

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALESSANDRA APARECIDA VIEIRA FRANÇA

ESTUDO DAS LAJES ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS EM CONCRETO
PROTENDIDO SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CISALHAMENTO

CURITIBA
2012

ALESSANDRA APARECIDA VIEIRA FRANÇA

ESTUDO DAS LAJES ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS EM CONCRETO
PROTENDIDO SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora:

Prof. Dra. Adriana de Paula Lacerda Santos

Co-orientador:

Prof. Dr. Mauro Lacerda Santos Filho

CURITIBA

2012

França, Alessandra Aparecida Vieira

Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento / Alessandra Aparecida Vieira França. – Curitiba, 2012.

136 f. : il., tab, graf.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Adriana de Paula Lacerda Santos

Coorientador: Mauro Lacerda Santos Filho

1. Lajes de concreto. 2. Cisalhamento 3. Concreto protendido. I. Santos, Adriana de Paula Lacerda. II. Santos Filho, Mauro Lacerda . III. Título.

CDD 620.136

TERMO DE APROVAÇÃO

ALESSANDRA APARECIDA VIEIRA FRANÇA

ESTUDO DAS LAJES ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS EM CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CISALHAMENTO


Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e Estruturas, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:


Prof.ª. Dr.ª. Adriana de Paula Lacerda Santos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR

Co-orientador:


Prof. Dr. Mauro Lacerda Santos Filho

Departamento de Engenharia Civil - UFPR

Examinadores:


Prof. MSc. Wilson Gorges

Departamento de Engenharia Civil, PUC-PR


Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR


Eng.º Alexandre Dutra Cararo

Gerente de Projetos – Cassol Pré-Fabricados Ltda.

Curitiba, 25 de abril de 2012

*Deveríamos ser como as águas dos riachos
que, tranqüilamente, contornam os obstáculos.*

De Rose

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Márcio Cassab de Lacerda, por ter insistido que eu tentasse pela terceira vez ingressar neste programa de pós-graduação, mesmo eu já tendo desistido de fazer o mestrado, por acreditar no meu potencial, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos desta batalha, aceitando adiar o nosso projeto do primeiro filho e pelo seu entusiasmo contagiante.

Ao professor Dr. Mauro Lacerda Santos Filho por ter aceitado ser meu orientador, por toda a atenção que me deu desde o início deste trabalho e por esclarecer minhas dúvidas, incentivando minha pesquisa.

A professora Dra. Adriana de Paula Lacerda Santos por aceitar ser minha orientadora nesta pesquisa a partir da fase de qualificação, pelos esclarecimentos fundamentais e grande ajuda na redação do texto.

Ao engenheiro Luiz Otávio Baggio Livi pelo apoio imediato ao meu pedido de conciliar as aulas do mestrado à rotina de trabalho na empresa, por confiar na minha responsabilidade e reconhecer o valor do meu trabalho.

A empresa Cassol Pré-Fabricados Ltda. pelo apoio técnico e financeiro a esta pesquisa através da minha liberação do trabalho para assistir as aulas, da doação das lajes alveolares, equipamentos e mão-de-obra para realização dos ensaios de cisalhamento.

Ao tecnólogo Claiton Cremoniz, ao laboratorista Gilson e ao operador de ponte rolante Fábio pela ajuda valiosa para a realização dos ensaios com as lajes alveolares.

Ao professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros pelo incentivo aos alunos para escrever muitos artigos, pela parceria em alguns destes artigos, pelas suas aulas inspiradoras, ricas em discussões e ensinamentos valiosos.

A grande amiga Francielle Cristine da Rocha, companheira inesquecível de todas as aulas no decorrer do mestrado e que muito me ajudou nos trabalhos acadêmicos, compreendendo minha dificuldade de me ausentar do meu trabalho na empresa.

Aos colegas do mestrado Eduardo Pereira, Carlos Gustavo Nastari Marcondes e Susan Pessini Sato pela parceria nos trabalhos acadêmicos e pelos

momentos de descontração compartilhados e a amiga que conheci no início do mestrado Camilla Lohmann por ter se tornado uma verdadeira amiga.

Ao professor Dr. Heitor Miranda Bottura por ter me indicado para vir trabalhar em Curitiba e por ter me recomendado para este programa de pós-graduação.

A engenheira Dra. Daniela Gutstein por ter me recomendado para este programa de pós-graduação, pelas ideias para o projeto de pesquisa e pela troca de informações durante o desenvolvimento da norma brasileira de lajes alveolares.

Ao professor Dr. José Samuel Giongo por ter esclarecido atenciosamente, através da internet, minhas dúvidas sobre modelos de bielas e tirantes.

Ao amigo engenheiro Vander Yamauchi por assistir aos meus ensaios da apresentação do projeto de pesquisa e por ter dado preciosas dicas nesta fase.

A engenheira Stella Marys Rossi Boiça pelo incentivo desde a primeira vez que tentei ingressar neste programa de pós-graduação, por ter me apresentado ao professor Mauro Lacerda no ano de 2004, por me emprestar o seu material didático do curso, e principalmente pelo convite para trabalhar na Cassol, em Curitiba.

Ao grande engenheiro Eriton Nunes Costa por todos os ensinamentos sobre projeto de estruturas pré-fabricadas em concreto no início da minha carreira e por ter me aceitado como sua funcionária.

Aos amigos e companheiros de trabalho há 11 anos, Alexandro Dutra Cararo, Luis André Tomazzoni, Rogério Drusz, João Augusto Nascimento e Patrícia Ribeiro, que mesmo sem saber, contribuíram muito para a realização desta pesquisa, através do seu trabalho no cotidiano e troca de experiências.

Aos pesquisadores do NETPRE da UFScar que abriram caminho para as pesquisas sobre lajes alveolares no Brasil.

Ao meu pai José Egidio França, minha madrasta Maria Célia Palâncio França, minha avó Geni Generoso França e meu avô Egidio França por me incentivarem a amar os estudos desde pequena.

A avó Evane Diniz Cassab pelas orientações, orações e carinho.

A Deus, pela vida e por colocar tantas pessoas maravilhosas no meu caminho.

RESUMO

O objetivo desta dissertação de mestrado foi estudar o comportamento das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a esforços de cisalhamento.

Para isso, foram feitos ensaios de cisalhamento das lajes alveolares com espessura de 26,5cm com e sem capa de concreto de 5cm, sem preenchimento de alvéolos, com dois alvéolos preenchidos e com três alvéolos preenchidos com concreto.

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados pela FIP (1992), pela EN 1168:2005 e por Costa (2009).

Os valores da força cortante última obtida nos ensaios foram comparados com os valores das forças cortantes resistentes teóricas calculadas de acordo com a NBR 6118:2003 e com a NBR 14861:2011.

Ao calcular-se a força cortante resistente através das equações apresentadas na NBR 14861:2011, verificou-se que esta norma está muito mais rigorosa no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do que a NBR 6118. Devido à esta grande diferença nos resultados calculados, mesmo para lajes sem preenchimento de alvéolos, esta autora consultou a comissão que elaborou a NBR 14861:2011 e verificou que há um erro no texto da norma, pois o coeficiente α foi considerado em duplicidade (α e 0,15). A ABNT emitirá em breve uma emenda da NBR 14861:2011 com as correções necessárias.

Durante os ensaios realizados para a presente pesquisa, confirmou-se que o preenchimento dos alvéolos com concreto contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares. Mas para o caso das lajes de 26,5cm de espessura, deve ser limitada a quantidade a no máximo dois alvéolos preenchidos, pois a maioria dos resultados para lajes com três alvéolos preenchidos foi menor, confirmando que a recomendação da NBR 14861:2011 é coerente com a prática.

Após a análise da configuração de fissuração e dos mecanismos de ruptura das lajes alveolares durante os ensaios de cisalhamento, foram desenvolvidos modelos de bielas e tirantes representando as forças atuantes nas lajes no instante da sua ruptura. Através destes modelos foi calculada a tensão de tração atuante nos tirantes de concreto (nervuras) e dimensionada a geometria destes tirantes.

As contribuições que esta pesquisa traz são as seguintes: aumento da quantidade de resultados de ensaios com lajes de espessura 26,5cm realizados no Brasil, obtenção de resultados de ensaios de cisalhamento com alvéolos concretados após a liberação da força de protensão, obtenção de resultados de ensaios de cisalhamento em lajes alveolares com alvéolos concretados e com capa de concreto armada com tela soldada, comparação de resultados de ensaios de cisalhamento com valores teóricos calculados através da nova revisão da norma NBR 14861:2011, aplicação de modelos de bielas e tirantes em lajes alveolares protendidas; correção da duplicidade do fator α apresentada na NBR 14861:2011.

Palavras-chave: lajes alveolares protendidas, cisalhamento, modelos de bielas e tirantes, ensaios.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation was to study the behavior of precast prestressed hollow core slabs subjected to shear efforts.

For this, shear tests were made with hollow core slabs of 26,5cm thickness with and without concrete cover of 5 cm, without cores filled, with two cores filled and three cores filled with concrete.

The tests were performed according to the procedures recommended by FIP (1992), the EN 1168:2005 and Costa (2009).

The ultimate shear values obtained in the tests were compared with the values of theoretical resistant shear calculated in accordance with NBR 6118:2003 and NBR 14861:2011.

When calculating the shear resistance through the equations presented in NBR 14861:2011, it was found that provision is much more accurate the calculation of the shear strength of hollow core slabs than NBR 6118. Due to this large difference in the calculated results, even for slabs without cores filled, this author consulted the committee that drafted the NBR 14861:2011 and found that there is an error in the text of the standard, because the coefficient was found to double (α and 0,15). The ABNT soon issue an amendment of NBR 14861:2011 with the necessary corrections. During the tests for the present study, it was confirmed that the concrete filling the cores contributes to increase the shear strength of hollow core slabs. But in case of slabs 26,5 cm thickness, the quantity should be limited to a maximum of two cores filled, because most of the results for slabs with three cores filled were smaller confirming that the recommendation of NBR 14861:2011 is consistent with standard practice.

After analyzing the configuration of cracking and failure mechanisms of hollow core slabs during the shear tests, strut and tie models were developed representing the forces acting on the slab at the moment of rupture. Through these models was calculated tensile stress acting on the concrete ties (ribs) and scaled the geometry of these ties.

The contributions that this research brings are: increasing the amount of test results with 26.5 cm thickness slabs made in Brazil, obtaining results of shear tests with cores concreted after the release of prestressing force, obtaining results shear tests on slabs with cores filled and cover concrete reinforced with welded steel mesh, comparison of results of shear tests with theoretical values calculated by the new revision of the standard NBR 14861:2011, application of strut and tie models for slabs; correction of factor α applied in duplicate shown in NBR 14861:2011.

Keywords: prestressed hollow core slabs, shear, strut and tie models, tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Seção longitudinal da laje alveolar com alvéolos concretados nas extremidades e gráfico do esforço cortante solicitante de cálculo...	23
Figura 2 -	Seção transversal da laje alveolar: seção de concreto extrusado x seção com preenchimento de alvéolos.....	24
Figura 3 -	Execução de abertura dos alvéolos na fábrica para posterior concretagem na obra.....	25
Figura 4 -	Exemplo de laje alveolar.....	31
Figura 5 -	Seção transversal típica das lajes alveolares.....	33
Figura 6 -	Modelo esquemático de uma pista de protensão.....	35
Figura 7 -	Funcionário posicionando o macaco que protende cada cordoalha isoladamente.....	36
Figura 8 -	Máquina extrusora para fabricação de lajes alveolares.....	37
Figura 9 -	Detalhe das hélices da máquina extrusora.....	37
Figura 10 -	Operações manuais em uma laje imediatamente após a concretagem.....	38
Figura 11 -	Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e alvéolos preenchidos.....	43
Figura 12 -	Posicionamento recomendado para preenchimento de concreto em dois alvéolos para acréscimo na resistência à força cortante....	43
Figura 13 –	Opções para o arranjo do ensaio de cisalhamento.....	47
Figura 14 –	Posições para retirada de testemunhos da laje alveolar.....	48
Figura 15 –	Arranjo dos ensaios e geometria das amostras (Girhammar e Pajari, 2008).....	51
Figura 16 –	Ensaio de <i>pull-off</i> utilizado para avaliar a aderência entre a laje alveolar e a capa (Girhammar e Pajari, 2008).....	52
Figura 17 –	Trincas típicas após a ruptura das lajes nos ensaios de cisalhamento (Girhammar e Pajari, 2008).....	52
Figura 18 –	O ponto A é o ponto crítico de ruptura por cisalhamento	

	na nervura entre os alvéolos (Girhammar e Pajari, 2008).....	53
Figura 19 -	Panorama fissurado de uma laje alveolar após ensaio de cisalhamento.....	55
Figura 20 -	Panorama fissurado de uma laje alveolar após ensaio de flexão.....	55
Figura 21 –	Apresentação dos tipos de regiões B e D em vigas de concreto armado.....	57
Figura 22 –	Modelo dos campos de compressão (Strut and Tie) em vigas esbeltas e em vigas parede.....	59
Figura 23 -	Mapa mental.....	64
Figura 24 -	Relação Entre os Valores Calculados e os Valores Obtidos nos Ensaios.....	70
Figura 25 -	Seção transversal das lajes ensaiadas.....	74
Figura 26 –	Detalhe do preenchimento do alvéolo após a retração do concreto.....	77
Figura 27 –	Concretagem dos alvéolos e da capa das lajes.....	77
Figura 28 –	Lajes prontas para os ensaios.....	78
Figura 29 –	Preparação para os ensaios.....	79
Figura 30 –	Aplicação e leitura da carga durante um ensaio.....	80
Figura 31 -	LA001-A – Deslocamento do concreto próximo à cordoalha (falha de ancoragem).....	81
Figura 32 –	Fissuras das lajes LA001-A após os ensaios.....	82
Figura 33 –	Fissuras das lajes LA002-A após os ensaios.....	84
Figura 34 –	Fissuras das lajes LA003-A após os ensaios.....	85
Figura 35 –	Fissuras nas nervuras das lajes LA003-A após os ensaios.....	86
Figura 36 –	Detalhe das fissuras junto às cordoalhas da segunda LA003-A..	86
Figura 37 –	Apoio da LA001-B para o terceiro ensaio.....	87
Figura 38 –	Fissuras das lajes LA001-B após os ensaios.....	88
Figura 39–	Fissuras nas nervuras da primeira e segunda LA001-B.....	89

Figura 40 – Fissuras das lajes LA002-B após os ensaios.....	90
Figura 41 – Primeira LA002-B após o ensaio.....	91
Figura 42 - Fissura na interface entre o concreto da capa e o concreto da laje pré-fabricada e fissuras junto às cordoalhas da primeira LA003-B.....	91
Figura 43 – Fissuras das lajes LA003-B após os ensaios.....	92
Figura 44 – Relações $V_{u,exp}/V_{Rk1}$ para lajes com e sem capa com V_{Rk1} calculado pela NBR 6118:2003.....	104
Figura 45 – Relações $V_{u,exp}/V_{Rk1}$ para lajes com e sem capa com V_{Rk1} calculado pela NBR 14861:2011.....	104
Figura 46 – Relações $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ para lajes com e sem capa com V_{Rk1} calculado pela NBR 6118:2003.....	107
Figura 47 – Relações $V_{u,exp}/V_{Rk1,med}$ para lajes com e sem capa com V_{Rk1} calculado pela NBR 14861:2011.....	107
Figura 48 – Mecanismos de comportamento para lajes com capa.....	110
Figura 49 – Representação das bielas, tirantes e banzos do modelo de treliça posicionados em relação à fissura de cisalhamento na nervura da laje alveolar.....	111
Figura 50 – Distribuição linear de tensões na seção transversal do elemento...	112
Figura 51 – Modelo de treliça adotado para as lajes alveolares.....	112
Figura 52 – Representação do tirante de concreto na região da nervura na seção transversal da laje alveolar e tirante equivalente para uma laje LP26,5 de 125cm, considerando-se a largura mínima das nervuras.....	113
Figura 53 – Modelo de treliça das LA001-A feito no programa CAST.....	114
Figura 54 – Modelo de bielas e tirantes na região do apoio no lado que foi aplicada a carga nos ensaios das LA001-A.....	114
Figura 55 - Modelos de bielas e tirantes na região do apoio das lajes LA001-A e forças nas barras da treliça após o processamento no CAST.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativos dos valores teóricos e os obtidos nos ensaios realizados por Ferreira (2008).....	26
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Situações relevantes para diferentes estratégias de pesquisa.....	61
Quadro 2 -	Listagem da demanda de qualidade do cliente.....	65
Quadro 3 -	Listagem das variáveis de resposta que avaliam quantitativamente a demanda de qualidade.....	66
Quadro 4 -	Listagem dos parâmetros do processo.....	66
Quadro 5 -	Listagem dos fatores de ruído.....	67
Quadro 6 –	Intensidade atribuída para as relações entre os parâmetros do processo e as variáveis de resposta.....	67
Quadro 7 -	Listagem dos fatores controláveis (subconjunto dos parâmetros do Processo que foram priorizados).....	68
Quadro 8 -	Listagem dos fatores mantidos constantes e seus respectivos ajustes.....	68
Quadro 9 -	Planilha de coleta de dados do ensaio.....	71
Quadro 10 -	Características das lajes ensaiadas.....	75
Quadro 11 -	Comparação dos esforços cortantes últimos experimentais com os esforços cortantes resistentes conforme a NBR 6118:2003 e a NBR 14861:2011 (com α em duplicidade).....	95
Quadro 12 –	Valores de esforço cortante para lajes sem capa.....	97
Quadro 13 –	Valores médios de esforço cortante para lajes sem capa.....	99
Quadro 14 -	Valores de esforço cortante médio apenas para os dois primeiros ensaios de cada tipo de lajes sem capa.....	101
Quadro 15 –	Valores de esforço cortante para lajes com capa.....	102
Quadro 16 –	Valores médios do esforço cortante para lajes com capa.....	105
Quadro 17 –	Fissuras típicas das lajes nos ensaios de cisalhamento e mecanismos de ruptura associados.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI.....	American Concrete Institute
ASSAP.....	Association of manufacturers of prestressed hollow core floors
CE.....	Comissão de Estudo
CEB.....	Comité Euro-International du Béton
CPCI.....	Canadian Prestressed Precast Concrete Institute
NBR.....	Norma Brasileira
EN.....	Norma Européia
FIB.....	Federation Internationale du beton
FIP.....	Federation Internationale de la Précontrainte
LA.....	Laje Alveolar
LAs.....	Lajes Alveolares

