 714,56
Viga	Concreto C30	R\$ 1.649,61	R\$ 1.649,61	R\$ 1.649,61
	Aço CA-50	R\$ 2.716,56	R\$ 2.668,54	R\$ 2.565,64
	Forma de madeira	R\$ 1.735,36	R\$ 1.633,28	R\$ 1.633,28
	Cimbramento	R\$ 369,39	R\$ 369,39	R\$ 369,39
Laje	Concreto C30	-	R\$ 3.234,75	R\$ 2.336,00
	Concreto C20	R\$ 1.267,96	-	-
	Aço CA-60	R\$ 1.012,83	-	-
	Aço CA-50	-	R\$ 3.416,28	R\$ 1.118,18
	Forma de madeira	R\$ 408,32	-	-
	Forma plástica	-	R\$ 1.215,00	-
	Pré-laje	R\$ 10.396,40	-	R\$ 6.340,32
	Cimbramento	-	R\$ 2.955,12	R\$ 2.955,12

Os resultados obtidos na Tabela 14 estão ilustrados na Figura 77 para os custos de cada elemento para cada sistema considerado. O custo total da implantação de cada sistema é apresentado na Tabela 15 e ilustrado na Figura 78.

Tabela 15 – Custo total dos sistemas considerados

Elemento	LA	LN	LT
Pilar	R\$ 1.816,60	R\$ 1.816,60	R\$ 1.597,08
Viga	R\$ 6.470,92	R\$ 6.320,82	R\$ 6.217,92
Laje	R\$ 13.085,51	R\$ 10.821,15	R\$ 12.749,62
Total	R\$ 21.373,03	R\$ 18.958,57	R\$ 20.564,62

