

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ricardo Luckmann Fischer

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS: ANÁLISE COMPARATIVA DOS
CRITÉRIOS DAS NORMAS BRASILEIRA, EUROPÉIA E
AMERICANA**

Porto Alegre

julho 2011

RICARDO LUCKMANN FISCHER

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS: ANÁLISE COMPARATIVA DOS
CRITÉRIOS DAS NORMAS BRASILEIRA, EUROPÉIA E
AMERICANA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rubem Clécio Schwingel

Porto Alegre
julho 2011

RICARDO LUCKMANN FISCHER

**DIMENSIONAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS: ANÁLISE COMPARATIVA DOS
CRITÉRIOS DAS NORMAS BRASILEIRA, EUROPÉIA E
AMERICANA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de julho de 2011

Prof. Rubem Clécio Schwingel
M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rubem Clécio Schwingel
M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, João e Janice, que foram os responsáveis por toda a minha educação e sempre proporcionaram todas as condições para obter essa grande conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Prof. Rubem Schwingel, orientador deste trabalho, pelo tempo dedicado a mim e pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

À Empresa RS Engenharia SC Ltda, pela a oportunidade de estágio e o aprendizado enriquecedor.

À Profa. Carin pela competência, dedicação e disponibilidade para coordenar os trabalhos de conclusão do nosso Curso.

Aos meus pais, João e Janice, pelo apoio e compreensão dos momentos em que estive ausente devido realização deste trabalho.

À minha namorada, Liz, pelo amor e companheirismo durante o período de execução deste trabalho, quando o estudo foi prioridade.

Aos meus amigos, em especial o Matheus Domingues, que sempre me motivaram para a realização deste trabalho.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

FISCHER, R. L. **Dimensionamento de lajes alveolares protendidas**: análise comparativa dos critérios das normas brasileira, européia e americana. 2011. 62 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho consiste na análise dos critérios de verificação de lajes alveolares protendidas das normas americana (*Manual for the Design of Hollow Core Slabs*), européia (EN 1168) e brasileira (Projeto ABNT NBR 14.861), tendo como finalidade comparar os resultados calculados por essas verificações e os valores obtidos em ensaio de laboratório. Neste trabalho são abordados conceitos básicos de protensão, além de apresentar a utilização de elementos pré-moldados e as vantagens do uso de lajes alveolares na construção civil. Após a apresentação dos critérios de análise da segurança à ruptura por esforço cortante e momento fletor das lajes alveolares das três normas estudadas, será possível determinar os esforços resistentes máximos. Essa determinação é realizada através da aplicação dos critérios de verificação em lajes alveolares de características iguais às lajes ensaiadas em laboratório. Ou seja, serão utilizados para os cálculos, as medidas e especificações dos materiais iguais às lajes ensaiadas. As lajes alveolares estudadas apresentam quatro tipos de seções: sem capeamento, com capeamento, com 2 e com 4 alvéolos preenchidos. Então, a partir dos esforços teóricos calculados, pode-se compará-los com os resultados de ensaios de lajes alveolares realizados pelo laboratório da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), NETPRE. Sendo assim, o objetivo de encontrar quais critérios apresentam resultados teóricos mais próximos da realidade poderá ser alcançado.

Palavras-chave: lajes alveolares; pré-fabricado; concreto protendido; EN 1168; *Manual for the Design of Hollow Core Slabs*; Projeto NBR 14.861.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: construção com peças pré-fabricadas em Porto Alegre	15
Figura 2: estrutura com elementos de concreto pré-fabricado em Canoas	16
Figura 3: diagrama do estudo	19
Figura 4: diagrama de tensões normais devido à protensão	23
Figura 5: exemplo de laje alveolar	24
Figura 6: laje alveolar em fase inicial de montagem em obra em Canoas	25
Figura 7: diferentes seções transversais de lajes alveolares e a colocação por guindaste em Canoas	26
Figura 8: gráfico comparativo de desempenhos	27
Figura 9: laje com alvéolos preenchidos	34
Figura 10: pista de extrusão de uma fabrica de lajes alveolares em Porto Alegre	39
Figura 11: desenho esquemático do <i>setup</i> dos ensaios de cisalhamento e flexão.....	46
Figura 12: definição dos grupos ensaiados	46
Figura 13: seção transversal das lajes ensaiadas	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: relação de itens traduzidos da Norma europeia para o Projeto de Norma brasileira	42
Quadro 2: dados de entrada das lajes sem capa (1/2)	48
Quadro 3: dados de entrada das lajes sem capa (2/2)	49
Quadro 4: dados de entrada das lajes com capa (1/2)	50
Quadro 5: dados de entrada das lajes com capa (2/2)	51
Quadro 6: dados de entrada das lajes com 2 alvéolos preenchidos (1/2)	52
Quadro 7: dados de entrada das lajes com 2 alvéolos preenchidos (2/2)	53
Quadro 8: dados de entrada das lajes com 4 alvéolos preenchidos (1/2)	53
Quadro 9: dados de entrada das lajes com 4 alvéolos preenchidos (2/2)	54
Quadro 10: esforços cortantes (teóricos x experimentais)	55
Quadro 11: momentos fletores (teóricos x experimentais)	56
Quadro 12: coeficientes λ para cortante	57
Quadro 13: coeficientes λ para momento fletor	59

LISTA DE SÍMBOLOS

NORMA EUROPÉIA

área da seção transversal da laje (mm^2).

área da armadura (mm^2);

;

b = largura da seção transversal no eixo centróide (mm);

= largura dos alvéolos preenchidos (mm);

espessura total da nervura (mm);

= 0,9 = fator de redução referido ao comprimento de transmissão;

;

coeficiente de minoração do concreto;

distância da armadura até a superfície superior da laje (mm);

resistência à compressão característica do concreto (MPa);

= valor de cálculo da resistência à tração do concreto (MPa);

h = espessura da laje (mm);

I = momento de segunda ordem (momento de inércia) da seção transversal (mm^4);

= momento de segunda ordem (momento de inércia) da seção para o elemento com capa estrutural (mm^4);

———, (em mm);

valor recomendado segundo item 6.2.2 da norma européia de pré-fabricados;

distância da seção considerada e o ponto de início do comprimento de transmissão (extremidade do elemento) (mm);

valor limite superior do comprimento de transmissão igual a 1,2 do comprimento de transmissão de acordo com a equação 8.18 da EN 1992-1-1 (mm);

força de protensão (N);

= número de alvéolos preenchidos;

taxa de armadura;

momento de primeira ordem (momento estático) da metade superior da seção transversal, em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade da mesma (mm³);

= momento de primeira ordem (momento estático) da metade superior da seção transversal com capa estrutural, em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade da mesma (mm³);

tensão de compressão devido à força de protensão (MPa);

= valor da tensão devido às cargas atuantes (MPa);

= valor da resistência da tensão ao cortante (MPa);

$V_{Rd,c}$ = valor de cálculo da resistência ao cortante (cisalhamento em região fissurada) (N);

= valor mínimo de projeto da resistência ao cortante (em região fissurada) (N);

= valor da força cortante devido ao peso-próprio (elemento + capa estrutural) (N);

= valor da resistência ao esforço cortante com n alvéolos preenchidos (N);

= 0,8 = fator de redução.

NORMA AMERICANA

= área da seção transversal (in²);

= área da armadura de protensão (in²);

= altura do bloco de tensão de compressão equivalente (in);

= largura da zona comprimida (in);

- = largura total da nervura (in);
- = fator dependente de β definido no item 10.2.7.3 do ACI (318-95);
- = fator para o tipo de cordoalha de protensão;
- = distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura ativa tracionada (in);
- = distância entre a tensão máxima de compressão e o centróide dos cabos de protensão (in);
- = distância entre a linha neutra e o centróide da armadura de protensão (in);
- = resistência à compressão de cálculo especificada do concreto (psi);
- = tensão de compressão do concreto no centróide da seção devido à protensão efetiva para seções não-compostas, ou devido à protensão efetiva e aos momentos resistidos por seção única pré-moldada para seções compostas (psi);
- = tensão da armadura de protensão com a força nominal (psi);
- = tensão de tração especificada do aço de protensão (psi);
- = tensão efetiva do aço de protensão depois de todas as perdas (psi);
- = fator de redução;
- = momento de inércia da seção transversal (in⁴);
- = momento de fissuração (lbf.in);
- = momento fletor (valor nominal) (lbf.in);
- = momento fletor último (lbf.in);
- = força efetiva no aço de protensão depois de todas as perdas (lbf);
- = taxa de armadura de protensão;
- = módulo resistente (momento estático) da seção transversal (in³);

= esforço cortante nominal do concreto (lbf);

= esforço cortante nominal do concreto em nervura fissurada na ruptura por cortante (lbf);

= esforço cortante nominal de um elemento (lbf);

= esforço cortante nominal dos estribos (lbf);

= esforço cortante resistente de projeto (lbf);

= distância entre a linha neutra e a fibra mais inferior (in);

ω_p =

PROJETO NORMA BRASILEIRA

área de concreto da seção transversal (mm²);

= seção transversal do aço protendido (mm²);

; com d em metros (m);

= 1,2 para seções em forma de T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares (lajes alveolares são consideradas duplo T);

= largura total da nervura da laje (mm);

= altura efetiva da laje (mm);

= resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa);

= resistência característica à compressão do concreto (MPa);

= resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado (MPa);

\bar{f}_c = resistência média à compressão do concreto (MPa);

= momento de inércia da seção (cm⁴);

= momento de protensão, em peças isostáticas igual ao normal vezes a excentricidade, em peças hiperestáticas igual ao momento final (isostático mais o hiperestático) (N.mm);

= momento de fissuração (N.mm);

= força normal de protensão (N.mm);

= armadura específica da seção alveolar pré-moldada;

= tensão de compressão do concreto devido à força de protensão (MPa);

= resistência ao cisalhamento em zona de flexão da laje alveolar (N);

;

;

= distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada (mm).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 MÉTODO DE PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivos secundários	17
2.3 PRESSUPOSTO	18
2.4 PREMISA	18
2.5 DELIMITAÇÕES	18
2.6 LIMITAÇÕES	18
2.7 DELINEAMENTO	19
3 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES	21
3.1 PRÉ-FABRICADO	21
3.2 PROTENSÃO	22
3.3 LAJE ALVEOLAR	24
4 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO	28
4.1 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DA NORMA EN 1168	28
4.1.1 Resistência esforço cortante em região não fissurada	29
4.1.2 Resistência ao esforço cortante em região fissurada	30
4.1.3 Resistência ao esforço com acréscimo de seção transversal	31
4.2 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO <i>MANUAL FOR THE DESIGN OF HOLLOW CORE SLABS</i>	34
4.2.1 Verificação da resistência à flexão	35
4.2.3 Determinação do cortante	38
4.3 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO PROJETO DE NORMA NBR 14.861..	41
4.3.1 Verificação de cálculo da resistência à força cortante	42
4.3.2 Verificação de cálculo da resistência à flexão	43
5 APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS	45
6 VERIFICAÇÕES	48
6.1 ESFORÇO CORTANTE	54
6.2 MOMENTO FLETOR	55
7 ANÁLISE COMPARATIVA	57
7.1 ANÁLISE DO CORTANTE	57

7.2 ANÁLISE DO MOMENTO FLETOR	58
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem passado por um processo de evolução nas últimas décadas, impulsionado principalmente pela industrialização. No Brasil, o desenvolvimento dessa industrialização da construção é apontado por Bruna (1976, p. 111) como dependente de três fatores: a aceleração do processo construtivo, a necessidade de reduzir os custos de execução e a racionalização dos recursos disponíveis em termos de materiais de construção. Para atender a essas necessidades, uma das soluções adotadas no setor da construção civil, além da gestão da produção, é o emprego de elementos pré-fabricados. As figuras 1 e 2 são exemplos de obras nas quais, praticamente, todos elementos são pré-fabricados.