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

b_{alv}	largura horizontal do alvéolo a ser preenchido
b_w	largura da seção transversal
$b_{w,min}$	largura da seção transversal de concreto da laje alveolar descontando as larguras máximas dos alvéolos, ou seja, largura da soma das nervuras da laje na altura na qual a espessura das nervuras é mínima
$b_{w,tir}$	soma das larguras das nervuras da laje alveolar
d	altura útil da seção transversal
d_{tot}	altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural
f_{cd}	resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{ct}	resistência à tração do concreto
f_{ctd}	resistência de cálculo do concreto à tração
$f_{ctk,inf}$	resistência característica inferior do concreto à tração
h	altura da seção transversal
h_{tir}	espessura do tirante de concreto
l_{fc}	soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante com a altura da seção transversal.
l_{pt2}	comprimento de transmissão da força de protensão
l_x	distância da seção x a partir do final da laje
n	quantidade dos alvéolos preenchidos

LETRAS MAIÚSCULAS

A_{alv}	área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria
A_c	área da seção transversal de concreto
$A_{c,calc}$	área calculada da seção de concreto nos painéis de lajes alveolares
A_s	área da seção transversal de aço
A_{s1}	área da armadura de tração
A_{tir}	área da seção do tirante
B_{wt}	largura total da laje alveolar

D_{alv}	diâmetro dos alvéolos da laje alveolar
E_c	módulo de elasticidade do concreto moldado no local
E_p	módulo de elasticidade do concreto pré-moldado
F_{tir}	força de tração no tirante de concreto
H_L	espessura da laje alveolar pré-fabricada
H_C	espessura da capa de concreto sobre a laje alveolar pré-fabricada
L	comprimento da laje alveolar
$L_{b,Nec}$	comprimento de ancoragem necessário
L_{pr}	comprimento do preenchimento dos alvéolos com concreto
N^o alv Laje..	quantidade de alvéolos para uma laje alveolar
N^o alv Preenchidos	...quantidade de alvéolos preenchidos com concreto
N_p	força de protensão final, depois de todas as perdas;
N_{Sd}	força longitudinal na seção devido à protensão
P	força de protensão
R_{calc}	resistência ao esforço cortante último calculado para cada elemento ensaiado
R_{test}	resistência ao esforço último atual para cada elemento ensaiado
V	esforço cortante
V_{Rd}	esforço cortante resistente de cálculo
V_{Rd1}	força cortante resistente de cálculo na seção
$V_{Rd1,a1}$	força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão
$V_{Rd1,a2}$	força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão
V_{Rd2}	força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto
$V_{Rd2capa}$	força cortante resistente de cálculo, na seção, das diagonais comprimidas de concreto da laje alveolar com capa e alvéolos preenchidos.
V_{RK1}	esforço cortante resistente calculados
V_{Sd}	esforço cortante solicitante de cálculo
$V_{u,exp}$	esforço cortante último experimental

LETRAS GREGAS

α	relação entre a distância da seção x estudada a partir do final da laje e o valor do comprimento de transmissão
α ou β	ângulo entre tirantes e banzo inferior da treliça
ϕ	diâmetro das cordoalhas
γ_c	coeficiente de minoração da resistência do concreto
θ	ângulo entre bielas comprimidas e banzo inferior da treliça
ρ	taxa de armadura
ρ_1	taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada;
ρ_2	taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolo preenchido
σ_{cp}	tensão de compressão na seção transversal de concreto devido à protensão
$\sigma_{cp,1}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido (ou com alvéolo preenchido após a liberação da protensão)
$\sigma_{cp,2}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão
τ_c	tensão de cisalhamento no concreto da seção transversal da laje alveolar
τ_{Rd}	tensão de cisalhamento resistente de cálculo
$\Sigma b_{w,1}$	somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar
$\Sigma b_{w,2}$	somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	22
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos específicos	22
1.3 JUSTIFICATIVAS	23
1.3.1 Justificativa Econômica	23
1.3.2 Justificativa Tecnológica.....	27
1.3.3 Justificativa Ambiental	28
1.3.4 Justificativa Social	29
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 LAJES ALVEOLARES.....	31
2.1.1 Definição	31
2.1.2 Breve Histórico.....	32
2.1.3 Projeto e Dimensionamento Estrutural de Lajes Alveolares.....	33
2.1.4 Produção de lajes alveolares.....	34
2.1.5 Mecanismos de Ruptura das Lajes Alveolares.....	39
2.1.6 Cisalhamento em Lajes Alveolares	39
2.2 ESTUDOS RECENTES SOBRE CISALHAMENTO EM VIGAS E LAJES DE CONCRETO.....	49
2.2.1 Jung e Kim (2008)	49
2.2.2 Girhammar e Pajari (2008).....	50
2.3 MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	54
2.3.1 Regiões B e Regiões D do Elemento Estrutural.....	56
2.3.2 Esquemas alternativos de transmissão de esforços.....	57
2.3.3 Definição do ângulo θ	58

2.3.4 Rotina de Projeto.....	58
2.3.5 Exemplo de Aplicação Prática.....	59
2.3.6 Modelos de Bielas e Tirantes em Elementos de Concreto Protendido.....	60
3 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	61
3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	61
3.1.1 Justificativa da Escolha a Partir do Objetivo	61
3.1.2 Lógica de desenvolvimento da pesquisa.....	62
3.1.3 Testes de Validade.....	63
3.1.4 Planejamento do Experimento	64
3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS.....	69
3.2.1 Procedimentos de ensaio	69
3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS	71
4 OS EXPERIMENTOS: ENSAIOS DE CISALHAMENTO COM LAJES ALVEOLARES	73
4.1 A FORNECEDORA DAS AMOSTRAS.....	73
4.2 DESCRIÇÃO DAS LAJES ENSAIADAS	73
4.3 PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO DAS LAJES PARA OS ENSAIOS.....	75
4.4 PREPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	79
4.5 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	80
4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS	80
4.6.1 Lajes Sem Capa	81
4.6.2 Lajes Com Capa.....	87
4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	93
4.7.1 Correção a ser feita na NBR 14861:2011.....	94
4.7.2 Análise dos Valores de Esforço Cortante para Lajes sem Capa.....	97
4.7.3 Análise dos Valores de Esforço Cortante para Lajes com Capa.....	101
4.7.4 Análise da fissuração e mecanismos de ruptura para as lajes alveolares ensaiadas	108
5 MODELOS DE BIELAS E TIRANTES DAS LAJES ALVEOLARES SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CISALHAMENTO	110

5.1 DEFINIÇÃO DO MODELO ADOTADO PARA AS LAJES ENSAIADAS	110
5.2 MODELO DE BIELAS E TIRANTES PARA AS LAJES LA001-A	114
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
6.1 CONCLUSÕES.....	118
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	121
7 REFERÊNCIAS	123
ANEXO A – PROJETOS PARA FABRICAÇÃO, CAPEAMENTO E CONCRETAGEM DOS ALVÉOLOS DAS LAJES	126
APÊNDICE A - GRÁFICOS DESLOCAMENTO VERTICAL X CARGA DAS LAJES DURANTE OS ENSAIOS	128

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto pré-fabricado vêm sendo cada vez mais utilizadas no Brasil em virtude da sua alta velocidade de construção, garantia do controle de qualidade, redução dos desperdícios, organização e limpeza do canteiro de obras, além de outros benefícios.

Entre as peças de concreto pré-fabricado, as lajes alveolares em concreto protendido têm conquistado destaque, culminando no crescimento de sua utilização devido à versatilidade deste elemento estrutural. As lajes alveolares podem ser apoiadas tanto sobre estrutura de concreto pré-fabricado como sobre estrutura de concreto moldado no local, estruturas metálicas ou alvenaria estrutural. Este tipo de laje é adotado como solução para vencer vãos da ordem de 5 a 20m e tem as vantagens da rapidez da montagem na obra e de eliminar a necessidade de formas e escoramentos.

As lajes alveolares não possuem armadura para resistir à força cortante, devido ao método de produção por extrusão que impossibilita o posicionamento de estribos antes da concretagem. No Brasil até 2011 a sua resistência ao esforço cortante era calculada através da equação apresentada no item 19.4.1– Lajes sem armadura para força cortante, da norma NBR 6118:2003 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

Em novembro de 2011 a Comissão de Estudo CE-18:600.19 - Comissão de Estudos de Painéis Alveolares de Concreto da ABNT, publicou a revisão da norma brasileira NBR 14861 que agora trata mais detalhadamente de projeto, produção e montagem das lajes alveolares.

Rotineiramente o engenheiro calculista de lajes alveolares se depara com a situação na qual elas resistem ao momento fletor mas não resistem ao esforço cortante calculado através das equações das normas. A solução normalmente adotada é o preenchimento dos alvéolos com concreto nas extremidades da laje, de maneira a aumentar sua resistência ao esforço cortante através do aumento da área e da largura mínima da seção transversal de concreto da laje na região dos seus apoios.

Entretanto, os estudos publicados por Ferreira et al. (2008), Costa (2009) e Catoia (2011) já demonstraram que o preenchimento dos alvéolos com concreto

simples aumenta a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares em uma proporção muito menor do que o valor calculado aumentando-se a área da seção transversal e a largura mínima da laje na equação citada da NBR 6118:2003.

Por isso, e também devido à dificuldade de se conseguir garantir a aderência entre o concreto do preenchimento do alvéolo e da laje alveolar, e em função das más condições de concretagem dos alvéolos na obra, a NBR 14861:2011 trouxe coeficientes de redução da resistência do concreto dos alvéolos preenchidos e a recomendação de se preencher no máximo dois alvéolos por laje.

A presente dissertação de mestrado apresenta os resultados de ensaios de cisalhamento em lajes alveolares de 26,5cm de espessura com e sem capa de 5cm de espessura de concreto, sem preenchimento de alvéolos, com preenchimento de dois e de três alvéolos. Os valores de força cortante última obtidos nos ensaios foram comparados com os valores teóricos calculados através da NBR 6118:2003 e da NBR 14861:2011. Com estas comparações foi possível verificar o quanto os valores teóricos de ambas as normas se aproximam dos valores experimentais.

Foram observadas as configurações de fissuração e os mecanismos de ruptura durante os ensaios de cisalhamento, e com base nestas informações elaborou-se modelos de bielas e tirantes. Através destes modelos foi calculada a força de tração atuante nos tirantes de concreto mais solicitados, localizados nas nervuras das lajes alveolares e, considerando-se a resistência à tração do concreto, foi dimensionada a área da seção transversal destes tirantes e verificada qual a largura das nervuras que contribui com a resistência ao cisalhamento das lajes.

Santos (2006) afirma que o modelo de bielas e tirantes é uma das mais geniais idéias de concepção e análise estrutural do século XX e até da própria história do concreto. Esse modelo passou por evoluções e até hoje é usado e proposto por códigos e normas para o cálculo de estruturas não usuais de concreto armado, apesar de poder ser usado, também, para dimensionar estruturas usuais, como vigas bi apoiadas sem descontinuidades geométricas.

Como o panorama fissurado das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido é similar às vigas, ou seja, as fissuras de cisalhamento próximas aos apoios são inclinadas e as fissuras de flexão na região central do vão são verticais, acredita-se que os modelos de treliça são adequados para representar este tipo de laje.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A presente dissertação de mestrado teve como objetivo contribuir para a busca da resposta ao seguinte problema: Como as lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido respondem aos esforços de cisalhamento?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação foi estudar o comportamento das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Fazer ensaios de cisalhamento em lajes alveolares de 26,5cm de espessura sem capa, com capa de espessura 5cm armada com tela soldada, sem preenchimento de alvéolos, com preenchimento de concreto em dois alvéolos e com preenchimento de concreto em três alvéolos;
- b) Comparar os resultados obtidos através dos ensaios com resultados calculados através das normas brasileiras NBR 6118:2003 e NBR 14861:2011;
- c) Desenvolver modelos de bielas e tirantes de acordo com o comportamento das lajes alveolares na ruptura para verificar a tensão de tração nos tirantes de concreto que são as nervuras da laje alveolar;
- d) Verificar a eficácia do preenchimento dos alvéolos executado após a liberação da força de protensão e concretado juntamente com a capa;
- e) Verificar se os valores de força cortante resistente para lajes com alvéolos preenchidos calculados através da NBR 14861:2011 estão se aproximando mais dos valores experimentais do que os valores calculados através da NBR 6118:2003;

- f) Propor recomendações quanto ao modelo de cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares, preenchimento dos alvéolos e execução da capa de concreto.

1.3 JUSTIFICATIVAS

1.3.1 Justificativa Econômica

Atualmente a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares no Brasil é dimensionada através das equações do item 7.3.2.8 da NBR 14861:2011.

Nos casos em que o esforço cortante solicitante é maior que o esforço cortante resistente calculado, a alternativa utilizada para aumentar a resistência ao cisalhamento é o preenchimento de alguns alvéolos nas extremidades da laje com concreto adicional na fábrica ou na obra.

A Figura 1 mostra a seção longitudinal da laje alveolar com alvéolos concretados nas extremidades e o gráfico do esforço cortante solicitante de cálculo para a laje representada.

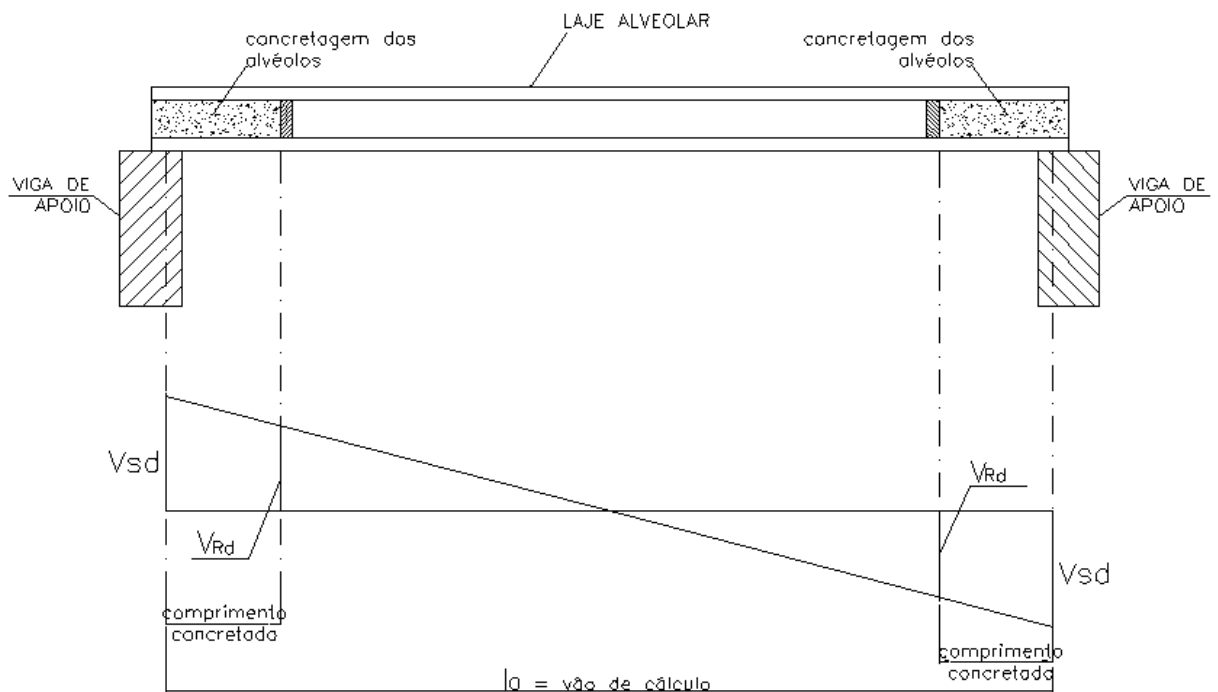


FIGURA 1 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA LAJE ALVEOLAR COM ALVÉOLOS CONCRETADOS NAS EXTREMIDADES E GRÁFICO DO ESFORÇO CORTANTE SOLICITANTE DE CÁLCULO.

FONTE: A autora (2012).

Os engenheiros projetistas costumam adotar o comprimento do alvéolo a ser concretado começando na extremidade da laje, onde o esforço cortante solicitante tem seu valor máximo, e indo até a posição na qual o valor do esforço cortante solicitante é menor que o esforço cortante resistente de cálculo da laje sem alvéolos concretados.

Entretanto, a nova norma NBR 14861:2011 determina que o comprimento que deve ser concretado, L_{pr} , seja a soma do comprimento de transmissão da força de protensão ($l_{pt2}=85\phi$, sendo ϕ o diâmetro das cordoalhas) mais a soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante e a altura da seção transversal. Esta soma resulta em um comprimento sempre muito maior do que os valores que os projetistas costumavam utilizar até 2011. Este tópico merece ser melhor estudado, mas não faz parte dos objetivos da presente pesquisa.

A Figura 2 mostra a seção transversal da laje alveolar original, ou seja, apenas a seção de concreto extrusado e mostra também a seção com concretagem de todos os alvéolos.

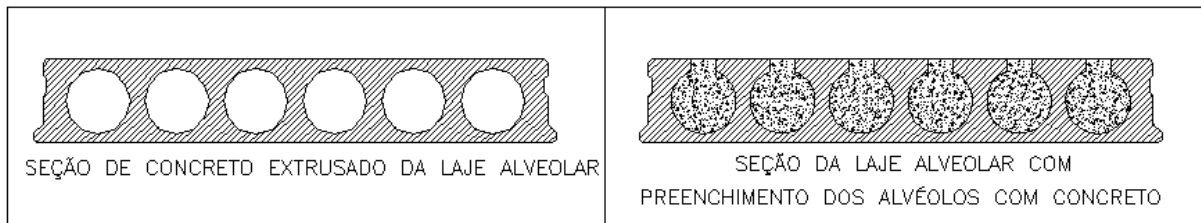


FIGURA 2 – SEÇÃO TRANSVERSAL DA LAJE ALVEOLAR: SEÇÃO DE CONCRETO EXTRUSADO X SEÇÃO COM PREENCHIMENTO DE ALVÉOLOS.

FONTE: A autora (2012).

Na prática normalmente são preenchidos apenas alguns dos alvéolos, de acordo com a largura mínima necessária para que a seção transversal da laje suporte o esforço cortante solicitante.

Para as lajes alveolares produzidas através do método de extrusão, esta alternativa de concretagem dos alvéolos para aumentar a resistência ao esforço cortante aumenta os custos de mão de obra e material para o fabricante, pois após a concretagem da pista de laje com os alvéolos padrão pela máquina extrusora, é necessária a concretagem dos alvéolos manualmente.

Uma segunda opção é fazer aberturas nos alvéolos na fábrica, conforme a Figura 3, e preencher os alvéolos na obra juntamente com a concretagem da capa moldada no local.



FIGURA 3 – EXECUÇÃO DE ABERTURA DOS ALVÉOLOS NA FÁBRICA PARA POSTERIOR CONCRETAGEM NA OBRA.

FONTE: A autora (2012).

Nesta segunda alternativa, aumenta-se os custos de mão de obra para a fabricação das lajes porque após a concretagem da pista deve-se abrir a parte superior dos alvéolos manualmente e aumenta-se também o consumo de concreto moldado no local para a concretagem de alvéolos.