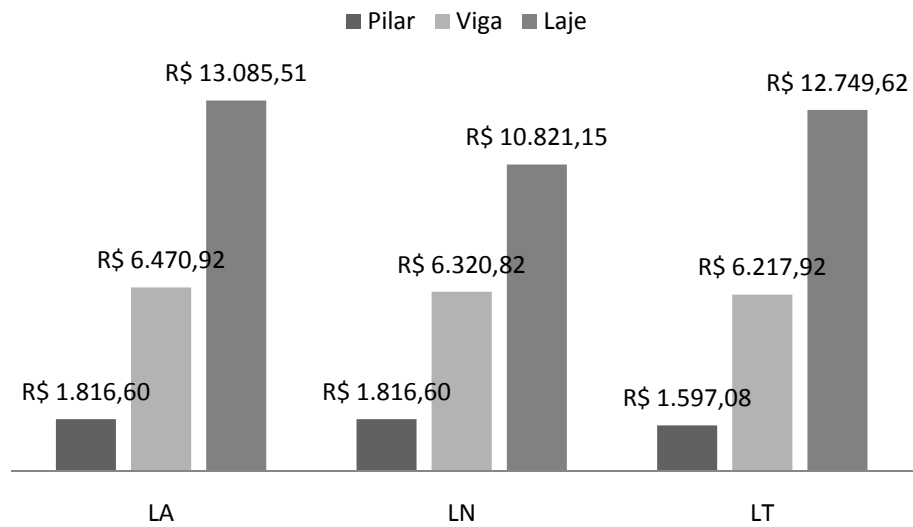


Figura 77 – Custo de cada elemento para os sistemas considerados

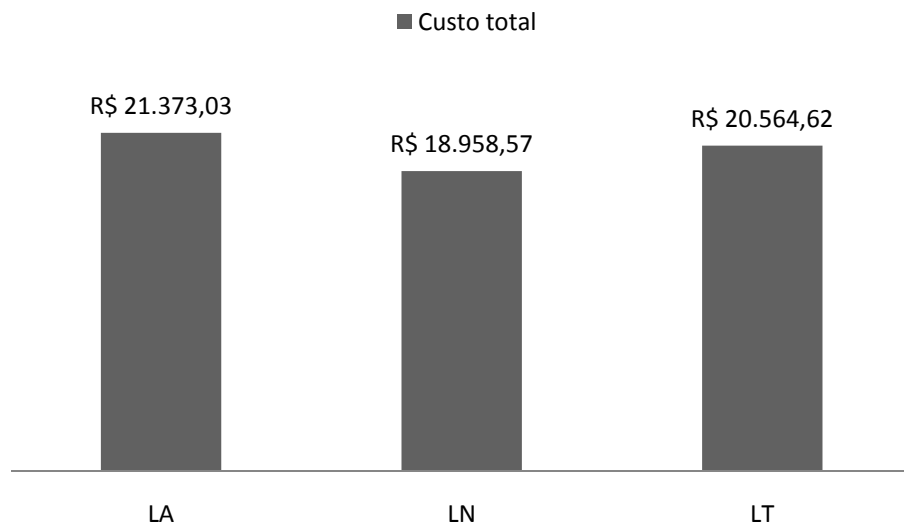


Figura 78 – Custo total dos sistemas considerados

A partir da análise da Figura 77, pode se observar que os custos de implantação de pilares e vigas para os três sistemas foram aproximadamente os mesmos, porém quando comparado os custos de lajes estes apresentaram diferenças significativas. A laje de piso do sistema LA apresentou custo 17,3% maior que o sistema LN e 2,5% maior que o sistema LT.

Quando comparado o custo total de implantação da obra (Figura 78) foi observado que o custo total do sistema LA é superior em 11,3% ao sistema LN e 3,8% superior ao sistema LT.

Deste modo pode se observar que o custo da laje de piso quando analisado individualmente pode ser muito superior a outro sistema, porém quando analisado o custo total da implantação esta diferença é reduzida. Por exemplo, considerando os custos dos sistemas LA e LN, o custo da laje de piso do sistema LA difere do sistema LN em 17,3%, porém o custo total da obra difere em apenas 11,3%.

A Figura 78 mostra que o sistema LN é mais econômico que os demais, LA e LT. No entanto, este custo maior dos sistemas LA e LT pode ser compensado com a rapidez de entrega da obra. Deste modo, o capital de retorno pode ser recuperado antes do sistema LN.

Cabe destacar que o sistema LA suporta vãos maiores e cargas mais elevadas apenas alterando o arranjo de protensão como explicado no item 6.1 e que não acarreta custos significativamente mais elevados. Já os sistemas LN e LT para atingirem vãos maiores e/ou maiores carregamentos exigem aumentar tanto a espessura quanto a armadura da laje e assim aumentar o consumo de concreto e de aço.

Outra consideração importante a destacar é a possível limitação de flecha existente nos sistemas LN e LT. Estes sistemas tipicamente são utilizados com vãos máximos de ordem de 7,50 m e quando utilizados para vãos maiores apresentam flechas exageradas, impedindo a utilização prática. Por outro lado, o sistema de laje alveolar pode ainda alcançar vãos e carregamentos maiores sem resultar em flechas excessivas.

7. CONCLUSÕES

Este estudo buscou caracterizar a utilização de laje alveolar protendida. Para tanto, foram relatadas e ilustradas as etapas de produção de lajes alveolares na indústria de pré-fabricados, bem como algumas características de execução no canteiro de obras. Como resultado do trabalho, algumas peculiaridades deste sistema foram apontadas, tais como a necessidade de equipamentos de montagem, a equalização das peças pré-moldadas e a solidarização dos elementos com capa estrutural.

Foi justificado, sistematizado e apresentado o roteiro de cálculo para dimensionamento e verificação de lajes alveolares protendidas, onde se constatou a necessidade de verificar as tensões máximas admissíveis no concreto, tanto na etapa do ato de protensão quanto na situação final com carregamento máximo e perda de protensão máxima.

Foi apresentado um exemplo numérico que buscou esclarecer alguns detalhes do dimensionamento destas lajes. A partir do roteiro de cálculo apresentado, foi possível facilmente determinar os módulos resistentes necessários da peça, bem como a força de protensão necessária e a força cortante resistente da peça pré-moldada considerada, para um determinado carregamento e um determinado vão de laje.

Com a elaboração do ábaco aqui desenvolvido, foi possível constatar que o vão máximo permitido para as lajes alveolares é limitado principalmente pelo momento fletor e pela força cortante, com seus valores máximos solicitantes. O ábaco permite obter os trechos de influência para cada condição limitadora para os quatro arranjos de cordoalhas de protensão considerados. Para vencer vãos maiores ou cargas superiores é necessário utilizar arranjos com mais cordoalhas e/ou aumentar a resistência do concreto e, se necessário ainda realizar o preenchimento de alvéolos nas extremidades da peça pré-moldada.

Este estudo permitiu concluir que a laje alveolar protendida tem como principal característica a capacidade de vencer grandes vãos com elevados carregamentos em comparação com os sistemas tradicionais. Isto ocorre devido à utilização de armadura ativa de protensão aliada com a combinação de um elemento geométrico de concreto de maior resistência e menor peso próprio, em razão dos alvéolos inseridos no interior da peça.