Figura 1: construção com peças pré-fabricadas em Porto Alegre

A partir da crescente utilização de pré-fabricados pela Engenharia Civil é que foram escolhidas as lajes alveolares protendidas como objeto de estudo para este trabalho de conclusão. As lajes alveolares são um dos elementos pré-fabricados de maior aplicação nas últimas décadas. Elas possuem custo relativamente baixo em comparação com outros tipos de lajes convencionais. Este sistema tem como vantagem principal, em relação a sistemas tradicionais, vencer grandes vãos com elevados carregamentos. A justificativa disso é a

utilização de armadura ativa de protensão aliada com os alvéolos internos, formando um elemento geométrico de concreto de maior resistência e menor peso próprio (TATU PRÉ-MOLDADOS LTDA, 2010, p. 3).



Figura 2: estrutura com elementos de concreto pré-fabricado em Canoas

Nos Estados Unidos, onde a utilização desse tipo de laje já é consagrada, existem normas técnicas para o seu dimensionamento. Nos países europeus, onde o emprego dessa tecnologia também já é uma realidade disseminada, normas técnicas estão disponíveis. Apesar da crescente utilização desse elemento construtivo no Brasil, não existe uma norma brasileira específica para lajes alveolares protendidas. Dentre as normas brasileiras, o que se encontra de mais semelhante são aquelas que regulam os elementos de concreto pré-fabricados.

Atualmente, a proposta de uma NBR específica para as lajes alveolares protendidas está em andamento, sendo elaborada por diversos profissionais da área. Portanto, o presente trabalho de conclusão faz uma análise do projeto de norma em elaboração no Brasil e das normas americana e européia, através da comparação de valores resultantes das suas verificações aos resultados de ensaios de laboratório de lajes alveolares. Inicialmente são apresentados esses critérios, além de conceitos básicos de protensão e características das lajes alveolares. Em seguida são calculados os esforços resistentes para cortante e flexão, a partir das mesmas características das lajes ensaiadas em laboratório. Por fim, é apresentado uma análise comparativa, tendo como objetivo apontar quais critérios apresentam resultados mais próximos dos valores reais.

2 MÉTODO DE PESQUISA

O desenvolvimento da pesquisa que foi realizada neste trabalho tem seus elementos básicos apresentados neste capítulo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: após a análise dos critérios de verificação de lajes alveolares protendidas das normas estudadas, quais critérios apresentam resultados teóricos mais próximos dos obtidos em ensaios?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho apresenta um objetivo principal e dois objetivos secundários, os quais são listados a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a determinação de quais critérios de verificação de lajes alveolares protendidas, dentre as normas estudadas, apresentam resultados mais próximos aos obtidos em ensaios.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) apresentação dos critérios de verificação de lajes alveolares protendidas das normas estudadas,
 - brasileira NBR 14861:2009, em elaboração;
 - europeia EN 1168:2005;

- americana *Manual for the Design of Hollow Core Slabs* (1998);
- b) apresentação dos resultados de ensaios de verificação de lajes alveolares protendidas.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as três normas estudadas são adequadas para o dimensionamento de lajes alveolares, ainda que apresentem diferenças entre seus critérios.

2.4 PREMISSE

O trabalho apresenta como premissa a necessidade da elaboração de uma norma brasileira específica para lajes alveolares, visto sua grande importância devido ao crescente emprego desse tipo de estrutura no setor da construção civil no Brasil.

2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se ao estudo de lajes alveolares com as características daquelas ensaiadas na UFSCar e que servirão de referência no trabalho.

2.6 DELIMITAÇÕES

As verificações das lajes alveolares realizadas neste trabalho limitam-se aos critérios de análise da segurança à ruptura por:

- a) cisalhamento;
- b) flexão.

Os resultados de ensaio, que serão analisados ao longo da pesquisa, foram obtidos em procedimento desenvolvido somente no laboratório NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto), da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos).

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, representadas na figura 3:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) apresentação dos critérios de verificação,
 - NBR 14861:2009;
 - EN 1168:2005;
 - *Manual for the Design of Hollow Core Slabs (1998)*;
- c) definição das características das lajes a serem verificadas;
- d) verificação pelas três normas e apresentação dos resultados dos ensaios de laboratório;
- e) análise e comparação entre os resultados dos ensaios e as verificações;
- f) conclusões finais.

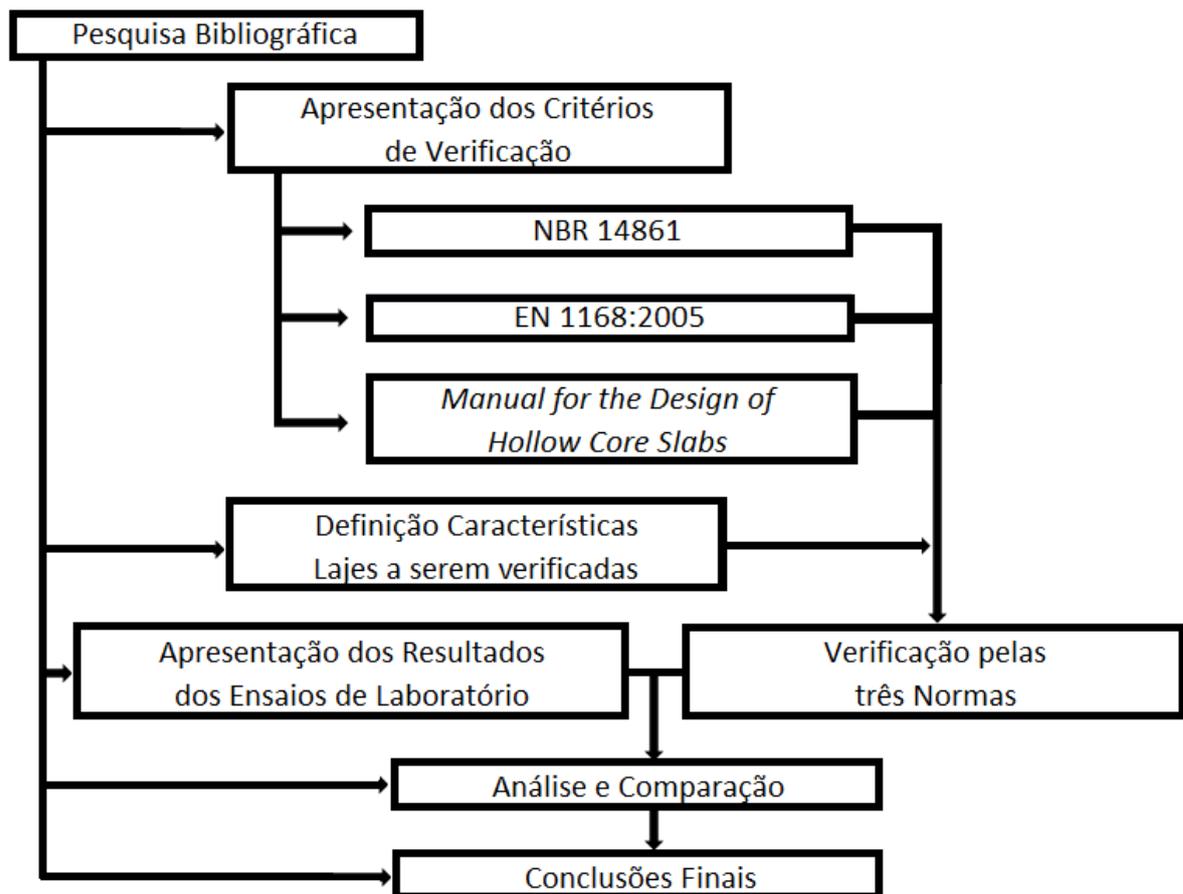


Figura 3: diagrama do estudo

O primeiro passo do trabalho foi a **pesquisa bibliográfica**, a qual foi a base para realização do trabalho, fornecendo os conceitos específicos necessários. Em seguida, com a **apresentação dos critérios para a verificação** das lajes foi possível analisar as suas diferenças, e retirar as fórmulas e condições de verificação necessárias para a determinação da resistência de projeto das lajes ensaiadas.

A **definição das características das lajes a serem verificadas** foi a etapa seguinte. Ela forneceu os dados de entrada para os cálculos de verificação das lajes. A etapa principal do trabalho consistiu na **determinação da resistência** – através dos critérios definidos anteriormente – das lajes com características indicadas na etapa anterior. Em seguida, foram apresentados os **resultados obtidos nos ensaios** de lajes realizados no laboratório da UFSCar.

Após a obtenção dos esforços resistentes máximos e a apresentação dos resultados dos ensaios, foi possível a **comparação** entre os critérios utilizados de cada norma, além da comparação entre os resultados da verificação e os obtidos nos ensaios de laboratório. Obteve-se, então, a conclusão de quais **critérios são mais próximos da realidade**, ou seja, mais adequados. Após a análise comparativa realizada ao término do trabalho, chegou-se às **considerações finais**.

3 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

Definições e conceitos básicos necessários para o estudo proposto nesse trabalho são descritos ao longo deste capítulo. Primeiramente, apresentam-se definições de **pré-fabricados** pela bibliografia consultada. Em seguida, o conceito da protensão é descrito, assim como suas vantagens e tipos de aplicação. Por último, as definições dos elementos, as características e vantagens das lajes alveolares protendidas são apresentadas.

3.1 PRÉ-FABRICADO

A pré-fabricação é definida como a confecção e acabamento industrializados e em série, a partir de métodos pré-estabelecidos, de unidades completas ou elementos, para a posterior montagem (BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO, 1978, p. 7).

Segundo Bruna (1976, p. 19), “A ‘pré-fabricação’ dos elementos de uma construção constitui uma fase de ‘industrialização’, uma vez que não está, como esta, associada aos conceitos de organização e de produção em série.”. O mesmo autor ainda afirma que um número qualquer de elementos especificamente projetado e executado não deverá ser considerado como produção industrial, será simplesmente pré-fabricado.

As denominações **pré-moldado** e **pré-fabricado** são, na maioria das vezes, tidas como sinônimos. Entretanto, a NBR 9062 faz uma distinção entre elas com base no controle de qualidade da execução do elemento e no seu local de produção. De acordo com essa Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 4), 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 das especificações [...]”, sendo algumas dessas especificações, a mão de obra qualificada e matéria-prima ensaiada e certificada. 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.

Em relação à história dos **pré-fabricados**, Vasconcelos (2002, p. 13) relata que “A primeira notícia que se tem de uma obra grande com a utilização de elementos pré-moldados no Brasil refere-se à execução do hipódromo da Gávea, no Rio de Janeiro [...]”.

3.2 PROTENSÃO

Segundo Pfeil (1980, p. 36), no final do século XIX, as primeiras experiências com concreto protendido foram realizadas. De acordo com Leonhardt (1983, p. 11), “A idéia de protensão é muito antiga; já se pensava há muito tempo em arcos de barril tensionados e arcos pré-encolhidos para rodas de madeira.”.

Leonhardt (1983, p. 11) ainda comenta que inúmeras tentativas de criação de patentes e ensaios não obtiveram êxito, pois a protensão era perdida devido aos efeitos da retração e da fluência do concreto e da relaxação do aço (desconhecidos na época). Ele ainda diz que, somente após a pesquisa sobre esses efeitos realizadas por Freyssinet, as hipóteses fundamentais necessárias para o êxito obtido pelo concreto protendido foram estabelecidas corretamente, as quais foram patenteadas em 1928. Por fim, esse mesmo autor lembra que Freyssinet foi quem executou a primeira obra de concreto protendido da história.