A opção por abertura dos alvéolos na fábrica fragiliza a seção das lajes para o manuseio e transporte até a obra e gera custos devido às fissuras e quebras que acabam inutilizando algumas lajes. Além disso, esta opção pode acarretar custos adicionais devido à acidentes de trabalho que podem ocorrer devido à queda das lajes trincadas.

De acordo com Melo (2004), este tipo de elemento pré-fabricado é totalmente industrializado e envolve um baixo número de horas/homem na sua produção. Por isso, qualquer intervenção manual, seja de recorte ou reforço dos alvéolos da laje, eleva bastante seu custo, diminuindo sua característica industrial-mecanizada.

Na Tabela 1 pode ser constatado que, de acordo com os resultados dos ensaios realizados por Ferreira et al. (2008), o aumento da resistência experimental ao cisalhamento das lajes alveolares através do preenchimento dos alvéolos com concreto não ocorreu na mesma proporção que o aumento da resistência teórica calculada de acordo com as prescrições da NBR 6118:2003.

Enquanto a resistência ao cisalhamento de projeto aumentou em 128% para as lajes alveolares com quatro alvéolos preenchidos com concreto em relação às






lajes sem preenchimento de alvéolos, a resistência à ruptura por cisalhamento nos ensaios aumentou apenas 48%.

Para o caso das lajes com dois alvéolos preenchidos com concreto, a resistência de projeto aumentou 67,5% enquanto que a resistência à ruptura por cisalhamento nos ensaios aumentou 40,8%.

Se em ensaios realizados em laboratório com todo o controle de qualidade a resistência não atingiu o valor calculado, certamente estes valores não serão atingidos na prática.

Por isso, e também devido à dificuldade de se conseguir garantir a aderência entre o concreto do preenchimento dos alvéolos e da laje alveolar, e em função das más condições de concretagem dos alvéolos na obra, a NBR 14861:2011 trouxe coeficientes de redução da resistência do concreto dos alvéolos preenchidos e a recomendação de se preencher no máximo dois alvéolos por laje.

TABELA 1 – COMPARATIVOS DOS VALORES TEÓRICOS E OS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS POR FERREIRA (2008).

Descrição	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	V_{Rd} (kN)	$V_{S,max}$ (kN)	λ
sem capa 	118,01	102,9	81,95	58,54	2,02
capa e tela 	160,21	113,65	88,73	63,38	2,53
capa com fibras 	197,25	113,65	88,73	63,38	3,11
dois alvéolos preenchidos 	166,16	173,74	137,3	97,86	1,70
quatro alvéolos preenchidos 	175,18	238,87	186,98	133,56	1,31

$V_{u,exp}$ – média de ruptura por cisalhamento nos ensaios; V_{Rk} – resistência característica ao cisalhamento; V_{Rd} – resistência ao cisalhamento de projeto; $V_{S,max}$ – cisalhamento máximo de serviço; $\lambda = V_{u,exp} / V_{S,max}$

FONTE: FERREIRA, et al. (2008).

Portanto, estava se desperdiçando recursos calculando-se através da NBR 6118:2003 a quantidade de alvéolos a serem preenchidos com concreto. A equação apresentada no item 19.4.1– Lajes sem armadura para força cortante, da norma

NBR 6118:2003 apresenta resultados coerentes de resistência ao cisalhamento para a laje alveolar padrão, sem considerar a concretagem de alvéolos no cálculo. Mas o artifício de concretar as extremidades dos alvéolos e calcular a resistência ao cisalhamento através desta mesma equação, simplesmente alterando a área da seção transversal de concreto (A_c) e a largura (b_w) não se mostrava como uma opção adequada quando a presente pesquisa foi iniciada.

Nesta dissertação foi feita a verificação se os valores de força cortante resistente para lajes com alvéolos preenchidos calculados através da NBR 14861:2011 estão se aproximando mais dos valores experimentais do que os valores calculados através da NBR 6118:2003.

1.3.2 Justificativa Tecnológica

Melo (2004) afirma que existem basicamente dois tipos de lajes alveolares: a extrusiva e a moldada. As lajes extrusivas apresentam melhor qualidade final, visto que se pode utilizar um fator água-cimento muito baixo, próximo ao necessário para a hidratação do cimento, garantindo maior resistência à compressão e menor porosidade do concreto.

O concreto das lajes alveolares extrusadas tem uma excelente qualidade devido ao seu alto grau de compactação. Quando é necessária a concretagem das extremidades dos alvéolos, este excelente concreto da parte superior dos alvéolos é “desmoronado” e misturado a um concreto comum para o preenchimento dos alvéolos ou é simplesmente retirado para que os alvéolos sejam preenchidos posteriormente com concreto do capeamento na obra.

Provavelmente esta é uma das causas da resistência ao cisalhamento na prática não aumentar na mesma proporção que a resistência calculada.

No caso do preenchimento dos alvéolos na obra, não é garantido que serão tomados todos os cuidados necessários para que o concreto preencha exatamente a região especificada em projeto e para que o concreto fique bem aderido ao alvéolo.

Considerando que em ensaios feitos em laboratório foram obtidos resultados que mostram que o aumento da área da seção de concreto através da concretagem de alvéolos não aumenta a resistência das lajes alveolares ao cisalhamento na mesma proporção que o aumento da resistência calculada, é um erro continuar

calculando a quantidade de alvéolos a serem concretados através deste mesmo método de cálculo.

Portanto, inicialmente, a principal justificativa tecnológica desta pesquisa era não continuar adotando uma solução ineficaz para este problema que era calcular através da NBR 6118:2003 a quantidade de alvéolos a serem preenchidos.

Agora a NBR 14861:2011 já adotou coeficientes para a redução da parcela referente à resistência do preenchimento dos alvéolos, e esta pesquisa irá verificar através da comparação com resultados experimentais, quanto os valores calculados pela nova norma se aproximam da realidade.

O dimensionamento das lajes alveolares através de modelos de bielas e tirantes poderá contribuir com a solução deste problema fornecendo novas alternativas.

1.3.3 Justificativa Ambiental

John (2010) afirma que o processo produtivo do cimento necessariamente gera CO₂, gás importante no efeito estufa. Para cada tonelada de clínquer produzido mais de 600 kg de CO₂ são gerados.

As lajes alveolares são elementos estruturais que contribuem para a sustentabilidade ambiental, visto que elas eliminam a necessidade de formas e escoramento e utilizam quantidades de aço e concreto significativamente reduzidas em relação às estruturas com lajes convencionais de concreto armado.

Além disso, pelo fato das lajes alveolares vencerem grandes vãos, é reduzida a quantidade de pilares das obras, reduzindo também o volume de concreto e aço utilizado na estrutura como um todo e, conseqüentemente, reduzindo o impacto ambiental provocado pela produção destes materiais.

A busca pela melhoria dos fatores de segurança para o dimensionamento ao cisalhamento das lajes alveolares e da possibilidade de redução na necessidade de concretagem dos alvéolos contribui para viabilizar a utilização deste tipo de laje, minimizando os danos ambientais causados pela construção de estruturas de concreto.

1.3.4 Justificativa Social

De maneira a atender a crescente demanda por habitações populares que vem ocorrendo nos últimos anos no Brasil, as empresas fabricantes de estruturas pré-moldadas de concreto estão desenvolvendo soluções neste setor, utilizando, entre outros elementos estruturais, as lajes alveolares.

Quanto mais aproximarmos o dimensionamento teórico ao funcionamento real das lajes alveolares, mais econômicas se tornarão as estruturas com este tipo de laje. Desta maneira elas poderão cada vez mais ser utilizadas para diversas aplicações e também para habitações econômicas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 trata sobre a introdução da dissertação, apresentando o problema de pesquisa, os objetivos, as justificativas e a organização da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica iniciando com o tópico sobre lajes alveolares, incluindo definição, histórico, aspectos sobre projeto, dimensionamento e produção, resistência ao cisalhamento, equações das normas para o cálculo da força cortante resistente, mecanismos de ruptura e procedimentos para ensaios de cisalhamento. Na continuação da revisão bibliográfica é apresentado um tópico com alguns estudos recentes sobre cisalhamento em vigas e lajes de concreto. O último tópico da revisão bibliográfica trata sobre modelos de bielas e tirantes.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia de pesquisa contendo a definição da estratégia de pesquisa, o protocolo de coleta de dados e o método de análise de dados.

No capítulo 4 são apresentados os experimentos realizados, ou seja, os ensaios de cisalhamento com lajes alveolares. Este capítulo começa com a descrição das lajes ensaiadas e segue com a produção e preparação das lajes para os ensaios, a execução dos ensaios propriamente dita, os resultados dos ensaios e a análise dos resultados, subdividindo-se em lajes sem capa e lajes com capa, análise da configuração da fissuração e mecanismos de ruptura.

O capítulo 5 trata sobre os modelos de bielas e tirantes desenvolvidos para as lajes submetidas a ensaios de cisalhamento.

O capítulo 6 traz as conclusões desta dissertação de mestrado e as sugestões para futuras pesquisas.

O capítulo 7 mostra as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LAJES ALVEOLARES

2.1.1 Definição

De acordo com a norma europeia EN 1168:2005, laje alveolar é um elemento monolítico, protendido ou armado com uma espessura total constante dividida em um flange superior e outro inferior, ligados por nervuras verticais, constituindo os alvéolos como vazios longitudinais na seção transversal constante que apresenta um eixo vertical de simetria (Figura 4). Usualmente os elementos alveolares com largura máxima de 1200 mm não possuem armadura para o cisalhamento ou armadura transversal. Elementos acima de 2400 mm não possuem armadura para o cisalhamento. A armadura principal é constituída por armadura passiva ou armadura ativa.

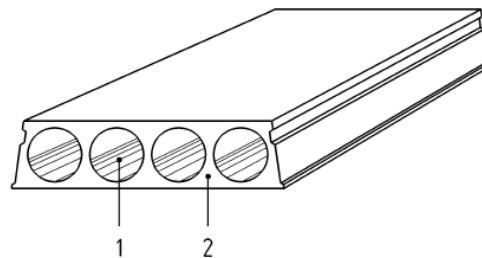


FIGURA 4 - EXEMPLO DE LAJE ALVEOLAR.

Onde: 1=alvéolos; 2=nervura

FONTE: EN 1168 (2005).

O Manual for Design of Hollow Core Slabs do Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI, 1998) define laje alveolar como um elemento de concreto protendido pré-fabricado com alvéolos contínuos para promover a redução do peso próprio e conseqüentemente do custo e tem como vantagem a utilização dos alvéolos como passagem embutida de tubulações elétricas e mecânicas. Utilizadas principalmente como sistemas de pavimentos para pisos e coberturas, as lajes alveolares tem também aplicações como painéis de parede e tabuleiros de ponte.

Atualmente, em grande parte das obras no Brasil, os alvéolos das lajes não têm sido usados para passagens embutidas de instalações elétricas, hidráulicas e mecânicas devido à dificuldade de manutenção destas instalações dentro dos alvéolos. Tem sido mais comum a utilização de shafts e forros de gesso para esconder estas instalações de maneira que a manutenção seja facilitada.

A norma brasileira NBR 14861:2011 define laje alveolar como peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento. A seção transversal é alveolar, com a presença de almas de concreto e alvéolos.

Esta definição apresentada na norma brasileira representa o tipo de laje alveolar mais utilizado no Brasil que é a pré-fabricada em concreto protendido estudada nesta pesquisa.

2.1.2 Breve Histórico

Os painéis alveolares constituem-se em um dos mais populares elementos pré-moldados empregados no mundo, segundo El Debs (2000).

O autor relata que os painéis alveolares tiveram origem na Alemanha e hoje sua técnica de execução é bastante desenvolvida na própria Alemanha e nos Estados Unidos e tem continuamente evoluído ao longo dos anos, em termos de altura e vão.

Em contrapartida, o Canadian Prestressed Precast Concrete Institute (CPCI, 2010) afirma que o processo existente hoje de fabricação das lajes alveolares surgiu em 1962 em Winnipeg no Canadá.

Segundo o CPCI (2010) por muitos anos, as lajes alveolares eram produzidas com os alvéolos formados por tubos de borracha infláveis. Após o endurecimento do concreto, o ar era esvaziado e os tubos eram retirados das lajes. Este era um processo caro e trabalhoso. Em 1962, o processo Spiroll foi inventado em Winnipeg, sob a direção de Glen C. Booth, Building Products and Coal Ltd. A máquina vibratória que utilizava concreto com slump zero foi desenvolvida para extrusar a laje alveolar sobre a armadura protendida. Hoje, esse mesmo processo

após muitos refinamentos sucessivos é utilizado em todo o mundo para fabricar lajes e painéis.

Catoia (2011) relata que no Brasil, a tecnologia de produção das lajes alveolares passou a ser empregada na década de 1980 e teve sua consolidação a partir de 2001, acompanhando o maior crescimento das estruturas pré-moldadas no Brasil.

2.1.3 Projeto e Dimensionamento Estrutural de Lajes Alveolares

De acordo com o CPCI (2010), a grande vantagem da utilização de painéis alveolares como lajes se deve à redução do volume de concreto devido aos alvéolos mantendo a altura útil da seção. Além disso, por serem protendidos, estes elementos conseguem vencer grandes vãos com economia.

De acordo com Melo (2004), o sistema de lajes de piso em lajes alveolares é o que obteve maior sucesso no mercado da construção civil. De fácil instalação, pode atingir grandes vãos, facilitando o layout e otimizando a estrutura, seja ela moldada “in loco”, metálica ou de elementos reticulados em pré-fabricados.

El Debs (2000) explica que os painéis alveolares podem ser empregados tanto para execução de lajes, que é mais comum, como para paredes. No caso de lajes, estes elementos podem receber uma capa de concreto para formar seção composta.

O presente trabalho tratou somente da utilização destes elementos como lajes.

A Figura 5 apresenta uma seção transversal típica de uma laje alveolar.

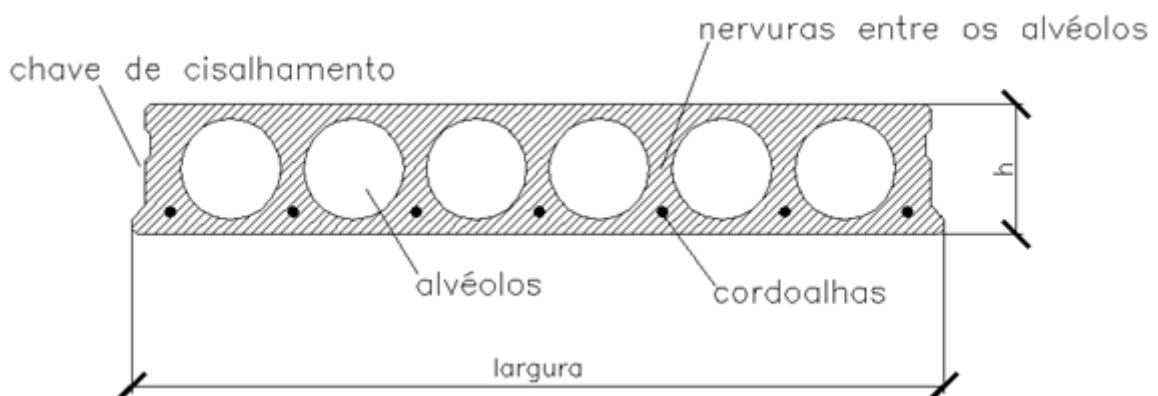


FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA DAS LAJES ALVEOLARES.
FONTE: A autora (2012).

Segundo o Manual ASSAP (2002) como é o caso de todas as estruturas, o projeto de pavimentos de lajes alveolares é uma operação que acontece em cinco fases separadas e igualmente importantes:

- a) considerações sobre os materiais a serem utilizados
- b) análise global da estrutura e peculiaridades estáticas e de flexão dos pavimentos de lajes alveolares
- c) pré-dimensionamento e projeto levando em conta todas as deformações, incluindo aquelas de longa duração;
- d) representação gráfica das estruturas
- e) cálculo com verificação da flexão, cisalhamento e tensões variadas.

El Debs (2000) afirma que na análise estrutural das lajes executadas com painéis alveolares admite-se que o comportamento do elemento corresponda ao de laje armada em uma direção.

De acordo com o PCI (1998) assim como nos elementos de concreto protendido em geral, as lajes alveolares são checadas para as tensões de transferência da protensão, tensões durante o manuseio, tensões devido às sobrecargas em serviço, deflexões e resistência (última) de projeto no cisalhamento e na flexão. Para casos de sobrecargas uniformemente distribuídas, as tabelas de sobrecargas disponibilizadas pelos fabricantes levarão em conta estas várias considerações de projeto e informarão a capacidade de carga baseada na pior situação.

El Debs (2000) ressalta ainda que no dimensionamento dos elementos pré-moldados protendidos deve-se tomar bastante cuidado com a conjunção dos seguintes fatores junto aos apoios: a) efeito dos esforços localizados produzidos pela transferência da força de protensão e da reação de apoio; b) ancoragem da armadura de protensão; e c) resistência à força cortante sem armadura transversal.

2.1.4 Produção de lajes alveolares

Costa (2009) explica que existem dois métodos básicos de produção de lajes alveolares: fabricação por extrusão ou por fôrma deslizante.

A presente dissertação tratou sobre lajes alveolares fabricadas por extrusão.

Segundo El Debs (2000), embora possam ser moldados em formas fixas, os painéis alveolares são normalmente executados por extrusão ou por forma deslizante, em pistas longas de concretagem, em concreto protendido. Nessa forma de execução, os painéis são produzidos no comprimento da pista e, posteriormente, serrados nos comprimentos desejados.

As lajes alveolares são produzidas em pistas que chegam a ter 200m de comprimento, dependendo do espaço disponível na fábrica. Petrucelli (2009) afirma que essas pistas são constituídas de formas metálicas com trilhos para apoiar a máquina que se desloca sobre eles.

Segundo Catoia (2011) inicialmente os cabos de protensão são dispostos sobre as pistas de concretagem e, posteriormente, protendidos com tensão previamente estipulada. Em seguida é realizada a ancoragem das cordoalhas em cabeceiras próprias para essa finalidade, localizadas na extremidade da pista.

Petrucelli (2009) explica que nas lajes alveolares protendidas é utilizada a pré-tração, pois a armadura é tracionada antes do lançamento do concreto, e a protensão se dá com a aderência entre o concreto e a mesma, após seu endurecimento.

O item 3.1.7 da norma brasileira NBR 6118:2003 define concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial) como sendo o concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto, salientando ainda que a ancoragem no concreto realiza-se só por aderência.