Foi efetuada a comparação do custo de implantação de uma obra com o vão máximo usual de edifícios comerciais onde tipicamente são utilizadas lajes nervuradas e lajes treliçadas bidirecionais. Os resultados de custo total de implantação mostraram que o sistema de lajes alveolares para as condições deste estudo, foi apenas 3,8% maior que o custo de implantação do sistema de lajes treliçadas. Em relação ao sistema aqui identificado como de lajes nervuradas, verificou-se que o sistema de laje alveolar foi 11,3% mais oneroso.

No entanto, as lajes alveolares apresentam como vantagem adicional serem capazes de suportar carregamentos mais elevados que as demais, bem como atingir maiores vãos, sem a necessidade de aumentar a espessura da laje. Os sistemas de laje nervurada e de laje treliçada bidirecional exigem maior espessura total e maior consumo de materiais para vãos e carregamentos maiores do que os aqui estudados, podendo resultar em maiores custos de implantação.

Como sugestão para trabalhos futuros relacionados à comparação de consumo e de custo do sistema de lajes alveolares, seria interessante realizar estudos com a consideração de um pavimento de laje não limitado apenas a um módulo, tal como o do presente estudo, de modo a avaliar a influência da continuidade das lajes e das vigas sobre o custo final da obra.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, C. A. M. (2007) *Estudo de lajes alveolares pré-tracionadas com auxílio de programa computacional*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: UFSC.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006). *NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro.

___. (2007). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.

ATEX (2008). *Atex Brasil – A forma plástica da laje nervurada*. Disponível em: <www.atex.com.br/manual.pdf>. Acesso em: 21 set. 2008.

CATOIA, B. (2007). *Comportamento de vigas protendidas pré-moldada com ligações semi-rígidas*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: UFSCar.

CICHINELLI, G. C. (2008). *Lajes ampliadas*. Revista Técnica, São Paulo, n.132, mar.

EL DEBS, M. K. (2000). *Concreto pré-moldado: Fundamento e aplicações*. São Carlos: EESC.

ELLIOTT, K. S. (1996). *Multi-storey precast concrete framed structures*. Oxford: Blackwell Science.

EMERICK, A. A. (2005). *Projeto e execução de lajes protendidas*. Rio de Janeiro: Interciência.

FDE (2008). *Portal da Fundação para o Desenvolvimento da Educação*. Disponível em: <www.fde.sp.gov.br/Portal_FDE/APM/obras/consulta_obras.asp>. Acesso em: 14 out. 2008.

FERREIRA, M. A. et al. (2007). *Avaliação de desempenho da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido*. Revista Concreto & Construções, São Paulo, n.48, dez.

FUSCO, P. B. (1995). *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo: Pini.

HANAI, J. B. (2005). *Fundamentos do concreto protendido*. E-book de apoio para o curso de Engenharia Civil. São Carlos: EESC.

LACERDA, I. F. (2007). *Diretrizes para a reutilização de ancoragem ativa em lajes de edificações verticais de múltiplo uso e/ou pisos industriais protendidos*. Dissertação (Mestrado). Curitiba: UFPR.

LAJEAL (2008). *Laje alveolar – laje protendida: utilização*. Disponível em: <www.lajeal.com.br/lajes-alveolares-utilizacao.php>. Acesso em: 30 jun. 2008.

- LEONHARDT, F. (1983). *Construções de concreto*. Vol. 5: Concreto protendido. Rio de Janeiro: Interciência.
- MARINO, M. (2007). *Vantagens da protensão em lajes de concreto*. Monografia (Graduação). Barretos: UNIFEB.
- MELO, C. E. E. (2004). *Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto*. São Paulo: Pini.
- MIGLIORE JUNIOR, A. R.; PASTORE, M. A. (2007). *Notas de aula da disciplina de concreto protendido*. Barretos: UNIFEB.
- PFEIL, W. (1984). *Concreto protendido: Introdução*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- PROTENDIT (2008). *Catálogo de pré-fabricados*. Disponível em: <www.protendit.com.br/downs/prefabricadas.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2008.
- R4 (2008). *Laje alveolar R4: laje protendida - sem escoramentos*. Disponível em: <www.r4tecno.com.br/laje.alveolar/>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- ROCHA, A. M. (1972). *Novo curso prático de concreto armado*. Vol. 5: Concreto protendido. Rio de Janeiro: Científica.
- SILVA, M. A. F. (2005). *Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: UFSCar.
- TATU (2008). *Laje alveolar protendida*. Disponível em: <www.tatu.com.br/Paineis%20Alveolares%20Tatu.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2008.