Para Pfeil (1980, p. 5), “O artifício da protensão, aplicado ao concreto, consiste em introduzir esforços que anulem ou limitem drasticamente as tensões de tração do concreto, de modo a eliminar [ou limitar] a abertura das fissuras [...]”. Essa afirmação é complementada por Leonhardt (1983, p. 3), que explica que o conceito da protensão é comprimir as zonas tracionadas do elemento, através de uma tensão prévia (protensão), de maneira que os esforços externos de tração tenham, em primeiro lugar, de anular estas tensões de compressão antes que surjam tensões de tração no concreto. Essas trações são normalmente devidas às cargas de peso próprio (g) e atuantes (q), como mostrado na figura 4.

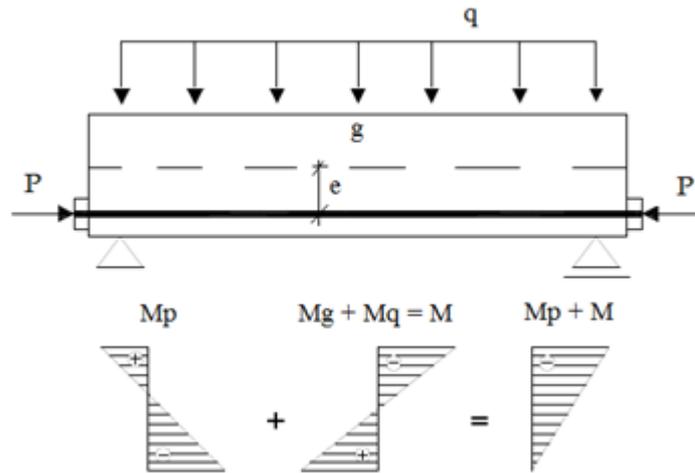


Figura 4: diagrama de tensões normais devido à protensão

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4), elementos de concreto protendido são:

Aqueles 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).

Pfeil (1980, p. 1) indica que a protensão é um artifício capaz de melhorar o desempenho em serviço de uma estrutura. Leonhardt (1983, p. 6) aponta que uma das vantagens do concreto protendido é que “Devido ao emprego de materiais de resistência elevadas (tanto o aço como o concreto), o concreto protendido permite vãos maiores e estruturas mais esbeltas, de menor peso próprio do que as de concreto armado.”.

Em relação aos processos de protensão, Rocha (1972, p. 13) afirma existirem três processos gerais de fabricação: por aderência inicial, por aderência posterior e sem aderência. Como para as lajes alveolares o processo de protensão é a protensão com aderência inicial, Leonhardt (1983, p. 7) explica que esse processo, também conhecido como protensão em bancada, consiste em tensionar-se as cordoalhas de protensão antes do endurecimento do concreto, através do tensionamento dos cabos entre blocos de ancoragem. Depois do endurecimento suficiente do concreto, as cordoalhas são soltas, de forma que a força de protensão passe para o concreto por aderência.

Também é importante, para o estudo da protensão, o estudo dos fenômenos reológicos (fluência e retração do concreto e relaxação do aço) dos materiais. No instante da protensão, o

concreto encurta, levando consigo a armadura de protensão, resultando isto em uma perda imediata da força de protensão. Mantidos as tensões aplicadas, o concreto continua encurtando, devido aos fenômenos reológicos dos materiais e, conseqüentemente, a força de protensão continua sofrendo perdas. A existência desses fenômenos obriga o uso de aços de alta resistência (LEONHARDT, 1983, p. 5).

3.3 LAJE ALVEOLAR

A **laje alveolar** (figura 5) é um elemento protendido de seção transversal com altura constante constituída por uma talão superior e uma talão inferior, ligados por nervuras verticais, constituindo assim uma seção com núcleos vazios longitudinais (alvéolos), constante e com um eixo de simetria vertical (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 8).

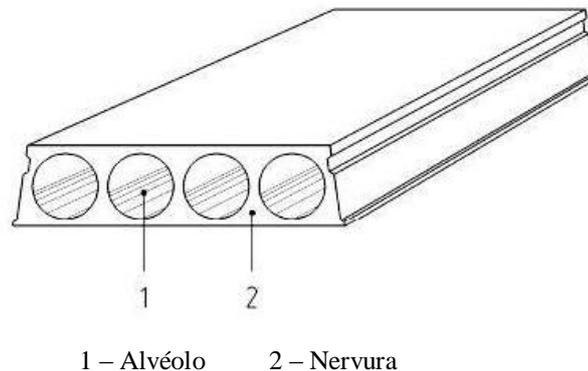


Figura 5: exemplo de laje alveolar (adaptada de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 8)

As lajes alveolares têm seus elementos definidos pela norma européia como (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 8):

- a) **alvéolo** é o furo longitudinal produzido por técnicas industriais específicas, distribuídas em um formato regular padrão, com a finalidade de reduzir o peso próprio do elemento, sem perda significativa na inércia;
- b) **nervura** é a região vertical de concreto entre dois alvéolos adjacentes (nervuras intermediárias) ou na borda lateral da laje (nervuras externas);

- c) **junta longitudinal** é o perfil lateral das bordas longitudinais das lajes alveolares com formato que possibilita o rejuntamento entre duas lajes adjacentes, forçando o funcionamento conjunto.

Como elementos acessórios à laje (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 8):

- a) **capeamento** é o concreto moldado *in loco* sobre a laje alveolar com a intenção de aumentar a sua resistência a carregamentos, formando assim uma laje alveolar composta;
- b) **contrapiso** é o concreto moldado *in loco* ou camada de argamassa usada para nivelar a face superior da laje pronta, sem função estrutural.

A figura 6 é um exemplo de laje alveolar recém apoiada na estrutura, sendo possível visualizar o espaçamento para o enchimento da junta longitudinal e as esperas das vigas que serão ligadas a armadura do capeamento estrutural colocado acima das lajes. Os mesmos tipos de esperas das vigas, além da colocação, no pavimento mais inferior, de um elemento de laje sustentada por guindaste são mostrados na figura 7.



Figura 6: laje alveolar em fase inicial de montagem em obra em Canoas



Figura 7: diferentes seções transversais de lajes alveolares e a colocação por guindaste em Canoas

As vantagens das lajes alveolares em comparação com lajes tradicionais são inúmeras. Pode-se verificar que para lajes alveolares existe uma maior facilidade de transporte em relação aos sistemas tradicionais, os quais necessitam do recebimento, transporte e estocagem de inúmeros componentes da laje. Para a laje alveolar, somente os painéis e o aço para o capeamento (quando existir) deverão ser recebidos com o auxílio de guindaste, simplificando assim o recebimento e diminuindo o estoque. As lajes alveolares ainda fornecem simplicidade e rapidez na montagem. Por exemplo, o rendimento de uma equipe de três operários é de 50 m²/h, equivalente a 400 m² em 8 horas. Outra vantagem é a não necessidade de cimbramento, pois as lajes são auto-portantes, o que leva a eliminação de outros serviços como carpintaria, armação e revestimento, além do recebimento, transporte e estocagem dos materiais envolvidos nesses serviços. Pode-se conferir, na figura 8, o melhor desempenho das lajes alveolares em comparação com outros tipos de lajes, atingindo grandes vãos (TATU PRÉ-MOLDADOS LTDA, 2010).

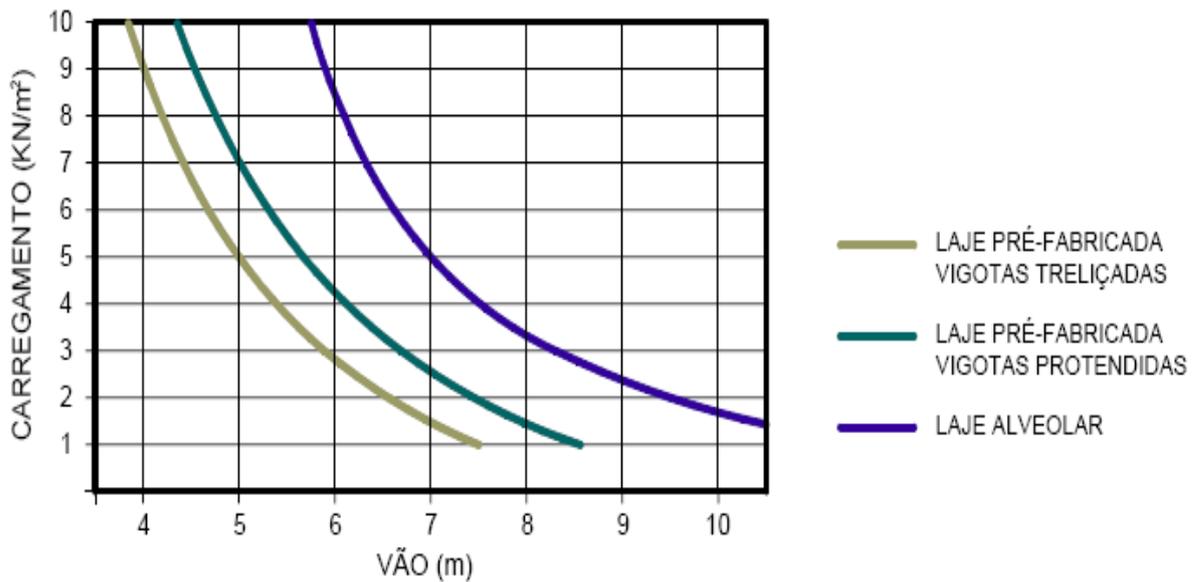


Figura 8: gráfico comparativo de desempenhos (TATU PRÉ-MOLDADOS, 2010, p. 3)

A versatilidade devido à aplicabilidade em qualquer tipo de sistema construtivo e a possibilidade de passagem de dutos e aberturas de *shafts* (furos para passagem de dutos), somada ao conforto devido ao excelente desempenho no isolamento térmico e acústico são outras vantagens das lajes alveolares. Acrescenta-se que por serem elementos pré-fabricados, os rígidos controles de fabricação garantem alto padrão de qualidade (LAJEAL PRÉ FABRICADOS DE CONCRETO LTDA, 2010).

4 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

A aplicação e projeto da laje alveolar pré-fabricada e protendida é similar a outras estruturas protendidas. Entretanto, há situações que são únicas para as lajes alveolares protendidas tanto pela maneira que as lajes são produzidas como pela sua aplicação (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, introduction). Esse motivo justifica a existência de norma técnica específica para lajes alveolares.

As normas técnicas para lajes alveolares existentes nos Estados Unidos e na Europa são estudadas neste trabalho. Em complementação ao estudo, são estudados os critérios do Projeto de Norma para lajes alveolares que está sendo elaborado no Brasil. Como o foco principal deste trabalho é a comparação dos critérios de dimensionamento de laje alveolar com os resultados experimentais dos ensaios destrutivos, são apresentados neste capítulo os critérios das três normas estudadas para as verificações das resistências à ruptura ao cisalhamento e à flexão.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DA NORMA EN 1168

A norma europeia para o dimensionamento de lajes alveolares é a EN 1168 *Precast concrete products – Hollow core slabs*. Ela foi elaborada pelo *European Committee for Standardization* (Comitê Europeu de Normalização), formado por organismos de normalização de 30 países, para padronizar o processo de fabricação e utilização das lajes alveolares em toda a Europa. Essa Norma existe em três versões oficiais (inglês, francês e alemão). Para esse trabalho foi consultada a versão na língua inglesa. Assim, neste item são apresentadas as verificações relativas à resistência mecânica ao esforço cortante – contidos no item 4.3.3.2.2.1 e no anexo F da EN 1168 – (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005). É importante ressaltar que essa Norma não menciona nenhum tipo de verificação em relação ao momento fletor, porém as próximas duas normas a serem apresentadas neste trabalho apresentam seus critérios para esse tipo de verificação.