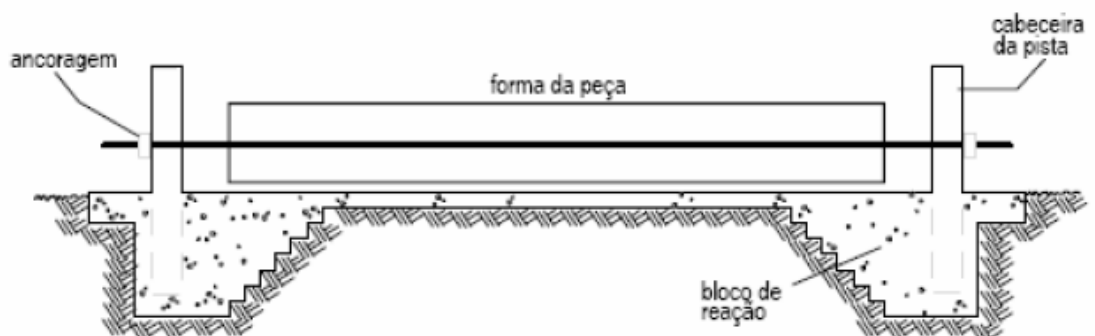


FIGURA 6 - MODELO ESQUEMÁTICO DE UMA PISTA DE PROTENSÃO.
FONTE: VERÍSSIMO E KLÉOS (1998) apud LACERDA (2007).

A Figura 6 apresenta um modelo esquemático de uma pista de protensão que é o modelo utilizado na produção de lajes alveolares protendidas.

Petrucci (2009) afirma que normalmente são mais usados os macacos que protendem cabo por cabo, mas o ideal é aplicar a protensão em todo o conjunto de uma só vez, pois a tensão do primeiro cabo esticado gera uma pequena deformação na cabeceira, que afetará o alongamento do segundo cabo. Sendo assim, cada cabo influencia o seguinte, havendo uma diferença entre os alongamentos medidos, pois o valor obtido será menor que o real. Como essa diferença é pequena, geralmente não é levada em consideração na determinação do alongamento.



FIGURA 7 – FUNCIONÁRIO POSICIONANDO O MACACO QUE PROTENDE CADA CORDOALHA ISOLADAMENTE.
FONTE: PETRUCELLI (2009).

Segundo Catoia (2011) após a protensão, o desmoldante é aplicado sobre a pista.

Costa (2009) explica que na fabricação por extrusão, o concreto com slump baixo é empurrado para a pista pela máquina. Os alvéolos são formados pela compactação do concreto por tubos helicoidais como mostrado na Figura 9. Neste método há apenas um estágio de lançamento e compactação do concreto.

Segundo Petrucci (2009), para o sistema de extrusão em particular, somente concretos com uma relação água/cimento (a/c) muito baixa, de aproximadamente 0,30 a 0,40, pode ser usado. Conseqüentemente, altas resistências do concreto podem ser obtidas, variando de aproximadamente 50 MPa a 75 MPa nos testemunhos (corpos-de-prova retirados da laje) para resistência à

compressão, e de 4 a 7 MPa para resistência à tração, usando uma quantidade mínima de cimento.

A Figura 8 apresenta um modelo de máquina extrusora para concretagem de lajes alveolares e a Figura 9 o detalhe das hélices que formam os alvéolos na máquina extrusora.



FIGURA 8 - MÁQUINA EXTRUSORA PARA FABRICAÇÃO DE LAJES ALVEOLARES.
FONTE: Disponível em http://www.precastfountain.com/precast_machinery/extruder-1.
Acesso em: 18 jun 2011.



FIGURA 9 - DETALHE DAS HÉLICES DA MÁQUINA EXTRUSORA.
FONTE: EDEKLING et al. (2006) apud COSTA (2009).

Petrucci (2009) afirma também que para facilitar o processo, as fábricas têm adotado que os recortes nas lajes para encaixe de pilares devem ser feitos ainda na pista com o concreto fresco, já que é mais trabalhoso quando o concreto passou pelo processo de cura, evitando assim a necessidade de movimentar peças no estoque, sendo estas armazenadas prontas para a obra.

Segundo o Manual ASSAP (2002), funcionários seguindo a máquina de concretagem fazem o trabalho manual no concreto fresco para atender às especificações de projeto (Figura 10).

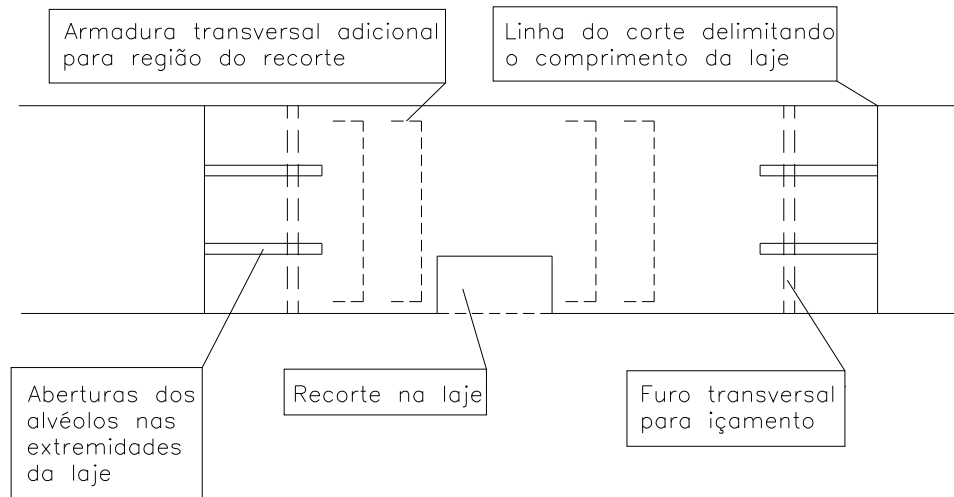


FIGURA 10 – OPERAÇÕES MANUAIS EM UMA LAJE IMEDIATAMENTE APÓS A CONCRETAGEM. FONTE: ASSAP (2002), adaptado pela autora (2012).

A primeira operação é o traçado da linha de corte delimitando o comprimento da laje com a aplicação imediata desta marca de identificação. Linhas de qualquer formato de recortes a serem feitos no concreto fresco são também desenhadas. Em seguida, são abertos os alvéolos nas extremidades das lajes, os furos para içamento e as armaduras suplementares para reforço são adicionadas. (MANUAL ASSAP, 2002)

De acordo com Petrucelli (2009), as curas a vapor e térmica são mais indicadas para acelerar o procedimento a fim de liberar a protensão da pista e permitir nova etapa de produção. Para este tipo de produção não convém utilizar cura química, pois a nata do produto aplicada na superfície da laje pode prejudicar a aderência quando da concretagem da capa.

Catoia (2011) explica que quando o concreto adquire resistência suficiente, por exemplo, 30 MPa, é feito o corte das lajes com uma serra de disco diamantado, de acordo com o especificado em projeto. A partir deste instante, a protensão começa a atuar nos elementos. A autora afirma ainda que ao serem retiradas da pista, as lajes passam por inspeção final (cria-se uma ficha individual de cada peça) e são encaminhadas ao setor de estocagem ou diretamente carregadas nos

caminhões para a entrega na obra. O transporte deve ser realizado por carretas específicas para esta finalidade.

2.1.5 Mecanismos de Ruptura das Lajes Alveolares

De acordo com Costa (2009), os mecanismos de ruptura na laje alveolar, entre outros fatores, são bastante influenciados pela geometria da seção transversal (altura efetiva da laje, espessura das nervuras, formato dos alvéolos), pelo nível de protensão (considerando as perdas de protensão desde a fase inicial até as perdas ao longo do tempo), pelas resistências à compressão e à tração do concreto, pela qualidade da aderência entre o concreto e a armadura ativa. Somada a todas estas variáveis há de se destacar que o painel de laje alveolar na prática é dimensionado para funcionar junto com uma capa de concreto que será acrescida posteriormente. Desta forma, somam-se às condições anteriores as questões de aderência entre o elemento pré-fabricado e a capa.

Costa (2009) afirma também que entre os diversos mecanismos de ruptura podem ser citados os seguintes: a) falha por perda da ancoragem (escorregamento da armadura); b) falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência de tração do concreto); c) falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento); d) falha por cisalhamento combinado com torção (em peças que não são planas); e) falha por flexão (ELU), com grande possibilidade, próximo à ruptura, do escorregamento da armadura ativa junto ao apoio; f) falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento, que pode ocorrer em peças com vãos pequenos e/ou com carregamentos mais elevados; g) falha por combinação de flexão e escorregamento da armadura ativa; h) separação da capa de concreto com o elemento pré-fabricado.

2.1.6 Cisalhamento em Lajes Alveolares

El Debs (2000) afirma que o dimensionamento dos painéis alveolares apresenta algumas particularidades. A armadura dos painéis de concreto protendido é, salvo casos especiais, constituída apenas por armadura ativa, na parte inferior e, em geral, também na mesa superior. De forma que não existe armadura especial para resistir à força cortante e nem para solicitações na direção transversal, o que

obriga a contar com a resistência à tração do concreto para resistir a essas solicitações.

Petrucci (2009) explica que o processo de fabricação mecanizado das lajes não permite a introdução de armaduras de cisalhamento (estribos), tornando o concreto e as armaduras de protensão responsáveis por combater as tensões devido ao cisalhamento. Por isso, há grande importância no intertravamento dos agregados (*interlock*), que garante eficiência na compactação e alta resistência final do concreto e na espessura das lajes.

De acordo com Petrucci (2009) diferentemente da flexão, a capacidade resistente ao cisalhamento é determinada sempre pelo estado limite último, não havendo condições de limitação em serviço. A ruptura se dá de forma repentina, com a fissuração se estendendo pela alma, sendo esta devida a um carregamento que a seção não consegue resistir.

2.1.6.1 Dimensionamento ao cisalhamento de acordo com a NBR 6118:2003

No Brasil, até 2011 a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares era calculada de acordo com o item 19.4.1 da NBR 6118:2003 para lajes sem armadura para força cortante, conforme equações a seguir:

$$V_{Rd} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Onde:

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} \quad (2)$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad (3)$$

$$\rho = A_{s1} / b_w \cdot d \quad (4)$$

$$\sigma_{cp} = N_{Sd} / A_{c,calc} \quad (5)$$

k = coeficiente com os seguintes valores:

- para elementos nos quais 50% da armadura não chega até o apoio

$$k = |1| \quad (6)$$

- para os demais casos

$$k = |1,6 - d| \geq 1, \text{ com } d \text{ em metros} \quad (7)$$

A_{S1} é a área da armadura de tração que se estende até não menos que $d+L_{b,nec}$ além da seção considerada

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil

d = altura útil da seção

N_{Sd} = força longitudinal na seção devido à protensão

γ_c = coeficiente de segurança

$A_{c,calc}$ = área calculada da seção de concreto nos painéis de lajes alveolares

2.1.6.2 Dimensionamento ao cisalhamento de acordo com a NBR 14861:2011

Em novembro de 2011 foi publicada a NBR 14861:2011 – Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e Procedimentos que determina em seu item 7.3.2.2 que a resistência das lajes alveolares, em uma determinada seção transversal, em regiões fissuradas, deve ser considerada satisfatória, quando verificadas simultaneamente as seguintes condições:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (8)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{ou} \quad (9)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2 \text{ capa}} \quad (10)$$

Onde:

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo na seção;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{Rd2 \text{ capa}}$ é a força cortante resistente de cálculo, na seção, das diagonais comprimidas de concreto da laje alveolar com capa e alvéolos preenchidos.

Sendo:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \nu f_{cd} 0,9 d \Sigma b_{w,1} \quad (11)$$

$$V_{Rd2 \text{ capa}} = \frac{1}{2} \nu f_{cd} 0,9 d_{\text{tot}} \Sigma b_{w,2} \quad (12)$$

$$\nu = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (13)$$

Onde

$\Sigma b_{w,1}$ e $\Sigma b_{w,2}$ são o somatório das nervuras (internas e externas) da laje

alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;

d é a altura útil da seção transversal da laje alveolar;

d_{tot} é a altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto usada no projeto, conforme a ABNT NBR 9062.

No item 7.3.2.3, a NBR 14861:2011 determina que a resistência ao esforço cortante nas lajes alveolares pode ser aumentada com a especificação de capa estrutural e/ou preenchimento dos alvéolos. Quando for adotado o preenchimento de alvéolos, o comprimento longitudinal desse preenchimento ao longo dos alvéolos das lajes alveolares deve ser pelo menos maior que L_{pr} . Para o preenchimento dos alvéolos, deve ser usado concreto adequado, com mesma resistência e durabilidade do concreto do elemento a ser preenchido, considerando-se as verificações das parcelas de resistência dos alvéolos, conforme o item 7.3.2.8 desta mesma norma.

$$L_{pr} = l_{pt2} + l_{fc} \quad (14)$$

Onde,

l_{pt2} é o valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ);

l_{fc} é a soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante com a altura da seção transversal.

A NBR 14861:2011 continua nos itens 7.3.2.4 a 7.3.2.8 tratando sobre a resistência ao cisalhamento e o comportamento conjunto laje alveolar mais capa mais alvéolos preenchidos conforme transcrito a seguir:

7.3.2.4 Pode-se considerar comportamento conjunto entre a capa estrutural e a seção de projeto formada por meio do preenchimento de alvéolos de lajes alveolares, desde que seja garantida a aderência entre a capa estrutural e a superfície da laje alveolar (conforme 7.1.5) e a aderência entre o concreto lançado no alvéolo e a superfície do alvéolo da laje alveolar. Neste caso, deve-se garantir o completo preenchimento dos alvéolos, havendo controle da retração do concreto, para que não ocorram efeitos desfavoráveis para a aderência entre a laje e o concreto lançado nos alvéolos. Também devem ser atendidos os procedimentos recomendados para execução da capa estrutural de acordo com a Seção 9.7.3.2.5 Para a verificação da resistência da interface entre os elementos de lajes alveolares e o capeamento estrutural, bem como da contribuição da resistência dos alvéolos ao cisalhamento, podem ser adotadas verificações experimentais desde que atendam aos requisitos de 5.5 da ABNT NBR

9062:2006, 5.5.7.3.2.6 A critério do projeto, o preenchimento dos alvéolos pode ocorrer tanto anteriormente à liberação da protensão (logo após a extrusão ou moldagem da laje na pista de protensão) quanto posterior à liberação da protensão (na fábrica ou no local da obra). Entretanto, o momento em que o preenchimento for executado influencia nas considerações de cálculo de acordo com as expressões de 7.3.2.8.2 e 7.3.2.8.3. 7.3.2.7 A consideração em projeto de mais do que dois alvéolos preenchidos pode ser feita desde que devidamente fundamentada em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental. 7.3.2.8 A verificação da resistência à força cortante, considerando ou não a capa estrutural e o preenchimento de alvéolos deve ser feita pelas equações dadas a seguir, que consideram o preenchimento de até dois alvéolos (com contribuição de 50% da largura do alvéolo), em condições de simetria na seção transversal (conforme Figuras 4 e 5). [As Figuras 4 e 5 da NBR 14861:2011 são as Figuras 11 e 12 desta dissertação]. (NBR 14861, 2011)

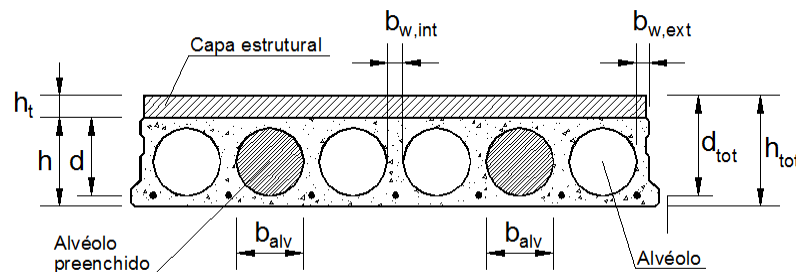


FIGURA 11 - EXEMPLO DE SEÇÃO TRANSVERSAL DE LAJE ALVEOLAR COM CAPA ESTRUTURAL E ALVÉOLOS PREENCHIDOS.
FONTE: NBR 14861 (2011).

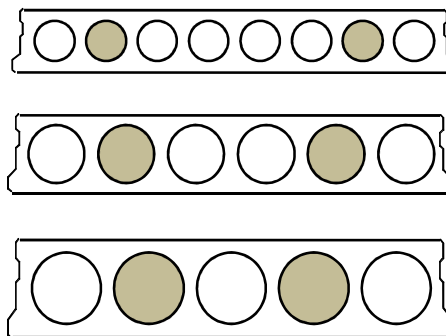


FIGURA 12 - POSICIONAMENTO RECOMENDADO PARA PREENCHIMENTO DE CONCRETO EM DOIS ALVÉOLOS PARA ACRÉSCIMO NA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE.
FONTE: NBR 14861 (2011).

No item 7.3.2.8.1 da NBR 14861:2011, é determinado que a resistência V_{Rd1} à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural (Seção 9 da referida norma) deve ser calculada segundo a expressão:

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (15)$$

Sendo:

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad (16)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad (17)$$

$$\Sigma b_{w,1} = \Sigma b_{w,ext} + \Sigma b_{w,int} \quad (18)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{(\Sigma b_{w,1} \cdot d)} \quad (19)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \alpha \quad (20)$$

$$k = 1.6 - d \geq 1 \quad (21)$$

sendo d, nesta expressão, somente em metros (m).

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

f_{ctd} é a resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado e do moldado no local;

$\Sigma b_{w,1}$ é o somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar;

A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

ρ_1 corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada;

d é a altura útil total da seção transversal, considerando a altura da laje alveolar (d) ou da laje alveolar mais a altura da capa na seção composta ($d = d_{tot}$);

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

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

A_c é a área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada;

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pr2}} \leq 1 \quad (22)$$

Onde

l_x é a distância da seção x a partir do final da laje;

l_{pr2} é o valor de projeto do comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ);

O item 7.3.2.8.2 da NBR 14861:2011 apresenta a equação para o cálculo da resistência à força cortante para a situação da laje alveolar com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista, conforme segue:

$$V_{Rd1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (23)$$

Onde:

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \sum b_{w,2} \cdot d \quad (24)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (25)$$

$$\sum b_{w,2} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} + 0,5 \cdot n \cdot b_{alv} \cdot \left(\frac{E_c}{E_p} \right) \quad (26)$$

$$\rho_2 = \frac{A_s}{(\sum b_{w,2} \cdot d)} \quad (27)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \alpha \quad (28)$$

Sendo:

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv} \quad (29)$$

$V_{Rd1,a1}$ é a força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

$\sum b_{w,2}$ é o somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;

ρ_2 corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolo preenchido;

$\sigma_{cp,2}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

n é a quantidade dos alvéolos preenchidos (segundo 7.3.2.7 e 7.3.2.8);

A_{alv} é a área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria. Para alvéolo com seção circular, a área da seção deve ser calculada pela equação:

$$A_{alv} = \frac{\pi b_{alv}^2}{4} \quad (30)$$

b_{alv} é a largura horizontal do alvéolo a ser preenchido;

$\frac{E_c}{E_p}$ é a relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado no local (E_c) e do concreto pré-moldado (E_p).

No item 7.3.2.8.3 a NBR 14861:2011 apresenta a equação da resistência à força cortante para a situação da laje alveolar com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista, conforme segue:

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (31)$$

Onde:

$V_{Rd1,a2}$ é a força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.