4.1.1 Resistência ao esforço cortante em região fissurada

Para lajes alveolares sem armadura para esforço cortante (sem estribos), a resistência ao cisalhamento para regiões fissuradas deve ser calculada utilizando a equação 1, com valor mínimo determinado pela equação 2 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 85):

$$- \quad \text{(equação 1)}$$

$$- \quad \text{(equação 2)}$$

Onde:

= valor de projeto da resistência ao esforço cortante (em região fissurada) (N);

= valor mínimo de projeto da resistência ao esforço cortante (em região fissurada)

(N);

;

coeficiente de minoração do concreto;

_____, (em mm);

taxa de armadura;

área da armadura (mm²);

espessura total da nervura (mm);

distância da armadura até a superfície superior da laje (mm);

resistência à compressão característica do concreto (MPa);

valor recomendado segundo item 6.2.2 da norma europeia de pré-fabricados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 85);

tensão de compressão devido à força de protensão (MPa);

força de protensão (N);

área da seção transversal da laje (mm²).

4.1.2 Resistência ao esforço cortante em região não fissurada

A resistência ao cisalhamento, a qual é demonstrada aqui, corresponde ao item 4.3.3.2.2.1 da EN 1168 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 14). Para lajes alveolares protendidas de vão único, sem armadura de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento das regiões sem fissuras devido à flexão (onde a tensão de tração à flexão é menor que f_{ct} , ou seja $\sigma < f_{ct}$) deve ser calculada pela equação 3:

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rd1}}{\gamma_c} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

V_{Rd1} = resistência ao cortante (cisalhamento em região fissurada) (N);

γ_c fator de minoração;

I = momento de segunda ordem (momento de inércia) da seção transversal (mm⁴);

b largura total da nervura (mm);

M_{Ed} momento de primeira ordem (momento estático) da metade superior da seção transversal, em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade da mesma (mm³);

f_{ct} = valor de cálculo da resistência à tração do concreto (MPa);

α coeficiente de minoração do concreto;

β fator de minoração referente ao comprimento de transmissão;

;¹

¹ O valor de β é calculado de acordo com o item 6.2.2 da norma europeia de pré-fabricados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 85).

distância da seção considerada e o ponto de início do comprimento de transmissão (extremidade do elemento) (mm);

valor limite superior do comprimento de transmissão igual a 1,2 do comprimento de transmissão de acordo com a equação 8.18 da EN 1992-1-1 (mm);²

tensão de compressão devido à força de protensão (MPa);

força de protensão (N);

área da seção transversal da laje (mm²).

4.1.3 Resistência ao esforço cortante com acréscimo da seção transversal

O anexo F da EN 1168 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 42) apresenta as resistências aos esforços cortantes de acordo com a situação em que a laje encontra-se: situação de alguns alvéolos preenchidos ou situação com capa estrutural. Essas disposições são artifícios utilizados para aumentar a área da seção transversal, com a finalidade de aumentar a capacidade resistiva da laje alveolar.

O item F.2 dessa mesma Norma, que trata das tensões resistentes de cisalhamento das lajes alveolares com capeamento, apresenta dois tipos de falhas que podem ocorrer. O primeiro tipo é quando a tensão de cisalhamento supera a resistência à tração do concreto na nervura do alvéolo. O segundo é quando a tensão de cisalhamento na junta entre as superfícies da laje e da capa é excedida. Para esse segundo tipo, deve-se utilizar os critérios de verificação para o cortante em interface entre elementos concretados em diferentes períodos, ou seja, concretos com idades diferentes. Esses critérios estão presentes no item 6.2.5 da EN 1992-1-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 92). Para evitar o primeiro tipo de falha citado, a EN 1168 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 42) exige que a resistência da tensão ao cortante () seja maior que a tensão das cargas atuantes (), ou seja, . Para o cálculo dessas tensões utilizam-se as equações 4 e 5:

² A equação 8.18 da EN 1992-1-1 é a seguinte:

(EUROPEAN COMMITTEE FOR

STANDARDIZATION, 2004, p. 148).

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{M}{V} \cdot \frac{S}{I} \quad \text{(equação 4)}$$

$$\tau = \frac{V}{I} \cdot S \quad \text{(equação 5)}$$

Onde:

= valor da tensão devido às cargas atuantes (MPa);

= valor da força cortante devida ao peso-próprio (elemento + capa estrutural) (N);

= momento de primeira ordem (momento estático) da metade superior da seção transversal sem/com capa estrutural, em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade da mesma (mm³);

= é a espessura da nervura (mm);

= momento de inércia da seção transversal para o elemento sem capa/com capa estrutural (mm⁴);

= valor da força cortante devida às cargas adicionais (N);

= valor da resistência da tensão ao cortante (MPa);

= valor de cálculo da resistência à tração do concreto (MPa);

= 0,8 = fator de redução;

= 0,9 = fator de redução referido ao comprimento de transmissão;

;³

distância da seção considerada e o ponto de início do comprimento de transmissão (extremidade do elemento) (mm);

³ O valor de τ é calculado de acordo com o item 6.2.2 da norma europeia de pré-fabricados (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 85).

valor limite superior do comprimento de transmissão igual a 1,2 do comprimento de transmissão de acordo com a equação 8.18 da EN 1992-1-1 (mm);⁴

tensão de compressão devido à força de protensão (MPa);

força de protensão (N);

área da seção transversal da laje (mm²).

O cálculo da resistência ao esforço cortante para lajes alveolares com preenchimento de *n* **alvéolos** está demonstrado no item F.3 dessa mesma Norma europeia (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 43). Essa resistência é determinada pela equação 6:

$$- \quad \text{(equação 6)}$$

Onde:

= valor da resistência ao esforço cortante com *n* **alvéolos** preenchidos (N);

$V_{Rd,c}$ = valor de cálculo da resistência ao esforço cortante de acordo com o item 4.1.1 deste trabalho (N);

= número de alvéolos preenchidos;

= largura dos alvéolos preenchidos (figura 9) (mm);

= distância vertical entre a camada de cabos até a superfície superior da laje (figura 9) (mm);

= valor de cálculo da resistência à tração do concreto de preenchimento dos alvéolos (MPa).

⁴ A equação 8.18 da EN 1992-1-1 é a seguinte:

(EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p. 148).

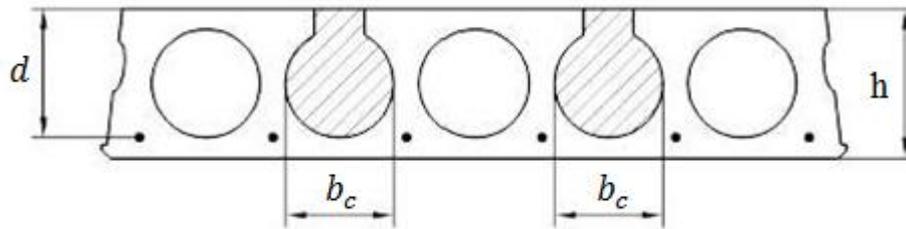


Figura 9: laje com alvéolos preenchidos (adaptada de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005, p. 43)

4.2 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO *MANUAL FOR THE DESIGN OF HOLLOW CORE SLABS*

Nos Estados Unidos, as lajes alveolares têm os critérios de dimensionamento normalizados pelo *Manual for the Design of Hollow Core Slabs*. Segundo essa Norma americana, para situações especiais, os produtores das lajes alveolares têm desenvolvido critérios de projetos e conduzido testes para verificar se suas suposições são válidas. De fato, foi comprovado que existe coerência entre os vários tipos de lajes alveolares protendidas disponíveis. Por isso, a proposta desse Manual é fornecer em conjunto aqueles aspectos em comum, que são verificados por testes e que podem ser universalmente aplicados às lajes alveolares protendidas (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, introduction).

Para o arquiteto ou engenheiro consultor, este Manual pretende ser um guia para trabalhar com as lajes alveolares, indicando o uso e aplicação, além de algumas de suas limitações. Para o engenheiro de produção, o Manual servirá como apoio e referência para lidar com os problemas de projeto diários (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, introduction).

Como considerações gerais, o Manual informa que o projeto de lajes alveolares é regulada pelo ACI 318-95⁵. Ela também informa que como elementos de concreto protendido em geral, lajes alveolares são verificadas para transferência de tensões de protensão, carga de serviço, força de cisalhamento e flexão (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-1).

⁵ ACI (318-95) é norma americana para estruturas de concreto armado, desenvolvida pelo *American Concrete Institute*, sendo adotado como norma em 1º de julho de 1995 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 1).

Para as verificações das lajes propostas neste trabalho, o conhecimento dos critérios desse Manual é necessário. Sendo assim, esta seção apresentará os critérios de dimensionamento referentes ao cisalhamento e à flexão presentes no capítulo 2 desse Manual.

4.2.1 Verificação da resistência à flexão

A capacidade de resistência ao momento fletor de uma peça protendida é uma função da tensão máxima desenvolvida na protensão das cordoalhas, conforme o item 2.2.5 do *Manual for the Design of Hollow Core*. Entre os elementos tradicionais (sem protensão) limites superior e inferior de taxa de armadura são apresentados para garantir que a tensão nas barras seja compatível com as tensões do concreto no comportamento dúctil (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-6). O valor mínimo da taxa de armadura requerido garante que quando o concreto desenvolve fissuras devido à flexão, o aço de protensão não terá atingido a sua tensão máxima de projeto. Esse **valor mínimo** exige que:

. O valor de ρ é determinado pela equação 7:

$$\rho = \frac{M_{cr}}{M_n} \left(\frac{1}{f_c} + \frac{1}{f_y} \right) \quad \text{(equação 7)}$$

Onde:

- = momento de fletor (valor nominal) (lbf.in);
- = momento de fissuração (lbf.in);
- = área da seção transversal (in²);
- = resistência à compressão de cálculo especificada do concreto (psi);
- = distância entre a linha neutra e a fibra mais inferior (in);
- = momento de inércia da seção transversal (in⁴);
- = força efetiva no aço de protensão depois de todas as perdas (lbf);
- = distância entre a linha neutra e o centróide da armadura de protensão (in);

= módulo resistente (momento estático) da região superior ao centro de gravidade da seção da seção transversal (in^3).

Caso não seja satisfeita a condição desse critério, poderão haver fissuras o que caracterizará uma ruptura à compressão de forma frágil. Porém, o item 18.8.3 do ACI (318-95)⁶ permite desconsideração desta exigência para peças submetidas à flexão com a resistência ao cisalhamento e à flexão pelo menos duas vezes maior que a necessária.

Conforme aquele mesmo item, a necessidade de um **valor máximo** de taxa de armadura⁷ está relacionada à tensão final de compressão do concreto. A utilização de um bloco de tensões de compressão uniforme faz com que uma maior parcela de concreto atinja a tensão final provocando um aumento da taxa de armadura. Por isso, quando esse limite superior é ultrapassado, a resistência ao momento deve ser baseada na seção comprimida. Para essa condição, utiliza-se a equação 8:

(equação 8)

Onde:

= fator de redução;⁸

= momento fletor (valor nominal) (lbf.in);

= distância entre a tensão máxima de compressão e o centróide dos cabos de protensão (in);

= largura da zona comprimida (in);

= resistência à compressão de cálculo especificada do concreto (psi);

= fator dependente de ω definido no item 10.2.7.3 do ACI (318-95).⁹

⁶ ACI (318-95) é norma americana para estruturas de concreto armado, desenvolvida pelo *American Concrete Institute*, sendo adotado como norma em 1º de julho de 1995 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 1).

⁷ O valor máximo da armadura exige que ω_p ou $[\omega_p + \omega' - (\omega - \omega')]$ ou $[\omega_{pw} + \omega' - (\omega_w - \omega'_w)]$ sejam menores que $0,36\beta_1$ (PRECAST/ PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-6).

⁸ Fator de redução retirado da seção 9.3 do ACI 318-95 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 92).

Para a determinação do momento fletor último resistido pela laje alveolar a ser dimensionada, deve-se seguir a seguinte sequência de cálculos descrita no item 2.2.1.4 do *Manual for the Design of Hollow Core* (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-1):

- a) calcular o valor nominal do **momento fletor** que é calculado pela equação 9, que depende das equações 10 e 11;
- b) calcular o valor do **momento último** que deve satisfazer as seguintes condições,

$$- \quad ;$$

$$- \quad 10$$

As equações citadas são:

$$\text{---} \quad \text{(equação 9)}$$

$$\text{-----} \quad \text{(equação 10)}$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{(equação 11)}$$

Onde:

= fator de redução (das forças para flexão = 0,9);¹¹

= momento fletor último (lbf.in);

= momento fletor (valor nominal) (lbf.in);

⁹ Esse item do ACI (318-95) diz que o valor de ϕ deve ser de 0,85 para valores de f_c até 4000 psi. Para valores superiores a 4000 psi, deve-se reduzir o valor de ϕ a uma taxa de 0,05 para cada 1000 psi que exceder os 4000 psi, porém o valor de ϕ não pode ser menor que 0,65 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 105).

¹⁰ O valor de ϕ é calculado pela equação 26 do item 4.2.2 deste trabalho.

¹¹ Fator de redução retirado da seção 9.3 do ACI 318-95 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 92).

- = momento de fissuração (lbf.in);
- = área da armadura de protensão (in²);
- = tensão da armadura de protensão com a força nominal (psi);
- = distância entre a tensão máxima de compressão e o centróide dos cabos de protensão (in);
- = altura do bloco de tensão de compressão equivalente (in);
- = largura da zona comprimida (in);
- = fator dependente de λ definido no item 10.2.7.3 do ACI (318-95);¹²
- = tensão de tração especificada do aço de protensão (psi);
- = resistência à compressão de cálculo especificada do concreto (psi);
- = fator para o tipo de cordoalha de protensão (cordoalha de baixa relação = 0,28);
- = taxa de armadura de protensão.

4.2.2 Determinação do cortante

Nesta seção será apresentado como determina-se o esforço cortante resistente de projeto () demonstrado no item 2.3.1 do *Manual for the Design of Hollow Core Slabs* (PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-9). Segundo esse Manual, em sistemas de fabricação tradicionais (*dry cast systems*)¹³, a não utilização de estribos nos elementos é a prática normal. Isso ocorre pois os fabricantes encontram dificuldades de inserir os estribos na maioria dos processos de fabricação. Como alternativa utilizada para aumentar a resistência ao cisalhamento está a redução do número de alvéolos das lajes. Isso pode ser feito eliminando o alvéolo por completo ou preenchendo apenas alguns trechos ao longo do comprimento do alvéolo com concreto ainda no seu estado plástico (PRECAST/

¹² Esse item do ACI (318-95) diz que o valor de λ deve ser de 0,85 para valores de f_c 4000 psi. Para valores superior a 4000 psi, deve-se reduzir o valor de λ a uma taxa de 0,05 para cada 1000 psi que exceder os 4000 psi, porém o valor de λ não pode ser menor que 0,65 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 105).

¹³ Sistema mais utilizado no Brasil, que consiste no sistema de execução da laje alveolar com formas deslizantes (laje extrudada). O fato de ser nomeado *dry cast system* justifica-se pois o concreto utilizado apresenta quantidade de água muito baixa.

PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1998, p. 2-9). Na figura 10 é possível visualizar as instalações de uma fábrica de laje alveolar com o sistema tradicional, por extrusão, mencionado anteriormente.



Figura 10: pista de extrusão de uma fábrica de lajes alveolares em Porto Alegre

A partir das recomendações do capítulo 11 do ACI-318¹⁴, esse mesmo Manual americano especifica a determinação da resistência ao esforço cortante, através da realização dos seguintes passos:

- a) verificar a condição: $\phi V_n \leq \phi V_c$, sendo $\phi = 0,85$;
- b) considerar o valor de $\phi = 0$ na equação 12, visto que não há utilização de estribos;
- c) calcular o valor de ϕV_n pela equação 13. Quando a força efetiva de protensão não for menor que 40% da força de tração da armadura para flexão, deve-se ainda verificar que,
 - o termo (ϕV_n) não pode ultrapassar o valor de 1,0;
 - o valor mínimo de ϕV_n deve ser (ϕV_c) ;

¹⁴ Esse capítulo 11 apresenta os critérios para verificação do cortante e da torção da norma americana para estruturas de concreto armado (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995, p. 131).

- o valor máximo de V_c será o menor valor entre (V_{c1}) e o valor obtido na equação 14.

As equações citadas são:

(equação 12)

(equação 13)

(equação 14)

Onde:

- = esforço cortante resistente de projeto (lbf);
- = esforço cortante nominal de um elemento (lbf);
- = esforço cortante nominal dos estribos (lbf);
- = esforço cortante nominal do concreto em nervura fissurada na ruptura por cortante (lbf);
- = esforço cortante nominal do concreto (lbf);
- = momento fletor último (lbf.in);
- = distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura ativa tracionada (in);
- fator de redução para cisalhamento;
- = largura total da nervura (in);
- = resistência à compressão de cálculo especificada do concreto (psi);

tensão de compressão do concreto no centróide da seção devido à protensão efetiva para seções não-compostas, ou devido à protensão efetiva e aos momentos resistidos por seção única pré-moldada para seções compostas (ψ).

área das cordoalhas de protensão (in^2);

tensão efetiva do aço de protensão depois de todas as perdas (ψ);

área da seção transversal (in^2).

4.3 APRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DO PROJETO DE NORMA NBR 14861

Apesar da grande utilização de lajes alveolares protendidas no Brasil, ainda não existe uma norma brasileira específica. O que existe é um projeto de uma norma brasileira para essas lajes. Esse Projeto de Norma chama-se: Projeto ABNT NBR 14.861: Lajes Alveolares de Estruturas de Concreto Pré-Fabricadas – Requisitos e Procedimentos–. Atualmente, ele encontra-se em fase final de elaboração para colocação à discussão pública.

Para as verificações em relação à resistência mecânica das lajes alveolares, os critérios de dimensionamento presentes no capítulo 7 do Projeto de Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 4) são em sua grande maioria a simples tradução dos itens presentes na EN 1168 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005). Para a visualização precisa da equivalência de cada item do Projeto de Norma NBR 14.861 traduzido dos itens da norma européia EN 1168, deve-se analisar o quadro 1.

Projeto NBR 14861		Norma EN 1168	
7.1	Resistência à torção e ao esforço cortante combinado	4.3.3.2.2.2	Shear with torsion capacity
7.2	Resistência ao fendilhamento longitudinal	4.3.3.2.1	Resistance to spalling for prestressed hollow core slabs
7.3	Resistência ao esforço cortante das juntas longitudinais entre as lajes	4.3.3.2.3	Shear capacity of the longitudinal joints
7.4	Resistência à punção	4.3.3.2.4	Punching shear capacity
7.5	Resistência às ações concentradas	4.3.3.2.5	Capacity for concentrated loads
7.6	Resistência da laje alveolar apoiada em três bordos	4.3.3.2.6	Load capacity of elements supported on three edges
7.8.2	Verificação de cálculo da resistência à força cortante	F.2.2	Failure types a

Quadro1: relação de itens traduzidos da Norma européia para o Projeto de Norma brasileira

Esse Projeto de Norma ainda contém mais algumas verificações que serão apresentadas nos próximos subitens.

4.3.1 Verificação de cálculo da resistência à força cortante

Neste trabalho será verificado apenas a resistência à flexão e ao cortante. Portanto, além do único item da Norma européia do quadro 1 (item 7.8.2) referente ao esforço cortante que já foi apresentado anteriormente na seção 4.1, o Projeto brasileiro apresenta outra verificação ao cortante para lajes com capeamento ou com alvéolos preenchidos.

O Projeto de Norma observa que a utilização de capa estrutural (capeamento) contribui para a diminuição das cordoalhas de protensão, aumenta a resistência à flexão (devido ao acréscimo de momento de inércia) e reduz a deslocabilidade lateral e deformabilidade vertical da laje. Esse mesmo Projeto ainda observa que além da capa estrutural, o preenchimento dos alvéolos pode ser uma alternativa para o aumento da resistência ao cisalhamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 13).

Esse Projeto de Norma apresenta uma única expressão para a verificação da resistência à força cortante em região fissurada das lajes alveolares protendidas. Essa expressão (equação 15) generaliza todas as combinações possíveis dos casos de lajes com ou sem capeamento e

com ou sem alvéolos preenchidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 13):

(equação 15)

Onde:

= resistência ao cisalhamento em zona de flexão da laje alveolar (N);

= resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado (MPa);

, com d em metros;

= armadura específica da seção alveolar pré-moldada;

= seção transversal do aço de protensão (mm);

= tensão de compressão do concreto devido à força de protensão (MPa);¹⁵

= largura total da nervura da laje (mm);

= altura efetiva da laje (mm).

(N);

;

= resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa);

= resistência característica à compressão do concreto (MPa).

4.3.2 Verificação de cálculo da resistência à flexão

O Projeto NBR 14.861 coloca como modelo para o comportamento da flexão, o modelo em que considera-se a permanência plana da seção transversal após a deformação, sendo que ela possa funcionar nos estádios I e II, atingindo o colapso no estádio III. Para isso, é apresentado a equação 16 para o cálculo do momento de fissuração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 13):

¹⁵ Esse termo é equivalente ao termo da norma européia, e ao termo da norma americana.

(equação 16)

Onde:

= momento de fissuração (N.mm);

= 1,2 para seções em forma de T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares (lajes alveolares são consideradas duplo T);

\bar{f}_c = resistência média à compressão do concreto (MPa);

= distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada (mm);

= força normal de protensão (N);

área de concreto da seção transversal (mm²);

= momento de inércia da seção (mm⁴);

= momento de protensão, em peças isostáticas igual ao normal vezes a excentricidade, em peças hiperestáticas igual ao momento final (isostático mais o hiperestático) (N.mm).

O cálculo do momento fletor resistente é feito considerando-se a deformada de equilíbrio situada nos domínios 2 ou 3. Considerando esta condição, a resultante de tração pode ser calculada, com base na tensão aplicada no aço e, pelo equilíbrio de forças na seção, a resultante de compressão e o braço de alavanca interno podem ser determinados, obtendo-se, então, o momento resistente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 17).

5 APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS

Este capítulo faz a apresentação dos ensaios de cisalhamento e de flexão realizados no laboratório NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto), da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos).

Os ensaios que serão utilizados nesse trabalho têm seus resultados no artigo científico, publicado na revista *Concreto & Construções*, de título: *Avaliação teórico-experimental da capacidade resistente ao cisalhamento e a flexão em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido* (FERREIRA et al., 2008, p. 104).