2.1.6.3 Método de Ensaio Padrão segundo a FIP

Segundo a FIP (1992) a falha por cisalhamento devido à tensão de tração no ponto crítico da nervura (*shear tension failure*) é um importante critério de projeto para lajes alveolares protendidas. Embora o mecanismo de ruptura seja muito claro, é difícil determinar a capacidade de cisalhamento devido à tensão de tração no ponto crítico da nervura por considerações teóricas.

A FIP (1992) descreve que lajes alveolares podem chegar à ruptura de quatro diferentes maneiras:

- ruptura por flexão;
- falha da ancoragem;
- cisalhamento em região fissurada por flexão (*shear flexure failure*);
- cisalhamento devido à tensão de tração no ponto crítico da nervura (*shear tension failure*).

De acordo com a FIP (1992), os três primeiros modos de falha estão bem cobertos pelas regras de projeto. A capacidade ao cisalhamento devido à tensão de tração no ponto crítico da nervura depende diretamente da resistência à tração do concreto, da forma da seção transversal e do método de fabricação. A resistência à tração do concreto nas nervuras é, contudo, difícil de ser estabelecida por métodos tradicionais. As influências da forma da seção transversal e do método de fabricação

não podem ser determinadas diretamente. Portanto, um método de ensaio padrão foi desenvolvido para determinar não apenas a capacidade ao cisalhamento, mas também para obter uma melhor visão sobre o papel de uma série de parâmetros sobre a capacidade de carga. Valiosas informações podem ser obtidas no que diz respeito à dispersão na qualidade das lajes através da repetição regular do ensaio.

A FIP (1992) determina que o ensaio padrão seja feito em uma laje com a largura total da pista e com um comprimento de 4m ou 15h, prevalecendo o maior. A distância do centro da carga ao centro do apoio mais próximo é 2,5h, onde h é a altura total da seção transversal. As condições de apoio devem ser tais que a carga seja igualmente distribuída ao longo da largura da laje.

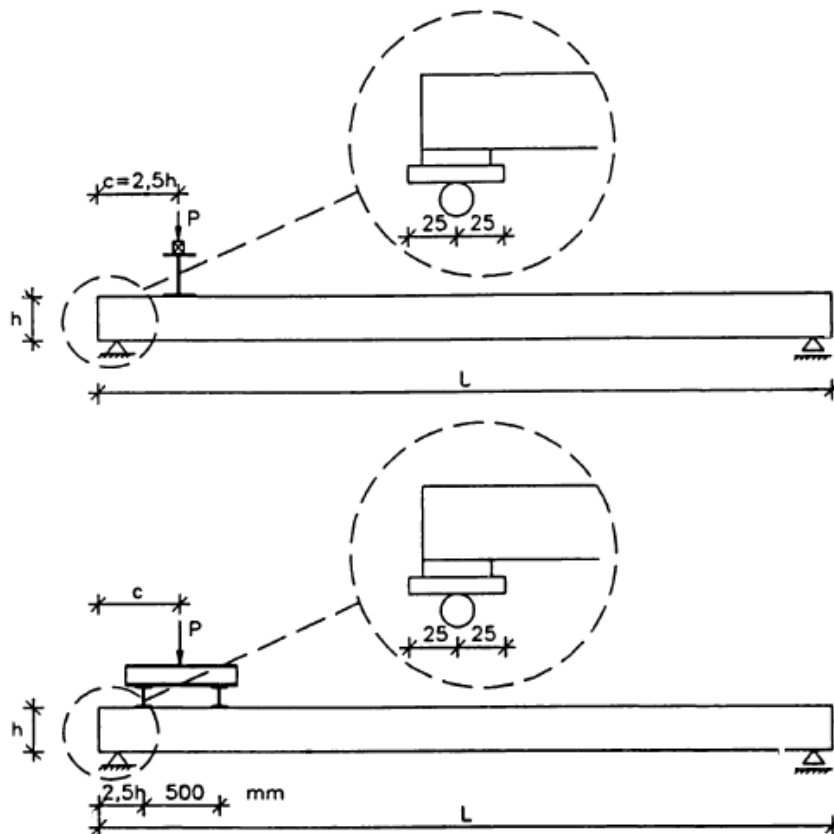


FIGURA 13 – OPÇÕES PARA O ARRANJO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO.
FONTE: FIP (1992).

A Figura 13 mostra os detalhes esquemáticos do ensaio. Um apoio de comprimento de 50mm deve ser utilizado. Segundo a FIP (1992) o apoio mais próximo do ponto de aplicação da carga deve ser um apoio móvel de modo que nenhuma força axial seja gerada pela rotação da laje no apoio. Um material para distribuição da carga é posicionado entre a laje e a viga de apoio. Este material deve

compensar as irregularidades da superfície da laje e uma eventual curvatura da laje na direção transversal. Os seguintes materiais podem ser utilizados para distribuição da carga nos apoios: 10mm de madeira compensada, neoprene com 10mm de espessura, um berço de argamassa ou de gesso.

De acordo com as instruções da FIP (1992), a carga deve ser transferida com a utilização de uma viga rígida posicionada transversalmente à laje. A rigidez desta viga deve ser suficiente de maneira a prevenir uma distribuição desigual da carga ao longo da largura da viga. A altura da viga metálica deve ser no mínimo de 150mm, mas preferencialmente 250mm. A velocidade do carregamento em um elemento de laje alveolar não deve exceder 50 kN por minuto.

A FIP (1992) determina que testemunhos cilíndricos devem ser retirados da laje de maneira a se obter valores de referência para a resistência do concreto. Um testemunho de 50 a 200mm pode ser retirado diretamente da pista na posição adjacente à laje a ser ensaiada (Figura 14). Este testemunho deve ser preservado em condições de umidade. Imediatamente antes do ensaio de 3 a 6 testemunhos são retirados da laje alveolar a ser ensaiada. São feitos os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral de acordo com os padrões internacionais.

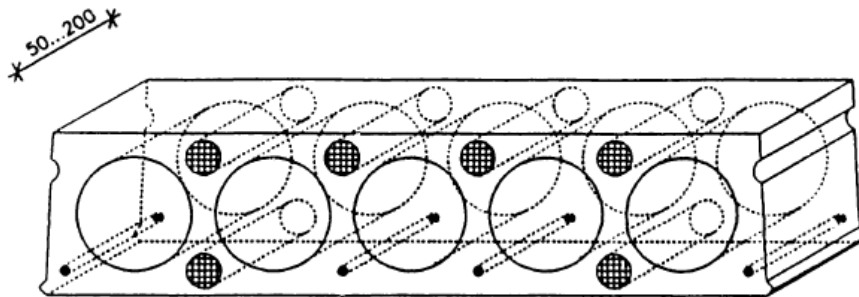


FIGURA 14 – POSIÇÕES PARA RETIRADA DE TESTEMUNHOS DA LAJE ALVEOLAR.
FONTE: FIP (1992).

A FIP (1992) diz que corpos de prova cúbicos ou cilíndricos podem ser utilizados e a correlação entre os seus valores de resistência relativa é apresentada no Código Modelo do CEB-FIP e em normas internacionais. Os corpos de prova devem ser moldados com o mesmo concreto utilizado nas lajes, por exemplo, sem adição de água, tomando os devidos cuidados para que a densidade do concreto seja aproximadamente a mesma densidade do concreto das lajes.

Costa (2009) em sua dissertação de mestrado investigou procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho de lajes alveolares, com base nas

referências internacionais encontradas nos boletins técnicos da FIB (FIP-CEB) e na norma europeia EN 1168:2005. A autora procurou apresentar possíveis recomendações para adequações e aplicação destes procedimentos para a realidade brasileira. O método de ensaio padrão de cisalhamento apresentado pela autora é o mesmo da FIP (1992), aqui apresentado, que também está de acordo com a norma europeia EN 1168:2005.

2.2 ESTUDOS RECENTES SOBRE CISALHAMENTO EM VIGAS E LAJES DE CONCRETO

2.2.1 Jung e Kim (2008)

Jung e Kim (2008) constataam que diferentes pesquisadores impuseram diferentes níveis de importância relativa para os mecanismos básicos de transferência de cisalhamento. Em seu artigo são apresentadas sete diferentes equações empíricas para o cálculo da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto. Cada uma destas equações foi desenvolvida por um pesquisador ou grupo de pesquisadores diferente.

Segundo estes mesmos autores, devido ao complexo mecanismo de transferência das tensões de cisalhamento em vigas de concreto e aos seus vários parâmetros de influência, nosso entendimento sobre o esforço cortante é ainda relativamente limitado. Muitas das disposições normativas de dimensionamento ao esforço cortante são principalmente empíricas, variando muito de uma norma para outra e não fornecem fatores de segurança uniformes contra falhas.

2.2.1.1 Fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento

De acordo com Jung e Kim (2008) os mecanismos dominantes de influência na resistência ao cisalhamento são a resistência do concreto, efeito do tamanho ("*size effect*"), relação vão/altura, taxa de armadura longitudinal, força axial e há outros parâmetros de influência como condições de apoio, cargas concentradas, etc.

Jung e Kim (2008) afirmam também que a resistência ao cisalhamento de vigas protendidas e armadas sem armadura para o esforço cortante decresce com o aumento da espessura do elemento. Este efeito é conhecido como "*size effect*"

(efeito do tamanho). Segundo eles, enquanto Bazant et al. explanam sobre o efeito do tamanho por fratura mecânica, Collins et al. e Reineck explanam sobre o efeito do tamanho pela redução da interface de transferência de cisalhamento devido às espessuras maiores das fissuras que ocorrem em elementos mais altos.

Jung e Kim (2008) declaram ainda que quando a relação vão/altura decresce a resistência ao cisalhamento aumenta e que este parâmetro é muito significativo em elementos com relação vão/altura menor do que 2,5 porque a parcela de esforço cortante deve ser transmitida diretamente para os apoios através de uma biela comprimida. Para estes elementos altos e curtos é mais apropriado utilizar modelos de treliças do que seccionar o elemento para análise.

Portanto, conforme esta última afirmação dos autores, pelo menos para lajes alveolares curtas o Modelo de Bielas e Tirantes proposto nesta pesquisa será adequado.

2.2.2 Girhammar e Pajari (2008)

Girhammar e Pajari (2008) estudaram o comportamento da seção composta por laje alveolar pré-fabricada e capeamento de concreto moldado no local analisando os seguintes fatores:

- a) O aumento na resistência ao cisalhamento da laje devido ao acréscimo da capa de concreto moldado no local;
- b) A eficácia da aderência entre a superfície da laje alveolar pré-fabricada e a capa de concreto moldado no local;
- c) A utilização no capeamento de concreto com adição de fibras de aço versus concreto simples.

Em seu artigo foram apresentados testes experimentais e estudos teóricos sobre o efeito da capa estrutural na resistência ao cisalhamento das lajes alveolares.

Também foi feita uma verificação se a aderência e a tensão de cisalhamento na interface entre laje e capa são suficientemente altas para prevenir a ruptura por cisalhamento na interface entre os dois concretos antes da ruptura por cisalhamento na região mais estreita das nervuras de concreto entre os alvéolos.

As amostras ensaiadas por Girhammar e Pajari (2008) foram preparadas de maneira a formar conjuntos com 95cm de largura, 6,40m de comprimento e 28cm de altura, conforme apresentado na Figura 15.

Foram ensaiadas amostras com capeamento de concreto simples e capeamento de concreto com adição de fibras de aço, ambos C25.

Com o objetivo de avaliar a aderência “natural” e a resistência ao cisalhamento na interface entre a laje alveolar e o capeamento, propositalmente, não foi feito nenhum tratamento na superfície das lajes alveolares para melhorar a aderência com a capa nesta pesquisa de Girhammar e Pajari (2008).

Vigas de amarração foram feitas em ambas as extremidades das lajes de maneira a prevenir a fissuração da estrutura durante o transporte da fábrica ao laboratório de ensaios e para prevenir a separação das duas metades das lajes durante os testes e simular o efeito de vigas de amarração em estruturas reais.

Ao concretar as vigas de amarração, os alvéolos das lajes foram preenchidos com concreto em 15cm nas suas extremidades. Esta concretagem dos alvéolos proporcionou chaves de cisalhamento efetivas na interface entre as lajes alveolares e as vigas de amarração.

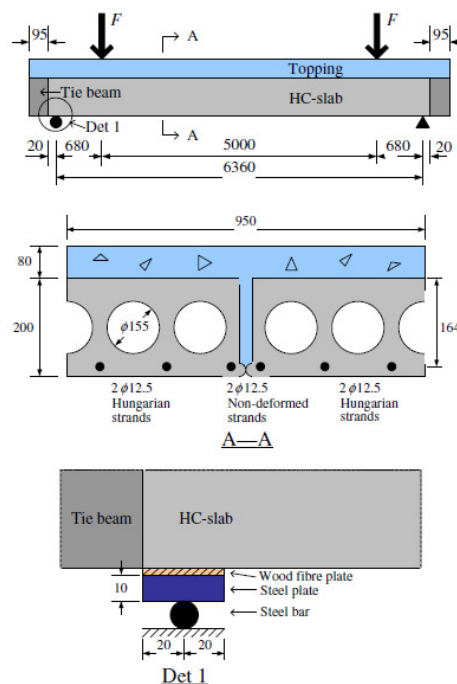


FIGURA 15 – ARRANJO DOS ENSAIOS E GEOMETRIA DAS AMOSTRAS.

FONTE: Girhammar e Pajari (2008).

Os autores do artigo examinaram a aderência na interface entre a laje pré-fabricada e a capa de concreto moldado no local através de ensaios de *pull-off*, ou seja, perfurando um cilindro através da capa e da interface e puxando o cilindro até a ruptura por tração conforme mostra a Figura 16.

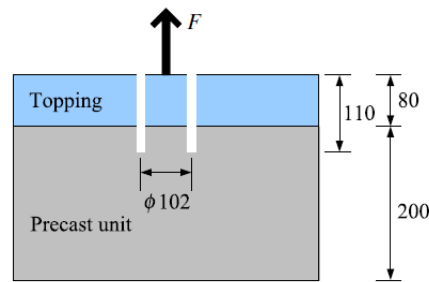


FIGURA 16 – ENSAIO DE *PULL-OFF* UTILIZADO PARA AVALIAR A ADERÊNCIA ENTRE A LAJE ALVEOLAR E A CAPA.
 FONTE: Girhammar e Pajari (2008).

De acordo com Girhammar e Pajari (2008), teoricamente, a interface entre os dois concretos deveria ser a parte mais fraca, pois ali não há uma ligação através de agregados. Mas nos ensaios realizados ocorreram somente três casos de ruptura na interface. Nos outros nove casos a ruptura nos ensaios de *pull-off* foi governada pela resistência a tração do concreto moldado no local.

Os autores informam que quanto aos testes de carga realizados, tanto para as amostras com capa de concreto com fibras de aço como para as amostras com capa de concreto simples, a ruptura ocorreu por cisalhamento nas nervuras entre os alvéolos das lajes pré-fabricadas e que a utilização de fibras de aço no concreto da capa aumentou a resistência à compressão do concreto em 20%.

Girhammar e Pajari (2008) compararam os resultados dos testes de carga das amostras feitas com capeamento de concreto com fibras de aço com os resultados das amostras feitas com capeamento de concreto simples, e concluíram que não houve melhora na resistência ao cisalhamento do conjunto laje+capa, pois em todos os casos a ruptura ocorreu na nervura entre os alvéolos da laje pré-fabricada.

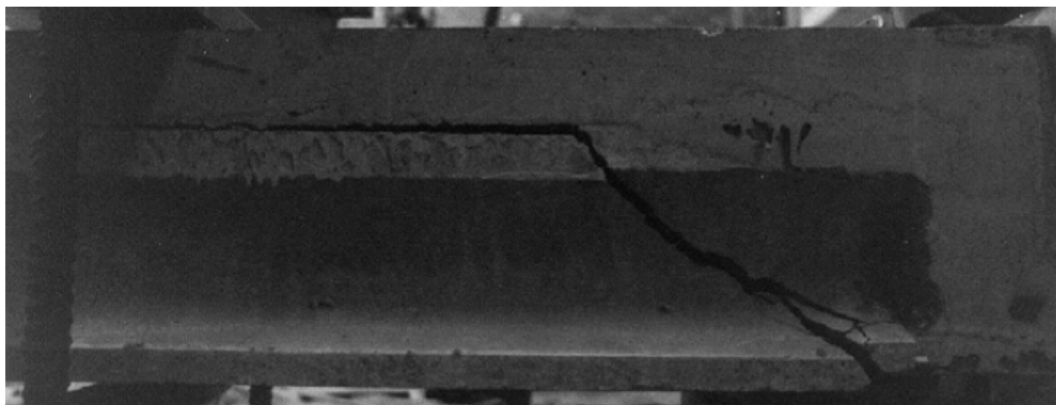


FIGURA 17 – TRINCAS TÍPICAS APÓS A RUPTURA DAS LAJES NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO.
 FONTE: Girhammar e Pajari (2008).

Na Figura 17, a trinca horizontal na interface ocorreu após a ruptura da nervura da laje alveolar.

Uma das conclusões do estudo feito por Girhammar e Pajari (2008) é que o capeamento com concreto pode ser utilizado para melhorar a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares. Para as amostras ensaiadas em seu estudo, houve incremento da ordem de 35% em relação à laje sem capa, dando a entender que a aderência entre a laje alveolar e a capa é adequada e que a capa interage com a laje de maneira apropriada.

Outra conclusão que é importante para a presente pesquisa é que a aderência entre o concreto pré-fabricado e o concreto moldado no local das vigas de amarração foi muito pequena dentro dos alvéolos. Girhammar e Pajari (2008) destacam que isto significa que o preenchimento com concreto nos alvéolos foi ineficaz.

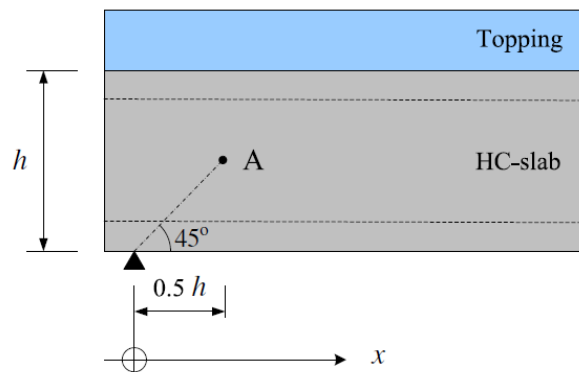


FIGURA 18 – O PONTO A É O PONTO CRÍTICO DE RUPTURA POR CISALHAMENTO NA NERVURA ENTRE OS ALVÉOLOS.

FONTE: Girhammar e Pajari (2008).

Segundo Girhammar e Pajari (2008) o método de cálculo adotado em seu artigo não leva em consideração as tensões de cisalhamento devido à força de protensão. Usualmente estas tensões tem sido assumidas como pequenas e são negligenciadas na norma europeia EN 1168:2005 e no Eurocode 2.