No ensaio de cisalhamento, com o objetivo de conseguir um efeito desfavorável da flexão sobre o mecanismo de resistência ao cisalhamento, a carga foi aplicada a uma distância de $2,5.h$ do apoio (onde h é a espessura da laje alveolar). Outra característica do carregamento é que ele foi aplicado sobre toda a largura da seção da laje. No ensaio de flexão, a aplicação do carregamento foi realizada no meio do vão, solicitando toda a seção transversal (FERREIRA et al., 2008, p. 108). A figura 11 contém o desenho esquemático do *setup* (instalações) dos ensaios. Na instrumentação, o atuador (capacidade de 500 kN) sempre aplicou a força a uma taxa constante de 50 kN/min.

Foram ensaiados cinco grupos de lajes com diferentes combinações de seções transversais, divididas em três comprimentos diferente, totalizando 49 lajes alveolares. Na figura 12 é possível ver exatamente quais as seções transversais verificadas e as quantidades de cada comprimento (FERREIRA et al., 2008, p. 109). A figura 13 mostra as medidas geométricas da seção transversal das lajes estudadas.

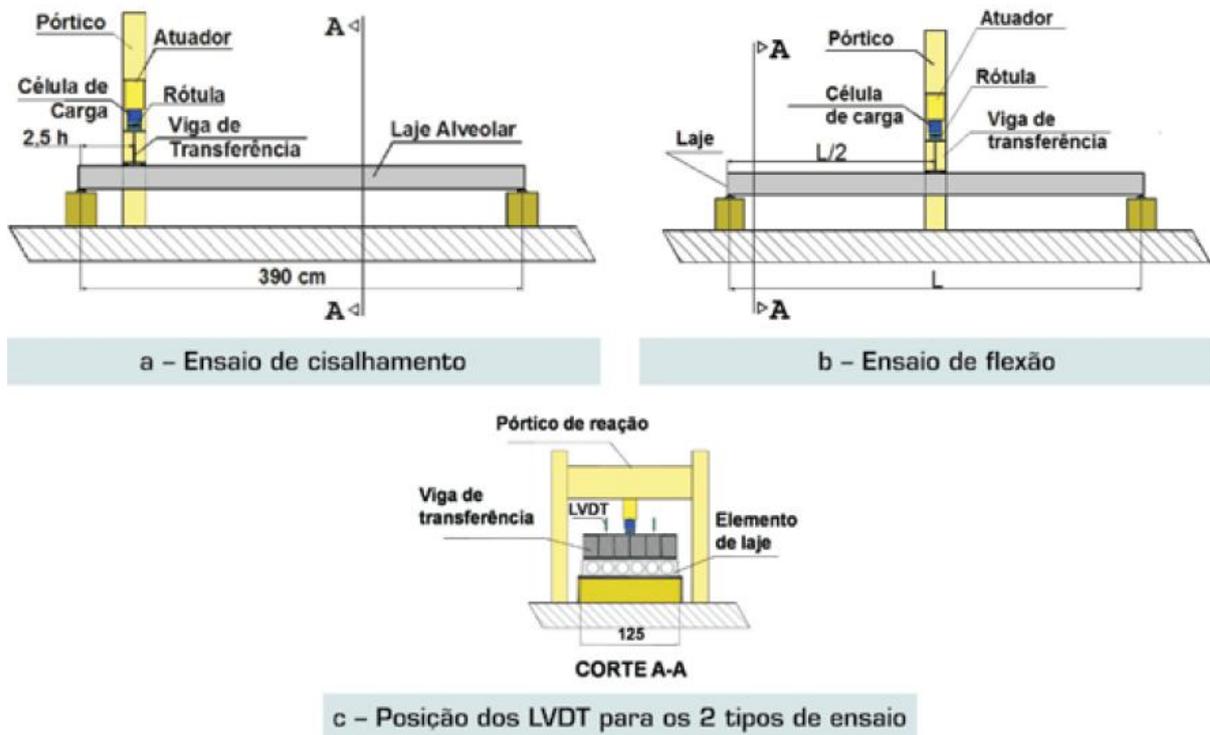


Figura 11: desenho esquemático do *setup* dos ensaios de cisalhamento e flexão (FERREIRA et al., 2008, p. 109)

Grupo	Descrição	Quantidade		
		A	B	C
1	Sem capa estrutural	5	5	2
2	Com capa estrutural e tela soldada	5	5	1
3	Com capa estrutural e com fibras metálicas	5	5	—
4	Sem capa estrutural e 2 alvéolos preenchidos	5	3	—
5	Sem capa estrutural e 4 alvéolos preenchidos	5	3	—
Total de lajes ensaiadas		25	21	3

A - Ensaio a força cortante (vão de 4,0 m); B - Ensaio ao momento fletor (vão de 3,0 m);
 C - Ensaio ao momento fletor (vão de 6,0 m).

Figura 12: definição dos grupos ensaiados (adaptada de FERREIRA et al., 2008, p. 108)

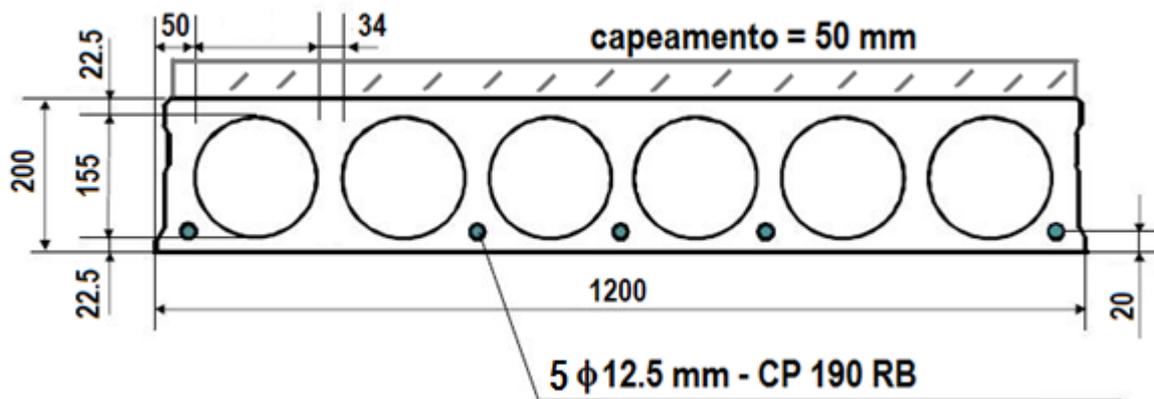


Figura 13: seção transversal das lajes ensaiadas
(adaptada de FERREIRA et al., 2008, p. 109)

Segundo esse mesmo artigo, as lajes foram produzidas por extrusão e apresentaram as seguintes características (FERREIRA et al., 2008, p. 109):

- a) diâmetro das cordoalhas é de 12,5 mm, CP 190-RB;
- b) resistência à compressão do concreto foi 35 MPa, na liberação dos cabos;
- c) resistência à compressão do concreto foi 40 MPa, na data do ensaio;
- d) resistência de tração do concreto foi de 3,5 MPa;
- e) resistência da capa foi de 33,2 MPa, na data do ensaio;
- f) tela soldada (capeamento) com diâmetro de 5 mm e espaçamento de 200 mm;
- g) capeamento com fibras de comprimento de 50 mm, na dosagem de 30 kg/m³.

6 VERIFICAÇÕES

Para realizar as verificações das resistências propostas neste trabalho, foram utilizadas as informações presentes no capítulo anterior referente aos dados dos ensaios. Com essas informações iniciou-se os cálculos dos termos que compõem as fórmulas para as verificações de resistência das lajes. Os quadros 2 e 3 apresentam os valores de entrada para as equações que estão apresentadas ao longo do capítulo 4. As colunas 1 e 2 apresentam, respectivamente, o símbolo e a unidade de medida do termo da Norma européia (SI – sistema internacional). As colunas 3 e 4 apresentam, respectivamente, o símbolo e a unidade de medida do termo da Norma americana (ES – *English System* – sistema inglês de unidades). A coluna 5 apresenta o resultado do termo no SI e a coluna 6 apresenta o resultado do termo no ES. A seção nestes primeiros cálculos é a do grupo 1, sem capa estrutural (grupo 1, segundo figura 12).

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		sem capa	
$A_{inteira}$	mm ²	$A_{inteira}$	in ²	240000	-
$A_{alvéolos}$	mm ²	$A_{alvéolos}$	in ²	18869	-
A	mm ²	A	in ²	126785	197
$S_{inteira}$	mm ³	$S_{b\ inteira}$	in ³	6000000	-
$S_{alvéolos}$	mm ³	$S_{b\ alveolos}$	in ³	174557	-
S	mm ³	S_b	in ³	4952660	302
$I_{inteira}$	mm ⁴	$I_{inteira}$	in ⁴	800000000	-
$I_{alveolos}$	mm ⁴	$I_{alveolos}$	in ⁴	28333269	-
I	mm ⁴	I	in ⁴	630000383	1513
h	mm	h	in	200	8
b	mm	b	in	1200	47
d	mm	d_p	in	180	7
Σb_w	mm	Σb_w	in	270	11
k	-	-	-	2	-
$C_{Rd,c}$	-	-	-	0.129	-
A_{s1}	mm ²	A_{ps}	in ²	494	0.76
ρ_1	-	-	-	0.0102	-
-	-	ρ_p	-	-	0.0023

Quadro 2: dados de entrada das lajes sem capa (1/2)

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		sem capa	
$N_{ed}; N_p^*$	N	P	lbf	562590	126475
$\sigma_{cp}; \sigma_{cpm}^*$	MPa	f_{pc}	psi	4.44	644
γ_c	-	-	-	1.4	-
l_x	mm	-	-	500	
l_{bpt}^*	mm	-	-	684	
l_{bp}^*	mm	-	-	1784	
f_{bpd}^*	MPa	-	-	1.47	
l_{pt2}	mm	-	-	821	
α_1	-	-	-	0.61	
f_{ck}	MPa	f'_c	psi	40	5802
f_{cd}	MPa	-	-	28.6	-
f_{ctd}	MPa	-	-	1.75	-
f_{ptk}^{**}	MPa	f_{pu}	psi	1900	275572
f_{pyd}^{**}	MPa	-	-	1487	-
-	-	f_{se}	psi	1140	165343
-	-	f_{ps}^{***}	psi	-	264552
-	-	β_1	-	-	0.760
-	-	ω_p	-	-	0.104
-	-	$\omega_p < 0.36\beta_1$	-	-	SIM
R_{pt}^{**}	N	-	-	733813	-
-	-	a ****	in	-	0.9
y	mm	-	-	13.8	-
x	mm	-	in	17.2	1.1
-	-	e	in	162.8	6.0
-	-	y_b	in	182.8	6.8

* representação do Projeto NBR 14.861

** de acordo com a Norma NBR 6118:2007

*** valor calculado pela equação 11

**** valor calculado pela equação 10

Quadro 3: dados de entrada das lajes sem capa (2/2)

Os quadros 4 e 5, também apresentam os valores de entrada para as equações que foram apresentadas ao longo do capítulo 4. Novamente, as colunas 1 e 2 apresentam, respectivamente, o símbolo e a unidade de medida do termo da Norma europeia (SI – sistema internacional) e as colunas 3 e 4 apresentam, respectivamente, o símbolo e a unidade de

medida do termo da Norma americana (ES – *English System* – sistema inglês de unidades). Neste caso, a seção da laje é maior, devido ao capeamento de 50 mm (grupos 2 e 3, segundo figura 13), resultando em um acréscimo das propriedades geométricas.

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		com capa	
$A_{inteira}$	mm ²	$A_{inteira}$	in ²	300000	-
$A_{alvéolos}$	mm ²	$A_{alvéolos}$	in ²	18869	-
A	mm ²	A	in ²	186785	289
$S_{inteira}$	mm ³	$S_{b\ inteira}$	in ³	7260000	-
$S_{alvéolos}$	mm ³	$S_{b\ alveolos}$	in ³	323320	-
S	mm ³	S_b	in ³	6936680	423
$I_{inteira}$	mm ⁴	$I_{inteira}$	in ⁴	-	-
$I_{alvéolos}$	mm ⁴	$I_{alveolos}$	in ⁴	-	-
I	mm ⁴	I	in ⁴	1278848137	3072
h	mm	h	in	250	10
b	mm	b	in	1200	47
d	mm	d_p	in	230	9
Σb_w	mm	Σb_w	in	270	11
k	-	-	-	1.932504808	-
$C_{Rd,c}$	-	-	-	0.129	-
A_{sl}	mm ²	A_{ps}	in ²	494	0.76
ρ_l	-	-	-	0.0079	-
-	-	ρ_p	-	-	0.0018
$N_{ed}; N_p^*$	N	P	lbf	562590	126475
$\sigma_{cp}; \sigma_{cpm}^*$	MPa	f_{pc}	psi	3.01	437
γ_c	-	-	-	1.4	-
l_x	mm	-	-	625	-
l_{bpt}^*	mm	-	-	684	-
l_{bp}^*	mm	-	-	1784	-
f_{bpd}^*	MPa	-	-	1.47	-
l_{pt2}	mm	-	-	821	-
α_1	-	-	-	0.76	-
f_{cd}	MPa	-	-	23.7	-

* representação do Projeto NBR 14.861

Quadro 4: dados de entrada das lajes com capa (1/2)

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		com capa	
f_{ctd}	MPa	-	-	1.75	-
f_{ck}	MPa	f'_c	psi	33.2	4815
f_{ptk}^{**}	MPa	f_{pu}	psi	1900	275572
f_{pyd}^{**}	MPa	-	-	1487	-
-	-	f_{se}	psi	1140	165343
-	-	f_{ps}^{***}	psi	-	265815
-	-	β_1	-	-	0.809
-	-	ω_p	-	-	0.099
-	-	$\omega_p < 0.36\beta_1$	-	-	SIM
R_{pt}^{**}	N	-	-	733813	-
-	-	a ****	in	-	1.1
y	mm	-	-	16.6	-
x	mm	-	in	20.8	1.3
-	-	e	in	209.2	7.7
-	-	y_b	in	229.2	8.5

** de acordo com a Norma NBR 6118:2007

*** valor calculado pela equação 11

**** valor calculado pela equação 10

Quadro 5: dados de entrada das lajes com capa (2/2)

Para as lajes com alvéolos preenchidos, a diferença aparece, basicamente, nos valores de área, momentos estático e de inércia, e na largura efetiva, o que leva uma mudança na tensão de compressão de protensão. Os valores de entrada para as equações que foram apresentadas ao longo do capítulo 4, agora para lajes com preenchimento de alvéolos, são apresentados nos quadros de 6 a 9. Mais uma vez, as colunas 1 e 2 apresentam, o símbolo e a unidade de medida no SI e as colunas 3 e 4 apresentam o símbolo e a unidade de medida pelo sistema inglês, as colunas 5 e 6, os resultados.

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		2 alvéolos	
$A_{inteira}$	mm ²	$A_{inteira}$	in ²	240000	-
$A_{alvéolos}$	mm ²	$A_{alvéolos}$	in ²	18869	-
A	mm ²	A	in ²	164523	255
$S_{inteira}$	mm ³	$S_{b\ inteira}$	in ³	6000000	-
$S_{alvéolos}$	mm ³	$S_{b\ alveolos}$	in ³	174557	-
S	mm ³	S_b	in ³	5301773	323
$I_{inteira}$	mm ⁴	$I_{inteira}$	in ⁴	800000000	-
$I_{alveolos}$	mm ⁴	$I_{alveolos}$	in ⁴	28333269	-
I	mm ⁴	I	in ⁴	686666922	1649
h	mm	h	in	200	8
b	mm	b	in	1200	47
d	mm	d_p	in	180	7
Σb_w	mm	Σb_w	in	580	23
k	-	-	-	2	-
$C_{Rd,c}$	-	-	-	0.129	-
A_{sl}	mm ²	A_{ps}	in ²	494	0.76
ρ_l	-	-	-	0.0047	-
-	-	ρ_p	-	-	0.0023
$N_{ed}; N_p^*$	N	P	lbf	562590	126475
$\sigma_{cp}; \sigma_{cpm}^*$	MPa	f_{pc}	psi	3.42	496
γ_c	-	-	-	1.4	-
l_x	mm	-	-	500	-
l_{bpt}^*	mm	-	-	684	-
l_{bp}^*	mm	-	-	1784	-
f_{bpd}^*	MPa	-	-	1.47	-
l_{pt2}	mm	-	-	821	-
α_l	-	-	-	0.61	-
f_{ck}	MPa	f'_c	psi	40	5802
f_{cd}	MPa	-	-	28.6	-
f_{ctd}	MPa	-	-	1.75	-
f_{ptk}^{**}	MPa	f_{pu}	psi	1900	275572
f_{pyd}^{**}	MPa	-	-	1487	-
-	-	f_{se}	psi	1140	165343

* representação do Projeto NBR 14.861

** de acordo com a Norma NBR 6118:2007

Quadro 6: dados de entrada das lajes com 2 alvéolos preenchidos (1/2)

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		2 alvéolos	
-	-	f_{ps}^{***}	psi	-	264552
-	-	β_1	-	-	0.760
-	-	ω_p	-	-	0.104
-	-	$\omega_p < 0.36\beta_1$	-	-	SIM
R_{pf}^{**}	N	-	-	733813	-
-	-	a ****	in	-	0.9
y	mm	-	-	13.8	-
x	mm	-	in	17.2	1.1
-	-	e	in	162.8	6.0
-	-	y_b	in	182.8	6.8

** de acordo com a Norma NBR 6118:2007

*** valor calculado pela equação 11

**** valor calculado pela equação 10

Quadro 7: dados de entrada das lajes com 2 alvéolos preenchidos (2/2)

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		4 alvéolos	
$A_{inteira}$	mm ²	$A_{inteira}$	in ²	240000	-
$A_{alvéolos}$	mm ²	$A_{alvéolos}$	in ²	18869	-
A	mm ²	A	in ²	202262	313
$S_{inteira}$	mm ³	$S_{b\ inteira}$	in ³	6000000	-
$S_{alvéolos}$	mm ³	$S_{b\ alveolos}$	in ³	174557	-
S	mm ³	S_b	in ³	5650887	345
$I_{inteira}$	mm ⁴	$I_{inteira}$	in ⁴	800000000	-
$I_{alveolos}$	mm ⁴	$I_{alveolos}$	in ⁴	28333269	-
I	mm ⁴	I	in ⁴	743333461	1786
h	mm	h	in	200	8
b	mm	b	in	1200	47
d	mm	d_p	in	180	7
Σb_w	mm	Σb_w	in	890	35
k	-	-	-	2	-
$C_{Rd,c}$	-	-	-	0.129	-
A_{sl}	mm ²	A_{ps}	in ²	494	0.76
ρ_l	-	-	-	0.0031	-
-	-	ρ_p	-	-	0.0023

* representação do Projeto NBR 14.861

Quadro 8: dados de entrada das lajes com 4 alvéolos preenchidos (1/2)

MEMÓRIA DE CÁLCULO					
SI		ES		4 alvéolos	
$N_{ed}; N_p^*$	N	P	lbf	562590	126475
$\sigma_{cp}; \sigma_{cpm}^*$	MPa	f_{pc}	psi	2.78	403
γ_c	-	-	-	1.4	-
l_x	mm	-	-	500	
l_{bpt}^*	mm	-	-	684	
l_{bp}^*	mm	-	-	1784	
f_{bpd}^*	MPa	-	-	1.47	
l_{pt2}	mm	-	-	821	
α_l	-	-	-	0.61	
f_{ck}	MPa	f'_c	psi	40	5802
f_{cd}	MPa	-	-	28.6	-
f_{ctd}	MPa	-	-	1.75	-
f_{ptk}^{**}	MPa	f_{pu}	psi	1900	275572
f_{pyd}^{**}	MPa	-	-	1487	-
-	-	f_{se}	psi	1140	165343
-	-	f_{ps}^{***}	psi	-	264552
-	-	β_1	-	-	0.760
-	-	ω_p	-	-	0.104
-	-	$\omega_p < 0.36\beta_1$	-	-	SIM
R_{pt}^{**}	N	-	-	733813	-
-	-	a ****	in	-	0.9
y	mm	-	-	13.8	-
x	mm	-	in	17.2	1.1
-	-	e	in	162.8	6.0
-	-	y_b	in	182.8	6.8

* representação do Projeto NBR 14.861

** de acordo com a Norma NBR 6118:2007

*** valor calculado pela equação 11

**** valor calculado pela equação 10

Quadro 9: dados de entrada das lajes com 4 alvéolos preenchidos (2/2)

6.1 ESFORÇO CORTANTE

A determinação dos esforços cortantes para as diferentes seções das lajes estudadas, utilizando as equações presentes no capítulo 4 referentes às três Normas, está apresentada no quadro 10. As colunas de número ímpar (entre 1 e 10) apresentam os valores obtidos pelas equações com

os coeficientes de majoração de 1,4 para o concreto e 1,15 para o aço. As colunas de número par (entre 1 e 10) apresentam os valores obtidos pelas equações sem os coeficientes de majoração. O objetivo do cálculo sem a majoração é comparar com os valores obtidos nos ensaios (coluna 11). É importante salientar que, para valor mínimo como a equação 2, valor máximo como a equação 15 e as condições exigidas pela norma americana em relação ao cortante apresentadas no capítulo 4, obteve-se valores satisfatórios para todos esses critérios.

ESFORÇO CORTANTE [kN]											
Seções Lajes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Eq. 1		Eq. 3		-		Eq. 15		Eq. 6		-
	$V_{Rd,c}$		V_{Rdc}		V_u		V_{Rdf}		V_{Rdt}		$V_{u,exp}$
	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.	
sem capa	75,3	92,5	62,8	104,1	55,4	65,1	62,6	87,7	-	-	118,0
com capa	74,0	92,4	102,9	141,6	84,3	99,2	68,8	96,3	-	-	160,2
2 alvéolos	125,1	153,7	151,4	211,9	118,9	139,9	113,5	158,9	140,4	183,6	166,2
4 alvéolos	162,0	200,0	224,2	313,9	182,5	214,7	160,9	225,3	205,5	274,8	175,2

<p>1 - $V_{Rd,c}$ = cortante em região fissurada (EUROPÉIA)</p> <p>2 - V_{Rdc} = cortante em região não fissurada (EUROPÉIA)</p> <p>3 - V_u = cortante (AMERICANA)</p> <p>4 - V_{Rdf} = cortante (BRASILEIRA)</p> <p>5 - V_{Rdt} = cortante com alvéolos preenchidos (EUROPÉIA)</p> <p>6 - $V_{u,exp}$ = cortante - valor experimental (LABORATÓRIO)</p>
--

Quadro 10: esforços cortantes (teóricos x experimentais)

6.2 MOMENTO FLETOR

Para o momento fletor, também se utilizou as equações presentes no capítulo 4 para verificar as lajes de diferentes seções apresentadas no capítulo 5. Os valores calculados estão apresentados no quadro 11.