Os autores afirmam que em muitos casos esta imprecisão resulta em superestimação da resistência ao cisalhamento calculada.

Girhammar e Pajari (2008) informam que Yang (1994) desenvolveu um método para levar em conta estas tensões de cisalhamento devido à força de protensão e que a futura versão da EN 1168 será mudada para incluir o método de Yang.

2.3 MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

De acordo com Silva e Giongo (2000) a utilização de modelos de treliça associados aos modelos de vigas de concreto armado para o dimensionamento das armaduras remonta ao início do século XX, quando Ritter e Morsch introduziram a clássica “Analogia de Treliça”. Após várias décadas de estudo, numerosos pesquisadores sugeriram modificações no modelo original no sentido de aperfeiçoá-lo e adequá-lo aos resultados experimentais. Entretanto, deve-se salientar que as hipóteses básicas de Morsch continuam válidas.

Santos (2006) diz que este modelo tem como principais vantagens a melhor visualização do comportamento da estrutura, podendo-se verificar de modo mais claro a distribuição das tensões, e a facilidade na identificação das regiões mais solicitadas da estrutura.

Santos (2006) explica que a Analogia Clássica da Treliça faz a analogia entre uma viga de concreto armado, depois de fissurada, e uma treliça de banzos paralelos e, apesar de apresentar certas imperfeições, resultantes da incompatibilidade entre modelo e viga real, ainda hoje é empregada em grande escala. Nas últimas décadas, propostas vêm sendo feitas por pesquisadores e engenheiros sugerindo alterações no modelo original, a fim de aperfeiçoá-lo e, principalmente, ajustar os resultados experimentais aos teóricos.

O mesmo autor ainda afirma que atualmente, como importantes incrementos ao modelo de MÖRSCH, destacam-se os modelos de bielas e tirantes, nos quais os elementos ou regiões da viga real são denotados como elementos da treliça. Neste caso, as armaduras transversais são os montantes tracionados da treliça, atuando tipicamente como tirantes na viga de concreto armado. Por sua vez, as diagonais comprimidas, situadas entre duas fissuras consecutivas, trabalham como as barras das diagonais comprimidas da treliça, atuando como as bielas. Por fim, citam-se os banzos da treliça, nos quais a armadura longitudinal de tração da viga funciona como o banzo tracionado e a faixa superior de concreto como o banzo comprimido. As hipóteses admitidas pela treliça clássica baseiam-se no panorama fissurado da viga, a partir do qual se pode determinar o mecanismo de funcionamento da mesma.

O panorama fissurado das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido é similar às vigas, ou seja, as fissuras de cisalhamento próximas aos

apoios são inclinadas e as fissuras de flexão na região central do vão são verticais, conforme pode ser verificado nas Figuras 19 e 20 (COSTA, 2009).



FIGURA 19 – PANORAMA FISSURADO DE UMA LAJE ALVEOLAR APÓS ENSAIO DE CISALHAMENTO.
FONTE: COSTA (2009).



FIGURA 20 – PANORAMA FISSURADO DE UMA LAJE ALVEOLAR APÓS ENSAIO DE FLEXÃO.
FONTE: COSTA (2009).

Por isso, o modelo de bielas e tirantes pode ser aplicado para as lajes alveolares.

Silva e Giongo (2000) citam que na década de 80, Schlaich e Schäfer (1987), pesquisadores de Stuttgart, Alemanha, sugeriram a utilização de modelos de bielas e tirantes de modo generalizado para o dimensionamento de outros elementos estruturais, tais como: vigas-parede, apoios em dentes e aberturas em vigas, consolos, ligações viga-pilar, sapatas e blocos sobre estacas.

Santos (2006) ressalta que o modelo de bielas e tirantes analisa a viga como um todo, sem a necessidade de separar os esforços solicitantes e as forças internas para equilibrá-los, constituindo-se em modelo mais realista.

Como exemplos de elementos de concreto armado que são dimensionados utilizando-se as idéias básicas do modelo de treliça, Silva e Giongo (2000) citam os consolos, que são dimensionados com o critério de “treliça equivalente”, e as sapatas isoladas e blocos sobre estacas, cujas armaduras são dimensionadas e a

verificação de possível ruptura à compressão do concreto é feita por meio do “método das bielas comprimidas”.

Segundo Silva e Giongo (2000), no modelo de bielas e tirantes os elementos comprimidos, ou bielas, representam campos de tensão de compressão no concreto e os elementos tracionados, ou tirantes, representam campos de tensão que são usualmente absorvidos pelas barras da armadura. Eventualmente, essas tensões de tração podem ser absorvidas pelo concreto desde que respeitadas às condições de segurança.

É o caso das lajes alveolares, pois as mesmas não possuem armadura para a força cortante. As tensões de tração atuantes na seção transversal das lajes alveolares são absorvidas pelo concreto.

Silva e Giongo (2000) observam que a opção pelo uso dos modelos de bielas e tirantes exige do projetista um conhecimento anterior, necessário para que o modelo escolhido represente o funcionamento da estrutura. Conhecimento que pode ser comparado, por exemplo, àquele requerido quando se faz a escolha da forma estrutural de um edifício, isto é, o posicionamento de pilares, vigas e com conseqüente definição das lajes.

2.3.1 Regiões B e Regiões D do Elemento Estrutural

De acordo com Kuo, Cheng e Hwang (2010) para dar um significado físico para a análise e projeto da resistência ao cisalhamento é importante que os mecanismos de transferência de cisalhamento nos elementos de concreto armado sejam mais claramente examinados.

Segundo Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) aquelas regiões da estrutura nas quais as hipóteses de Bernoulli de distribuição plana de deformações são assumidas como válidas, são usualmente projetadas com cuidado e acuidade quase exagerados. Estas regiões são referidas como regiões B (onde B significa “Beam” ou Bernoulli). Seu estado interno de tensões é facilmente derivado de forças seccionais (momentos fletores e torçores, forças cortante e normal).

Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) afirmam que os métodos padrão não são aplicáveis para todas as outras regiões e detalhes de uma estrutura onde a distribuição de deformações é significativamente não-linear, por exemplo, próximo a cargas concentradas, cantos, apoios, aberturas e outras discontinuidades. Tais

regiões são chamadas de regiões D (onde D significa descontinuidade, distúrbio ou detalhe).

Kuo, Cheng e Hwang (2010) resumem a definição dada por Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) da seguinte maneira:

- Regiões Tipo B (“*Beam*” ou Bernoulli): aquelas aonde as tensões e as deformações são distribuídas regularmente. Isto é, as deformações das regiões tipo B são governadas pelas hipóteses de Bernoulli de que as seções planas permanecem planas;
- Regiões Tipo D (“*Disturbed*” ou Descontinuidade): são aquelas aonde as tensões e deformações variam de maneira tão irregular que as condições de compatibilidade são difíceis de aplicar.

A Figura 21 mostra os dois tipos de regiões.

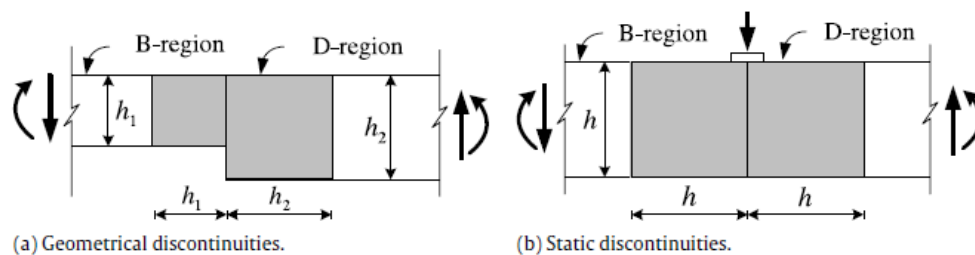


FIGURA 21 – APRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE REGIÕES B E D EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO.

Fonte: KUO, CHENG E HWANG (2010).

2.3.2 Esquemas alternativos de transmissão de esforços

De acordo com Silva e Giongo (2000) nos elementos de concreto armado submetidos a forças cortantes, do modelo de treliça, outros esquemas alternativos são capazes de transmitir os esforços de uma seção transversal a outra. Nas vigas com armadura transversal, a participação desses esquemas alternativos na resistência pode se apenas secundária. Entretanto, nas lajes sem armadura de cisalhamento, eles são responsáveis pela própria resistência da peça.

Os autores descrevem que os esquemas alternativos principais são o efeito de arco, o engrenamento dos agregados e o efeito de pino (*dowell effect*) da armadura longitudinal. O engrenamento dos agregados ocorre ao longo das fissuras do concreto, possibilitando a transmissão de forças oblíquas por meio das próprias fissuras.

2.3.3 Definição do ângulo θ

Segundo Silva e Giongo (2000) baixos valores do ângulo θ conduzem à menor quantidade de estribos, mas aumentam as forças na armadura longitudinal em trechos de pequenos momentos fletores.

Silva e Giongo (2000) afirmam que o ângulo θ entre as bielas da alma e os banzos pode ser escolhido livremente no intervalo $\theta_{\min} \leq \theta \leq 45^\circ$. A escolha de um ângulo próximo a 45° conduz a uma maior área de armadura transversal com baixas tensões nas bielas. Por outro lado, pode-se diminuir a área de armadura transversal escolhendo um valor de θ próximo a θ_{\min} . Entretanto, isso acarreta um acréscimo de tensões de compressão das bielas. Como essas tensões são verificadas diretamente, sugere-se a adoção de valores de θ os mais próximos possíveis de θ_{\min} , desde que conduzam a tensões de compressão dentro dos limites. O Código Modelo CEB-FIP (1990) recomenda utilizar $\theta_{\min} = 18,4^\circ$.

Contudo, de acordo com os mesmos autores, no Boletim CEB-198 (1990), vários pesquisadores contestaram os valores propostos porque o ângulo $\theta = 18,4^\circ$ é um valor muito pequeno. Dentre as várias sugestões, pode-se citar $\theta_{\min} = 26,5^\circ$. Ferreira et al. (1993), em trabalho experimental que investigou a inclinação para as bielas de compressão no concreto, também confirmaram esse valor $\theta_{\min} = 26,5^\circ$.

Silva e Giongo (2000) acrescentam que a utilização de baixos valores do ângulo θ aumenta as tensões na armadura transversal entre a fissuração e o estado limite último, além de aumentar a força a ser ancorada pela armadura longitudinal. O controle da fissuração pode então governar o projeto, especialmente em elementos de grandes dimensões e pode não permitir valores tão baixos quanto θ_{\min} . Não se aconselha utilizar valores baixos de θ quando o elemento estiver sujeito à tração axial.

2.3.4 Rotina de Projeto

Segundo Silva e Giongo (2000), para o projeto de elementos estruturais por meio dos modelos, pode-se seguir o seguinte roteiro:

- divide-se a estrutura em regiões B e D;
- isola-se a região D;

- determinam-se os esforços solicitantes no contorno;
- aplica-se o processo do caminho de carga;
- dimensionam-se os tirantes;
- verificam-se as tensões nas bielas e regiões nodais;
- definem-se o tipo e os comprimentos de ancoragem;
- faz-se o arranjo das armaduras.

2.3.5 Exemplo de Aplicação Prática

Kuo, Cheng e Hwang (2010) utilizaram o modelo dos campos de compressão (“*Strut-and-Tie*” ou Modelo de Bielas e Tirantes) utilizando modelos de treliça para analisar a ruptura das vigas de concreto armado como mostra a Figura 22.

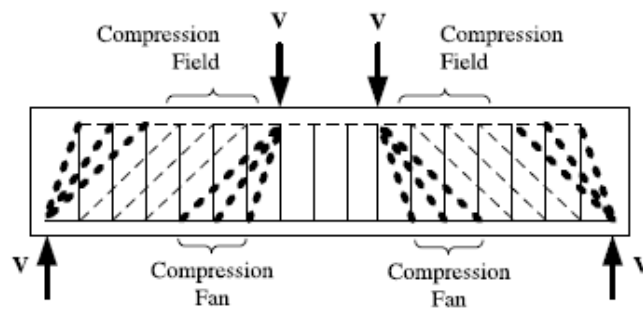


Fig. 3. Shear transferring mechanism of the slender beam [11].

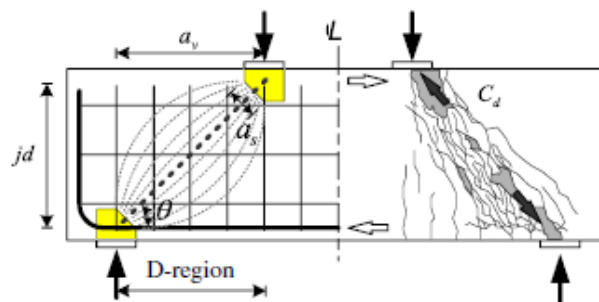


Fig. 4. Shear transferring mechanism and crack pattern of the deep beam.

FIGURA 22 – MODELO DOS CAMPOS DE COMPRESSÃO (STRUT AND TIE) EM VIGAS ESBELTAS E EM VIGAS PARALELAS.
 FONTE: KUO, CHENG E HWANG (2010).

Kuo, Cheng e Hwang (2010) compararam os resultados do seu estudo com os resultados calculados através das equações apresentadas na norma ACI 318-05 e concluíram que as aproximações feitas em seu trabalho são mais complicadas do que as equações apresentadas pelo ACI, mas que seus resultados chegam muito

próximos do comportamento real dos mecanismos de transferência de forças nas vigas em concreto armado.

2.3.6 Modelos de Bielas e Tirantes em Elementos de Concreto Protendido

De acordo com Wang e Meng (2008), um elemento em concreto protendido pode ser tratado como um elemento de concreto armado em virtude do conceito de carregamento equivalente, que habilita um projeto simplificado e eficiente.

Wang e Meng (2008) afirmam que os efeitos da protensão podem ser representados por cargas externas equivalentes que consiste na força de protensão efetiva.

Estes autores reafirmam o que Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) já preconizavam.

Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987) citam que há um denominador comum entre todos os tipos de protensão: pós-tensão, pré-tensão, protensão sem aderência podem ser entendidas como concreto armado que é carregado por um caso de carregamento artificial, por exemplo, a protensão. Como qualquer outro caso de carregamento, este teve simplesmente que ser introduzido na análise da estrutura. Depois que a aderência é ativada, o aço de protensão age como armadura passiva, somente é pré-carregado. Sua superfície diferente com relação à resistência e à aderência deve ser levada em conta.

Wang e Meng (2008) ressaltam que somente a componente horizontal da força de protensão iria afetar a resistência ao cisalhamento e ela precisa ser considerada no modelo, enquanto as cordoalhas são tomadas como armadura passiva.

O Código Modelo do CEB-FIP (1990) no item 6.3.3.3.1 também recomenda que a protensão seja tratada como uma carga externa aplicada ao elemento estrutural para fazer as verificações destes elementos para o Estado Limite Último.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A unidade de análise desta pesquisa foi as lajes alveolares pré-fabricadas em concreto produzidas através de extrusão e protendidas.

3.1.1 Justificativa da Escolha a Partir do Objetivo

Yin (2001) afirma que o que diferencia as estratégias de pesquisa são as seguintes condições:

- a) tipo de questão de pesquisa proposto;
- b) extensão de controle que o pesquisador tem sobre eventos comportamentais efetivos;
- c) grau de enfoque em acontecimentos históricos em oposição a acontecimentos contemporâneos.

Estratégia	Forma da questão de pesquisa	Exige controle sobre eventos comportamentais?	Focaliza acontecimentos contemporâneos?
Experimento	como, por que	Sim	Sim
Levantamento	quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim
Análise de arquivos	quem, o que, onde, quantos, quanto	Não	Sim / não
Pesquisa histórica	como, por que	Não	Não
Estudo de caso	como, por que	Não	Sim

QUADRO 1 - SITUAÇÕES RELEVANTES PARA DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PESQUISA. FONTE: COSMOS CORPORATION apud YIN (2001).

O Quadro 1 apresenta estas três condições e mostra como cada uma se relaciona com cinco estratégias de pesquisa principais nas ciências sociais.

Robson (2002) afirma que projetos fixos são orientados por teoria. O autor ressalta que a única maneira na qual podemos, como os projetos fixos requerem, especificar com antecedência as variáveis a serem inclusas no nosso estudo e os procedimentos exatos a serem seguidos é tendo uma teoria razoável e bem articulada sobre o fenômeno que estamos pesquisando. Robson (2002) diz que em outros termos, precisamos sempre ter uma quantidade substancial de entendimento conceitual sobre o fenômeno antes de investir tempo e recursos em tal projeto.

Nesta dissertação de mestrado, a pergunta a ser respondida foi “como as lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido respondem aos esforços de cisalhamento?”

E como esta pesquisa foi orientada por teoria e comparação com resultados de ensaios, a estratégia utilizada foi a experimental.

3.1.2 Lógica de desenvolvimento da pesquisa

Primeiramente, foi feita uma exploração na bibliografia existente sobre os assuntos lajes alveolares, dimensionamento ao cisalhamento de lajes e vigas e procedimentos de ensaio de cisalhamento em lajes alveolares..

Em seguida foi estudado o dimensionamento de estruturas de concreto através de Modelos de Bielas e Tirantes que são modelos de cálculo das estruturas de concreto no Estado Limite Último.

Finalmente foram realizados ensaios de cisalhamento nas lajes alveolares com as seguintes características:

- a) lajes alveolares com espessura de 26,5cm sem capa e sem preenchimento de alvéolos;
- b) lajes alveolares com espessura de 26,5cm sem capa e com preenchimento de dois alvéolos com concreto;
- c) lajes alveolares com espessura de 26,5cm sem capa e com preenchimento de três alvéolos com concreto;
- d) lajes alveolares com espessura de 26,5cm com capa de concreto de 5cm de espessura e sem preenchimento de alvéolos;

- e) lajes alveolares com espessura de 26,5cm com capa de concreto de 5cm de espessura e com preenchimento de dois alvéolos com concreto;
- f) lajes alveolares com espessura de 26,5cm com capa de concreto de 5cm de espessura e com preenchimento de três alvéolos com concreto.

Através da realização destes ensaios foi possível estudar o comportamento das lajes alveolares à ruptura e desenvolver modelos de bielas e tirantes que representassem este comportamento.

Além disso, foi possível analisar e comparar entre si o comportamento das lajes com e sem capa de concreto, com preenchimento de dois alvéolos, de três alvéolos e sem preenchimento de alvéolos com concreto. Também foi possível comparar os valores de resistência ao cisalhamento teóricos calculados de acordo com a NBR 6118:2003 e a NBR 14861:2011 com os valores experimentais obtidos nos ensaios.

A Figura 23 mostra um mapa mental que ilustra a lógica de pesquisa adotada para a realização desta dissertação.

3.1.3 Testes de Validade

Yin (2001) diz que para realizar o teste de validade do constructo, o pesquisador deve ter certeza de cumprir duas etapas:

- Selecionar os tipos específicos de mudanças que devem ser estudadas (em relação aos objetivos originais do estudo);
- Demonstrar que as medidas selecionadas dessas mudanças realmente refletem os tipos específicos de mudanças que foram selecionadas.