MOMENTO FLETOR [kN.m]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Seções Lajes	Eq.7	Eq.9	$M_u \geq 1,2.M_{cr}$	$M_u \leq 0,9.M_n$	Eq.16	Eq. de forças		-	-
	M_{cr}	M_n	M_u	M_u	M_r	majorado	sem majoração	$M_{r,exp}$	$M_{u,exp}$
sem capa	93,9	152,1	112,6	136,9	99,5	127,0	146,1	78,0	120,0
com capa	133,1	195,9	159,7	176,3	131,1	162,7	187,1	119,0	180,0
2 alvéolos	93,7	152,1	112,5	136,9	97,4	127,0	146,1	100,0	140,0
4 alvéolos	94,4	152,1	113,3	136,9	97,0	127,0	146,1	100,0	138,0

- 1 - M_{cr} = momento de fissuração (AMERICANA)
- 2 - M_n = momento fletor resistente (AMERICANA)
- 3 e 4 - M_u = momento fletor majorado (AMERICANA) - valor estará no intervalo $1,2.M_{cr} \leq M_u \leq 0,9.M_n$
- 5 - M_r = momento de fissuração (BRASILEIRA)
- 6 - M_R = momento fletor resistente (BRASILEIRA)
- 7 - $M_{r,exp}$ = momento de fissuração - valor experimental (LABORATÓRIO)
- 8 - $M_{u,exp}$ = momento fletor resistente - valor experimental (LABORATÓRIO)

Quadro 11: momentos fletores (teóricos x experimentais)

7 ANÁLISE COMPARATIVA

A comprovação da eficiência das normas estudadas neste trabalho é realizada nesta etapa do trabalho. Realiza-se uma análise comparativa dos resultados teóricos e experimentais apresentados no capítulo 6. Para isso, é determinado os valores de λ , que representam a razão entre o valor obtido experimentalmente sobre o valor calculado pelas verificações. Dessa forma, além de determinar o coeficiente real de segurança, torna-se possível a análise comparativa entre os resultados.

7.1 ANÁLISE DO CORTANTE

Para a determinação do λ para o esforço cortante, realizou-se a divisão do valor obtido experimentalmente (coluna 11 do quadro 10) pelos valores calculados (colunas de 1 a 10 do quadro 10). Esses valores estão presentes no quadro 12.

$\lambda = V_{\text{calculado}} / V_{\text{experimental}}$										
Seções Lajes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Eq. 1		Eq. 3		-		Eq. 15		Eq. 6	
	$V_{Rd,c}$		V_{Rdc}		V_u		V_{Rdf}		V_{Rdt}	
	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.	majorado	sem major.
sem capa	1,57	1,28	1,88	1,13	2,13	1,81	1,88	1,35	-	-
com capa	2,16	1,73	1,56	1,13	1,90	1,61	2,33	1,66	-	-
2 alvéolos	1,33	1,08	1,10	0,78	1,40	1,19	1,46	1,05	1,18	0,91
4 alvéolos	1,08	0,88	0,78	0,56	0,96	0,82	1,09	0,78	0,85	0,64
<p>1 - λ = coeficiente de cortante em região fissurada (EUROPÉIA)</p> <p>2 - λ = coeficiente de cortante em região não fissurada (EUROPÉIA)</p> <p>3 - λ = coeficiente de cortante (AMERICANA)</p> <p>4 - λ = coeficiente de cortante (BRASILEIRA)</p> <p>5 - λ = coeficiente de cortante com alvéolos preenchidos (EUROPÉIA)</p>										

Quadro 12: coeficientes λ para cortante

A partir da análise do quadro 12, podemos verificar que todos os valores experimentais foram maiores que os teóricos, com exceção das lajes com 4 alvéolos preenchidos. Isso ocorreu devido à pequena variação da resistência experimental para as situações de 2 e 4 alvéolos preenchidos. Ao analisar a equação 6, verifica-se que deveria haver um acréscimo de 30-40% no valor resistido, quando dobrado o número de alvéolos preenchidos. Provavelmente, isso ocorreu devido a disposição desses alvéolos, que no caso de preenchimento de 4 alvéolos (ver figura 13), existe a permanência da nervura central, sendo essa um ponto mais fraco.

Esse mesmo quadro mostra que a Norma americana é mais conservadora comparada à Norma européia e ao projeto de Norma brasileira. Ou seja, os resultados para esforço cortante foram sempre menores, o que resultou em valores de λ sempre maiores.

Em relação à equação 6 (específica para alvéolos preenchidos da Norma européia) mostrou-se uma boa simplificação para evitar o recálculo dos dados de entrada para a determinação do esforço cortante pelas equações 1, 2 e 3. Para explicitar essa conclusão, deve-se comparar as colunas 9 e 10 com as colunas 1, 2, 3 e 4 do quadro 12.

7.2 ANÁLISE DO FLETOR

Os valores de λ para o momento fletor – razão dos valores obtidos experimentalmente pelos valores calculados – estão apresentados no quadro 13. Para a elaboração desse quadro, realizou-se a divisão dos valores experimentais do momento de fissuração (coluna 8 do quadro 11) pelos momentos teóricos (colunas 1 e 5 do quadro 11). Ainda, dividiu-se o momento fletor experimental (coluna 9 do quadro 11) pelos momentos fletores das Normas americana e brasileira (colunas 3, 4, 6 e 7).

Pela análise do quadro 13, existe uma ótima compatibilização entre as Normas americana e brasileira. Analisando os momentos de fissuração (colunas 1 e 4), nota-se valores quase idênticos. Para os momentos fletores, os valores da Norma brasileira (coluna 5 e 6) estão dentro do intervalo da Norma americana (colunas 2 e 3). É possível verificar também que existe um aumento da diferença entre valores teóricos e os experimentais, na sequência das seções: sem capa, com capa, 2 alvéolos e 4 alvéolos.

$\lambda = M_{\text{experimental}} / M_{\text{calculado}}$						
Seções Lajes	1	2	3	4	5	6
	Eq.7	$M_u \geq 1,2 \cdot M_{cr}$	$M_u \leq 0,9 \cdot M_n$	Eq.16	Eq. de forças	
	M_{cr}	M_u	M_u	M_r	M_R	M_R
					majorado	sem majoração
sem capa	0,83	1,07	0,88	0,78	0,94	0,82
com capa	0,89	1,13	1,02	0,91	1,11	0,96
2 alvéolos	1,07	1,24	1,02	1,03	1,10	0,96
4 alvéolos	1,06	1,22	1,01	1,03	1,09	1,09

1 - λ = coeficiente de momento de fissuração (AMERICANA)
2 e 3 - λ = coeficiente de momento fletor majorado (AMERICANA)
4 - λ = coeficiente de momento de fissuração (BRASILEIRA)
5 - λ = coeficiente de momento fletor resistente (BRASILEIRA)

Quadro 13: coeficientes λ para momento fletor

Verifica-se ainda que o capeamento gera um acréscimo na resistência e que o preenchimento dos alvéolos teoricamente não influencia a capacidade resistente ao fletor, porém os ensaios com alvéolos preenchidos mostraram que houve uma parcela de aumento de aproximadamente 20 MPa.

Embora exista essa coerência entre os resultados teóricos, eles não apresentaram o comportamento real das lajes ensaiadas. Pode-se concluir isso porque o resultado esperado para os valores de λ é em torno de 1,6. Neste caso, haveria um valor usual de fator de segurança global. Pelo quadro 13, verifica-se que os resultados foram em média próximos de 1,0.

Os coeficientes λ são menores que 1,0 no caso da laje sem capa. A explicação desse problema é justificada através da constatação de uma iteração do mecanismo de cortante com a flexão durante os ensaios, o que levou à ruptura precoce desse grupo de lajes, e isso não é previsto pelas normas (FERREIRA et al., 2008, p. 107).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou analisar os critérios de verificação das lajes alveolares protendidas de três normas e determinar quais apresentam resultados teóricos mais próximos dos obtidos em ensaios. Para isso foi estudado conceitos básicos sobre esse tipo de laje e do mecanismo de protensão. Além disso, houve a apresentação dos critérios das normas e dos ensaios. A partir das equações apresentadas, realizou-se as verificações para cortante e momento fletor, chegando finalmente à uma análise comparativa entre os valores teóricos e experimentais.

Este trabalho possibilitou concluir que para esforços cortantes em lajes alveolares as três Normas estudadas obtiveram resultados menores que os valores últimos experimentais, com a exceção da laje com 4 alvéolos preenchidos. Sendo possível apontar que a Norma americana apresentou valores mais afastados dos obtidos em ensaios, seguidas pela Norma brasileira, e então a Norma européia. Logo, pode-se dizer que a americana é a Norma mais conservadora. Para o problema encontrado na determinação do cortante com 4 alvéolos preenchidos, sugere-se novos estudos para compreender melhor esse fenômeno de não aumento de resistência ao cisalhamento, embora haja um aumento da seção de concreto da laje.

Sobre o momento fletor, os resultados encontrados a partir dos critérios das normas não foram validados pelos ensaios realizados. Portanto, necessita-se de uma verificação dos critérios que foram utilizados para os ensaios e uma confirmação da efetividade dos resultados publicados pelo laboratório NETPRE. Uma possível questão que explique essa incompatibilidade teórico-experimental, seja a divergência dos valores de entrada das equações.

Apesar disso, analisando somente os valores teóricos para momentos fletores resistentes, conclui-se que, apesar da norma brasileira apresentar valores muito próximos dos valores americanos, novamente a Norma americana é a mais conservadora. Ou seja, a Norma americana apresenta valores mais afastados dos obtidos experimentalmente.

Como sugestão para novos trabalhos tem-se o estudo dos demais critérios de verificação das normas estudadas. Verificações do tipo: fendilhamento longitudinal, combinação de torção e cortante, cisalhamento nas juntas de dilatação, à punção, cargas concentradas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-95**: building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95). Farmington Hills, USA, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.062**: projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 6.118**: projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. **Projeto NBR 14.861**: Lajes alveolares de estruturas de concreto pré-fabricadas – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2009.
- BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO. **Pré-fabricação predial**. Rio de Janeiro, 1978.
- BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, industrialização e desenvolvimento**. São Paulo: Perspectiva, 1976.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1**: design of concrete structures – part 1-1: general rules and rules for buildings. 2004.
- _____. **EN 1168**: Precast concrete products – hollow core slabs. 2005 (amendment 2, 2009).
- FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZI, A.; COSTA, O. O.; ALMEIDA FILHO, F. M.; DONIAK, I. L. O.; LIVI, L. O. B. Avaliação teórico-experimental da capacidade resistente ao cisalhamento e a flexão em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido. **Concreto & Construções**: revista oficial do IBRACON, São Paulo, ano XXXVI, n. 50, p. 104-115, abr./maio/jun. 2008. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_50.pdf>. Acesso em: 23 maio 2011.
- LAJEAL PRÉ FABRICADOS DE CONCRETO LTDA. **Lajeal – Lajes alveolares**: produtos – vantagens. Disponível em: <<http://www.lajeal.com.br/lajes-alveolares-produtos.php>>. Acesso em: 23 maio 2011.
- LEONHARDT, F. **Construções de concreto**: concreto protendido. Rio de Janeiro: Interciência, 1983. v. 5.
- PFEIL, W. **Concreto protendido**: processos construtivos, perdas de protensão, sistemas estruturais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.
- PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **Manual for the design of hollow core slabs**. 2. ed. Chicago, USA, 1998.
- ROCHA, A. M. D. **Novo curso de concreto armado**: concreto protendido. 2. ed. Rio de Janeiro: Científica, 1972.

TATU PRÉ MOLDADOS LTDA. **Lajes alveolares Tatu**. Disponível em:
<<http://www.tatu.com.br/LAJE%20ALVEOLAR%20PROTENDIDA%20TATU.pdf>>.
Acesso em: 23 maio 2011.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil**: pré-fabricação, monumentos, fundações. São Paulo: Studio Nobel, 2002. v. 3.