Para a pesquisa aqui apresentada, o tipo de mudança a ser estudado foi uma aproximação maior do valor calculado da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares ao valor obtido através de ensaios.

A demonstração de que as medidas selecionadas refletem os tipos específicos de mudanças foi feita na fase de análise dos resultados apresentada ao final desta dissertação.

Em relação à validade externa, o método adotado nesta pesquisa poderá ser reproduzido seguindo-se o protocolo de coleta de dados e os procedimentos de ensaio apresentados.

As descobertas do estudo poderão ser generalizadas apenas para lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido com espessura de 26,5cm, com alvéolos de formato circular e produzidas através do método de extrusão.

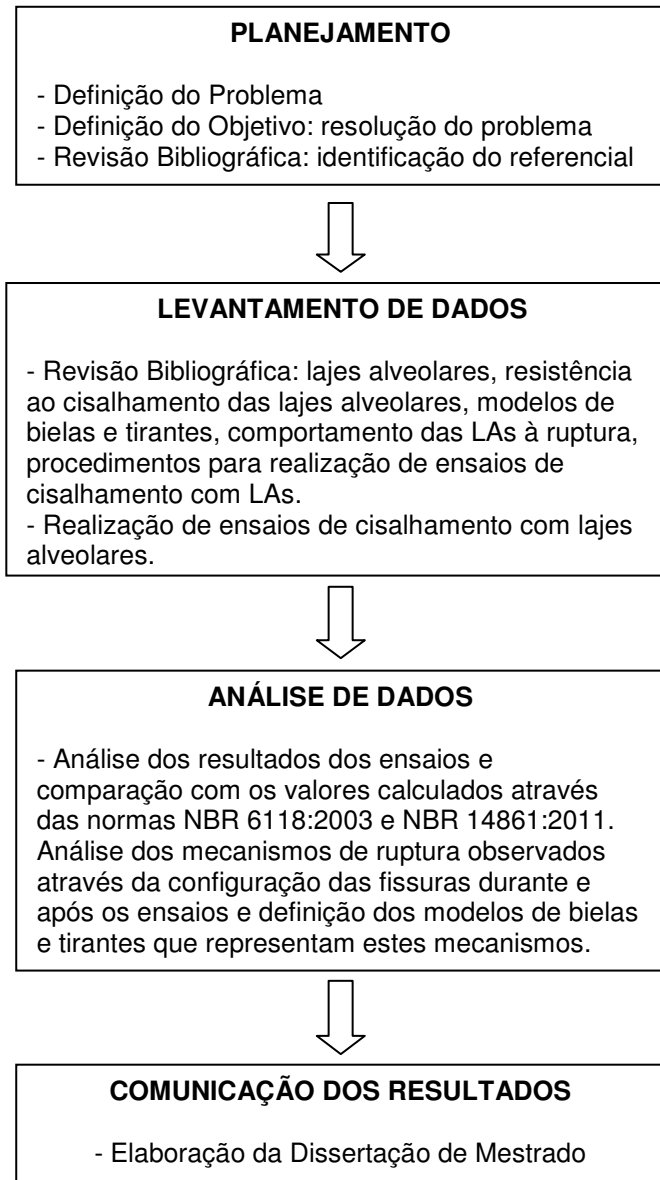


FIGURA 23 – MAPA MENTAL.
FONTE: A autora (2012).

3.1.4 Planejamento do Experimento

3.1.4.1 Variáveis Estudadas

a) Variáveis independentes ou fatores controláveis: são as variáveis fixadas com o intuito de observar seu reflexo nas variáveis dependentes (variáveis medidas).

As variáveis independentes desta pesquisa foram:

- Espessura da capa das lajes: 2 níveis (0 ou 5cm);
- Quantidade de alvéolos preenchidos com concreto: 3 níveis (0, 2 ou 3 alvéolos).

b) Variáveis dependentes ou de resposta: são as variáveis influenciadas pelas variáveis independentes.

As variáveis dependentes desta pesquisa foram:

- Carga máxima resistida pelas lajes;
- Deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga;
- Configuração das fissuras após os ensaios.

3.1.4.2 Descrição do planejamento do experimento

O planejamento do experimento foi desenvolvido de acordo com o procedimento apresentado por Ribeiro e Caten (2003).

De acordo com estes autores, a primeira fase de um projeto de experimentos é ouvir a voz do cliente que determina as características de qualidade do produto, ou seja, todas as características do produto que o cliente percebe como importantes.

Para tanto, utilizou-se o grau de importância 1,0 para a demanda de qualidade do cliente (Quadro 2).

Demanda de qualidade	Importância
Boa resistência ao cisalhamento com menor custo	1,0

QUADRO 2 - LISTAGEM DA DEMANDA DE QUALIDADE DO CLIENTE.
 FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

Ribeiro e Caten (2003) definem que a segunda fase de um projeto de experimentos é ouvir a voz do engenheiro que define as variáveis de resposta associadas às características de qualidade desejadas pelo cliente, identifica outras variáveis de resposta de interesse, identifica os parâmetros do processo e seu intervalo de variação, identifica os fatores controláveis que são os parâmetros do processo que podem alterar as variáveis de resposta, define o número de níveis para cada variável de resposta, define possíveis interações entre os fatores controláveis, identifica as restrições experimentais e escolhe o modelo estatístico do experimento.

Variáveis de Resposta (Variáveis Dependentes ou de Leitura)		Tipo	Alvo (unidade)	Especificações		Importância	Unidade
		(maior, menor ou nominal)		Mín	Máx		
Y1	Carga Máxima Aplicada	Maior é melhor	Varia conforme os tipos ensaiados	Varia conforme os tipos ensaiados		1,0	Kgf
Y2	Deslocamento vertical	Menor é melhor	Varia conforme os tipos ensaiados	Varia conforme os tipos ensaiados		1,0	mm
Y3	Configuração das Fissuras	Menor é melhor	Varia conforme os tipos ensaiados	Varia conforme os tipos ensaiados		1,0	N.A.

QUADRO 3 - LISTAGEM DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUE AVALIAM QUANTITATIVAMENTE A DEMANDA DE QUALIDADE.

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

Os Quadros 3 a 8 apresentam a voz do engenheiro para o experimento realizado nesta pesquisa. O Quadro 3 apresenta a Listagem das variáveis de resposta que avaliam quantitativamente a demanda de qualidade.

O Quadro 4 apresenta a Listagem dos parâmetros do processo analisado.

Parâmetros do processo		Ajuste atual	Ajuste sugerido	Intervalo de pesquisa		Facilidade de ajuste	Unidade
X1	Largura	var	var	125	125	ok	cm
X2	Espessura	var	var	26,5	26,5	ok	cm
X3	Comprimento	var	var	4	4	ok	m
X4	Força de Protensão Inicial	var	var	91200	91200	ok	kgf
X5	Armadura (aço de protensão)	var	var	7,896	7,896	ok	cm ²
X6	Fck de projeto	var	var	30	30	ok	MPa
X7	Fator a/c	var	var	0,45	0,45	ok	-
X8	Espessura do capeamento	var	var	0	5	ok	cm
X9	Armadura do capeamento	var	var	0	1,38	ok	cm ²
X10	Concretagem de Alvéolos	var	var	0	3	ok	un

QUADRO 4 - LISTAGEM DOS PARÂMETROS DO PROCESSO.

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

O Quadro 5 apresenta a Listagem dos fatores de ruído considerados na pesquisa.

Fatores de ruído	
Z1:	Temperatura
Z2:	Umidade
Z3:	Ajuste da Extrusora
Z4:	Desgaste da rosca da extrusora
Z5:	Tempo de cura
Z6:	Calibração da célula de carga
Z7:	Aderência entre a capa e a laje
Z8:	Aderência entre o concreto do preenchimento dos alvéolos e a laje
Z9:	Nivelamento dos equipamentos de ensaio
Z10:	Uniformidade da transferência de carga para a laje durante o ensaio

QUADRO 5 - LISTAGEM DOS FATORES DE RUÍDO.

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

O Quadro 6 apresenta a intensidade atribuída para as relações entre os parâmetros do processo (X) e as variáveis de resposta (Y) adotadas na pesquisa.

Intensidade das relações	Valor numérico
Inexistente	0
Fraca	1
Moderada	3
Forte	9

	IEi	Rij = Relações XiYj									
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Y1	1,0	9	9	3	9	9	9	9	9	1	3
Y2	1,0	9	9	9	9	9	9	9	9	1	1
Y3	1,0	3	9	3	9	9	9	3	3	1	3
K1		21	27	15	27	27	27	21	21	3	7

QUADRO 6 - INTENSIDADE ATRIBUÍDA PARA AS RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DO PROCESSO E AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA.

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

O Quadro 7 apresenta a listagem dos subconjuntos dos parâmetros do processo que foram priorizados na pesquisa que são as variáveis independentes ou de estudo.

Fatores controláveis (Variáveis Independentes ou de Estudo)	PRj	Número de níveis	Níveis reais
Espessura do capeamento		2	0cm; 5cm
Alvéolos Concretados nas Extremidades		3	0; 2; 3

QUADRO 7 - LISTAGEM DOS FATORES CONTROLÁVEIS (SUBCONJUNTO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO QUE FORAM PRIORIZADOS).

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

O Quadro 8 apresenta a Listagem dos fatores mantidos constantes e seus respectivos ajustes.

Fatores mantidos constantes	PRj	Ajuste
Espessura da laje alveolar		26,5cm
Largura		125cm
Comprimento		4m
Força de protensão		91200 kgf
Área de aço protendido		7,896 cm ²
Fck		30 MPa
Fator a/c		0,45
Armadura do Capeamento		1,38cm ² /m

QUADRO 8 - LISTAGEM DOS FATORES MANTIDOS CONSTANTES E SEUS RESPECTIVOS AJUSTES.

FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

Ao longo da pesquisa foi considerado que não haveria interações entre os fatores controláveis e listou-se como restrições experimentais as seguintes situações:

- A quantidade máxima de ensaios para cada espessura de laje estava limitada à quantidade de amostras de lajes que a empresa se propôs a doar;
- A ruptura da laje poderia ocorrer através de outro mecanismo que não fosse o cisalhamento.

Para a definição do modelo estatístico foi considerado o projeto fatorial de 2 fatores, onde:

número total de observações = (2 níveis de espessura da capa x 3 níveis de preenchimento de alvéolos) = 6 observações. Foram realizados ensaios com 3 amostras de cada laje para cada observação. Portanto foram 18 ensaios no total.

O terceiro ensaio para todas as lajes teve que ser feito com uma mesma peça que havia sido ensaiada anteriormente, pois ocorreu um erro na quantidade de lajes solicitadas em projeto. O erro foi percebido somente quando a execução dos

ensaios já estava em andamento e não havia tempo hábil para produzir e concretar alvéolos e capa de mais lajes.

3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

O primeiro instrumento de pesquisa utilizado foi o levantamento de informações publicadas (artigos, livros, teses e dissertações) sobre os seguintes temas:

- a) lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido;
- b) resistência ao cisalhamento das lajes alveolares;
- c) comportamento das lajes alveolares à ruptura;
- d) modelos de bielas e tirantes para o dimensionamento de estruturas de concreto protendido;
- e) procedimentos de ensaios de cisalhamento em lajes alveolares.

O segundo instrumento de pesquisa foram os ensaios de cisalhamento em lajes alveolares.

Para avaliar a resistência ao cisalhamento oriundo do esforço cortante das lajes alveolares, foram adotadas as recomendações e procedimentos de ensaio propostos pela FIP (1992), pela norma européia EN 1168:2005 e por Costa (2009).

Foram ensaiadas lajes alveolares com espessura de 26,5cm que foi a espessura disponibilizada pela empresa fabricante doadora das amostras de lajes alveolares. Foram preenchidos com concreto os alvéolos de algumas lajes ensaiadas e outras foram ensaiadas com os alvéolos vazios. Outro item variado nas amostras foi a presença ou não de capa de concreto sobre a laje alveolar.

A Figura 24 representa a relação entre os dados coletados através dos dois instrumentos de pesquisa citados.

3.2.1 Procedimentos de ensaio

Durante os ensaios foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Aleatorizar a ordem dos ensaios;
- Fixar parâmetros do processo não incorporados no experimento;

- Observar sempre a mesma sistemática de ensaios, mesmas máquinas, operadores, dentre outros.

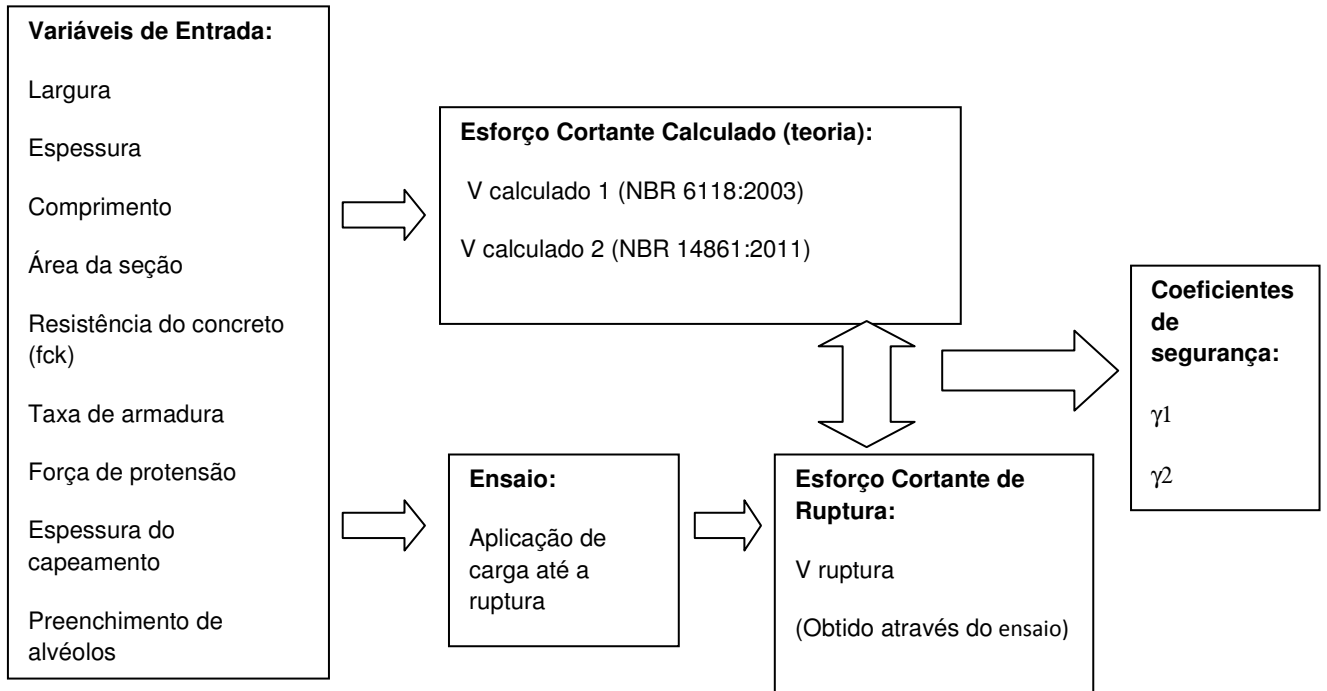


FIGURA 24 – RELAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS E OS VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS.
 FONTE: A autora (2012).

3.2.1.1 Ensaio de cisalhamento em lajes alveolares

Foram adotados os procedimentos descritos por Costa (2009) para o ensaio de cisalhamento em lajes alveolares. A autora afirma que o ensaio de apoio padronizado recomendado pelo manual da FIP (1992) e a norma EN 1168/2005 estabelecem que a carga sobre a laje seja aplicada a uma distância de $2,5h$ (sendo h a altura da laje) do apoio mais solicitado. O comprimento da laje deve ser igual ao maior dos valores de $4m$ ou $15h$. Ver a descrição do procedimento do Manual da FIP (1992) no item 2.1.6.3 e esquema de carregamento na Figura 13.

A velocidade do carregamento deve ser controlada de maneira a não exceder 50 kN por minuto, conforme descrito no Manual da FIP (1992). A carga é aplicada até a ruptura da laje e a deformação é medida no ponto de aplicação da carga.

O Quadro 9 apresenta a planilha de coleta de dados utilizada no ensaio.

Planilha de coleta de dados:

Ensaio: _____

Lajes LP26,5 (Espessura = 26,5cm)

Armadura: 8 cordoalhas de 12,7mm – Protensão = 114 kN por cordoalha

Data : _____ Operador : _____

Ensaio	Fatores Controláveis (Variáveis Independentes ou de Estudo)		Variáveis de Resposta (Variáveis Dependentes ou de Leitura)		
	Espessura Capa	Alvéolos Concretados	Carga Máxima	Deslocamento Vertical	Configuração das Fissuras
1	0	0			
2	0	2			
3	0	3			
4	5	0			
5	5	2			
6	5	3			
7	0	0			
8	0	2			
9	0	3			
10	5	0			
11	5	2			
12	5	3			
13	0	0			
14	0	2			
15	0	3			
16	5	0			
17	5	2			
18	5	3			

QUADRO 9 - PLANILHA DE COLETA DE DADOS DO ENSAIO.
 FONTE: A autora (2010), adaptado de RIBEIRO E CATEN (2003).

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS

As informações obtidas através da revisão bibliográfica foram agrupadas por assunto de maneira a embasar teoricamente a pesquisa realizada.

Com os valores de carga máxima aplicada nas lajes alveolares durante os ensaios foram calculados os valores da força cortante última para cada amostra ensaiada.

Em seguida, foram calculados através das equações apresentadas nas normas NBR 6118:2003 e NBR 14861:2011, os valores da força cortante resistente das seções ensaiadas.

Com estes dados de força cortante última nos ensaios e força cortante resistente teórica foram feitas as comparações entre valores obtidos nos ensaios e valores teóricos. Foram feitas também comparações entre a resistência das lajes com capa e sem capa e entre a resistência das lajes sem alvéolos preenchidos, com dois e com três alvéolos preenchidos.

Foram fotografadas e coletadas as medidas de comprimento e inclinação das fissuras após os ensaios, foram anotados os mecanismos de ruptura observados durante os ensaios.

Com estes dados sobre a configuração das fissuras e mecanismos de ruptura foram desenvolvidos modelos de bielas e tirantes utilizando o programa computacional CAST para calcular as forças nos elementos dos modelos.

Em seguida foram dimensionadas as áreas das seções transversais dos tirantes de concreto mais solicitados, dividindo-se a força atuante no tirante pela resistência à tração do concreto calculada através da NBR 6118:2003.

Finalmente, foi calculada a espessura do tirante, dividindo-se a área da seção transversal do tirante pela largura mínima das nervuras na região central entre os alvéolos.

4 OS EXPERIMENTOS: ENSAIOS DE CISALHAMENTO COM LAJES ALVEOLARES

4.1 A FORNECEDORA DAS AMOSTRAS

A empresa patrocinadora desta pesquisa, que forneceu as amostras de lajes alveolares, os equipamentos e a mão-de-obra para os ensaios, foi a Cassol Pré-Fabricados Ltda., que é a maior indústria de estruturas pré-fabricadas de concreto do Brasil.

A Cassol possui cinco fábricas localizadas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e em todas estas fábricas são produzidas lajes alveolares para obras localizadas em várias regiões do Brasil e países vizinhos.

4.2 DESCRIÇÃO DAS LAJES ENSAIADAS

Foram realizados ensaios de cisalhamento com lajes alveolares de 26,5 cm de espessura com os seguintes objetivos:

- a) comparar os valores da força cortante última obtida nestes ensaios com os valores de força cortante resistente teórica calculados através das normas NBR 6118:2003 e NBR 14861:2011;
- b) analisar os mecanismos de ruptura das lajes e a configuração da fissuração ocorrida durante os ensaios para elaborar modelos de bielas e tirantes e, através destes, calcular a tensão de tração atuante no tirante de concreto que se localiza no ponto crítico da nervura da laje alveolar.

Adotou-se os procedimentos de ensaio de cisalhamento em lajes alveolares recomendados pela FIP (1992) que são os mesmos recomendados pela norma européia EN 1168:2005 e por Costa (2009), conforme descrito no item 2.1.6.3 e ilustrado na Figura 13.

A quantidade de lajes ensaiadas foi determinada conforme o planejamento do experimento descrito no Capítulo 3, item 3.1.4.

Para se ter uma representatividade maior do comportamento das lajes alveolares submetidas a ensaios de cisalhamento, o ideal seria ensaiar lajes de

diversas espessuras. Entretanto, devido à limitação de tempo e material disponíveis para esta pesquisa, foram ensaiadas lajes de apenas uma espessura.

Foi escolhida a laje com espessura de 26,5cm por se tratar de uma espessura média entre as lajes produzidas pela empresa patrocinadora (15, 20, 26,5, 32, 40 e 50cm) e também por não ter sido ensaiada em pesquisas anteriores feitas com patrocínio desta empresa.

A Figura 25 mostra a seção transversal de projeto das lajes ensaiadas.

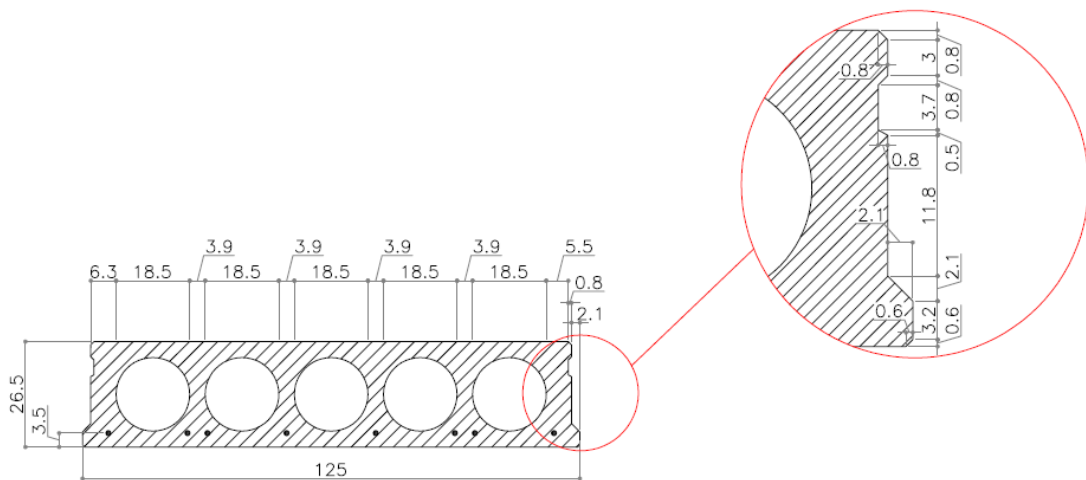


FIGURA 25 – SEÇÃO TRANSVERSAL DAS LAJES ENSAIADAS.
FONTE: A autora (2012).

O Quadro 10 descreve as características das lajes ensaiadas.

A armadura protendida das lajes ensaiadas foi composta por 8 cordoalhas de diâmetro de 12,7mm em aço CP190 RB, posicionadas na parte inferior a 3,5cm do fundo da laje. A força de protensão inicial aplicada foi de 11400 kgf (114 kN) por cordoalha. A resistência do concreto aos 28 dias especificada em projeto foi de 30 MPa tanto para o concreto da laje pré-fabricada como para o concreto da capa e do preenchimento dos alvéolos.

No Anexo A encontram-se os projetos que foram enviados para a fabricação das peças com todas estas informações.

Laje	Nº de Amostras *	H _L (cm)	H _C (cm)	B _{wt} (cm)	L (cm)	D _{alv} (cm)	Nº alv Laje	Nº alv Preenchidos
LA001-A	3	26,5	0	125	400 **	18,5	5	0
LA001-B	3	26,5	5	125	400 **	18,5	5	0
LA002-A	3	26,5	0	125	400	18,5	5	2
LA002-B	3	26,5	5	125	400 ***	18,5	5	2
LA003-A	3	26,5	0	125	400	18,5	5	3
LA003-B	3	26,5	5	125	400 ***	18,5	5	3

* Foram produzidas 2 lajes de cada tipo e o terceiro ensaio foi realizado na outra extremidade de uma laje que já havia sido ensaiada anteriormente.

** Como uma extremidade já estava fissurada, os comprimentos da LA001-A e da LA001-B para o terceiro ensaio foram reduzidos para 3,70m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.

*** Como uma extremidade já estava fissurada, os comprimentos da LA002-B e da LA003-B para o terceiro ensaio foram reduzidos para 3,60m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.

Onde:
 Nº Amostras – quantidade de lajes ensaiadas para cada tipo
 H_L – espessura da laje alveolar pré-fabricada
 H_C – espessura da capa de concreto sobre a laje alveolar pré-fabricada
 B_{wt} – largura total da laje alveolar
 L – comprimento da laje alveolar
 D_{alv} – diâmetro dos alvéolos da laje alveolar
 Nº alv Laje – quantidade de alvéolos para uma laje alveolar
 Nº alv Preenchidos – quantidade de alvéolos preenchidos com concreto

QUADRO 10 - CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS.

FONTE: A autora (2012).

O terceiro ensaio para todas as lajes teve que ser feito com uma mesma peça que havia sido ensaiada anteriormente, pois ocorreu um erro na quantidade de lajes solicitadas em projeto. O erro foi percebido somente quando a execução dos ensaios já estava em andamento e não havia tempo hábil para produzir e concretar alvéolos e capa de mais lajes.

4.3 PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO DAS LAJES PARA OS ENSAIOS

Conforme recomendado por Costa (2009), as lajes foram produzidas todas em uma mesma pista de concretagem.

A data da produção das lajes foi o dia 07/12/2011 e as mesmas foram produzidas de acordo com o projeto 4734-E01A (Anexo A).

No dia 22/12/2011 foram concretados os alvéolos e a capa das lajes necessárias, conforme o projeto 4734-E02A (Anexo A).

Para as lajes com capa e alvéolos preenchidos com concreto, optou-se por fazer o preenchimento juntamente com a concretagem da capa para simular a situação que freqüentemente ocorre na prática no canteiro de obras e que é mais desfavorável do ponto de vista da qualidade final da estrutura. Este tipo de preenchimento de alvéolos é chamado pela NBR 14861:2011 de preenchimento após a liberação da protensão na pista.

Outro tipo de preenchimento de alvéolos citado na NBR 14861:2011 é o preenchimento dos alvéolos antes da liberação da protensão na pista que ocorre quando o preenchimento dos alvéolos é feito na fábrica, com as lajes ainda na pista de concretagem, antes da liberação da protensão, ou seja, antes que a força de protensão seja transmitida para o concreto.

A situação de preenchimento após a liberação da protensão, fazendo a concretagem juntamente com o capeamento é desfavorável do ponto de vista da qualidade final da estrutura porque além das lajes com abertura nos alvéolos para posterior concretagem dos mesmos na obra serem mais suscetíveis à fissuração durante o transporte e montagem, o controle de qualidade da concretagem dos alvéolos na obra é menos rigoroso se comparado com o controle de qualidade na fábrica.

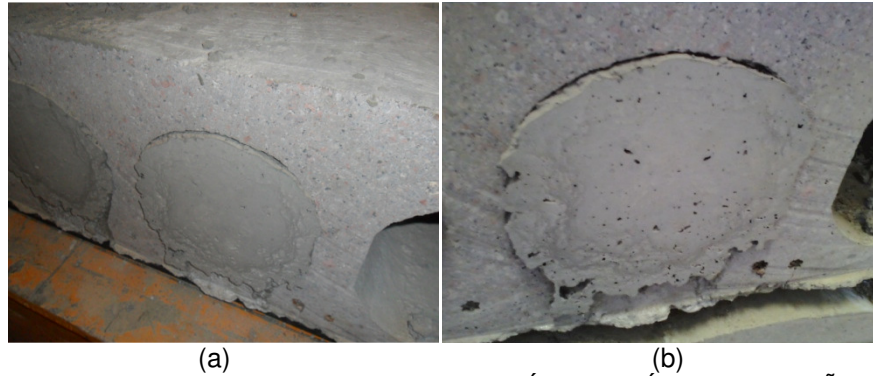
Faz parte do controle de qualidade do preenchimento dos alvéolos garantir que seja concretado o comprimento e a quantidade de alvéolos determinados no projeto e que sejam tomados os devidos cuidados para melhorar a aderência entre o concreto pré-fabricado e o concreto do preenchimento (moldado no local).

Essa aderência é difícil de ser obtida, pois o interior dos alvéolos tem uma superfície lisa e, além disso, durante a cura do concreto do preenchimento, o mesmo sofre retração e se descola das paredes do alvéolo da laje.

O objetivo nesta pesquisa foi simular exatamente o que tem sido executado na prática, e, por isso, não foi utilizado nenhum tipo de aditivo compensador de retração para o concreto.

Mesmo fazendo a concretagem dos alvéolos na fábrica, tomando os devidos cuidados com a limpeza do interior dos alvéolos e molhando sua superfície, o concreto do preenchimento não ficou totalmente aderido ao concreto da laje pré-fabricada, conforme mostra a Figura 26.

A Figura 26a ilustra uma laje antes do ensaio e a Figura 26b a mesma laje após o ensaio de cisalhamento.



(a) (b)
 FIGURA 26 – DETALHE DO PREENCHIMENTO DO ALVÉOLO APÓS A RETRAÇÃO DO CONCRETO.
 FONTE: A autora (2012).



FIGURA 27 – CONCRETAGEM DOS ALVÉOLOS E DA CAPA DAS LAJES.
 FONTE: A autora (2011).

Como pode ser observado na Figura 27, as lajes foram produzidas com aberturas na parte superior dos alvéolos para a entrada do concreto durante o

capeamento. Foram posicionados tampões de isopor para que a concretagem fosse limitada a uma distância de 80cm da extremidade da laje.

Antes da concretagem da capa e dos alvéolos, as superfícies das lajes e da parte interna dos alvéolos foram limpas e saturadas com água para não absorverem a água de amassamento do concreto da capa e do preenchimento.

Antes da realização de cada ensaio foi feita uma inspeção na laje, analisando a presença de fissuras e de escorregamento das cordoalhas. Não foram detectadas fissuras prévias aos ensaios tampouco escorregamento de cordoalhas.

Outro procedimento realizado antes de cada ensaio foi a caracterização geométrica das lajes. Conforme recomendado por COSTA (2009), mediu-se o diâmetro vertical e horizontal de cada alvéolo, as espessuras das nervuras, a distância do eixo da cordoalha até o fundo da laje, as espessuras, larguras e comprimentos.

A Figura 28 mostra todas as lajes prontas para serem ensaiadas.



FIGURA 28 – LAJES PRONTAS PARA OS ENSAIOS.

FONTE: A autora (2012).

4.4 PREPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Uma das vigas metálicas de apoio das lajes possuía internamente dois pistões (Figura 29a e 29b) para que o apoio ficasse móvel de forma que nenhuma força axial fosse gerada pela rotação da laje no apoio.

Conforme recomendado pela FIP (1992) e por Costa(2009), a viga com os pistões deve ser aquela que apóia a laje no lado mais próximo da aplicação da carga.

Para a regularização do apoio foi utilizada uma faixa de neoprene com espessura de 10mm e largura de 10cm (Figura 29c, 29d e 29e).

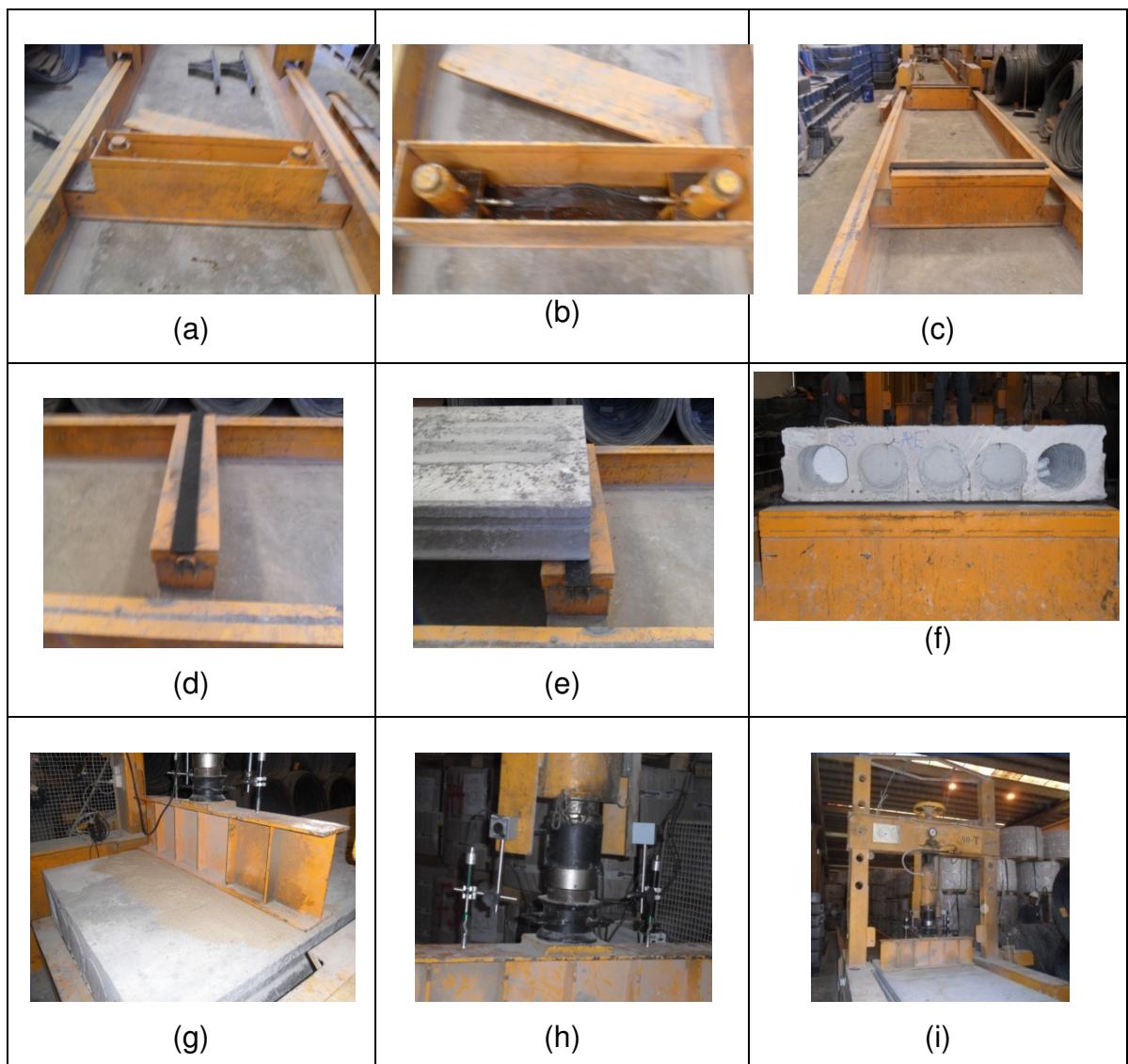


FIGURA 29 – PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

Após a colocação da laje alveolar apoiada sobre as vigas metálicas na posição de ensaio, foi colocada uma camada de areia sobre a laje para regularização do contato com a viga de transferência de carga (Figura 29g).

Em seguida foram posicionados a célula de carga e os dois deflectômetros sobre a viga de transferência, conforme Figura 29h. A Figura 29i mostra a laje e todo o equipamento montado pronto para o ensaio.

4.5 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Conforme recomendação da FIP (1992), a velocidade de aplicação da carga foi controlada de maneira a não exceder 50 kN/min e a carga foi aplicada a uma distância de 2,5.h da extremidade da laje, ou seja, 66cm.



FIGURA 30 – APLICAÇÃO E LEITURA DA CARGA DURANTE UM ENSAIO.
FONTE: A autora (2012).

Aplicou-se a carga até a ruptura da laje. Após a ruptura da laje foram fotografadas as fissuras e retiradas as medidas da posição e inclinação das fissuras com o objetivo de caracterizar o mecanismo de ruptura de cada laje e encontrar o ângulo θ da inclinação da biela comprimida e β da inclinação do tirante de concreto.

Finalmente transferiram-se os dados de leitura de cargas e deslocamentos dos dois deflectômetros para o computador e plotou-se o gráfico deslocamento vertical x carga para cada ensaio.

4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os gráficos deslocamento vertical x carga obtidos durante os ensaios estão apresentados no Apêndice A.

As fotos feitas após os ensaios são da extremidade na qual foi aplicada a carga. Procurou-se sempre mostrar as duas laterais desta mesma extremidade (Lado A e Lado B), conforme figuras apresentadas nos próximos tópicos.

4.6.1 Lajes Sem Capa

4.6.1.1 Laje LA001-A

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA001-A que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, sem capa e sem preenchimento de alvéolos.

Na primeira laje LA001-A observou-se que com 18 tf de carga houve um deslocamento do concreto próximo a uma das cordoalhas, o que caracteriza escorregamento da cordoalha devido à falha de ancoragem (Figura 31).

A ruptura da laje por cisalhamento ocorreu com 24,5 tf de carga (Figuras 32a e 32b).



FIGURA 31 – LA001-A - DESPLACAMENTO DO CONCRETO PRÓXIMO À CORDOALHA (FALHA DE ANCORAGEM).

FONTE: A autora (2012).

Na segunda laje LA001-A a ruptura ocorreu com 25,6 tf de carga.

As fissuras que surgiram nas duas laterais da laje são típicas de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento (Figuras 32c e 32d).

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA001-A menos danificada durante o primeiro ensaio. Como uma extremidade já estava fissurada, posicionou-se o apoio a 30cm da extremidade, ficando o comprimento de ensaio com 3,70m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.

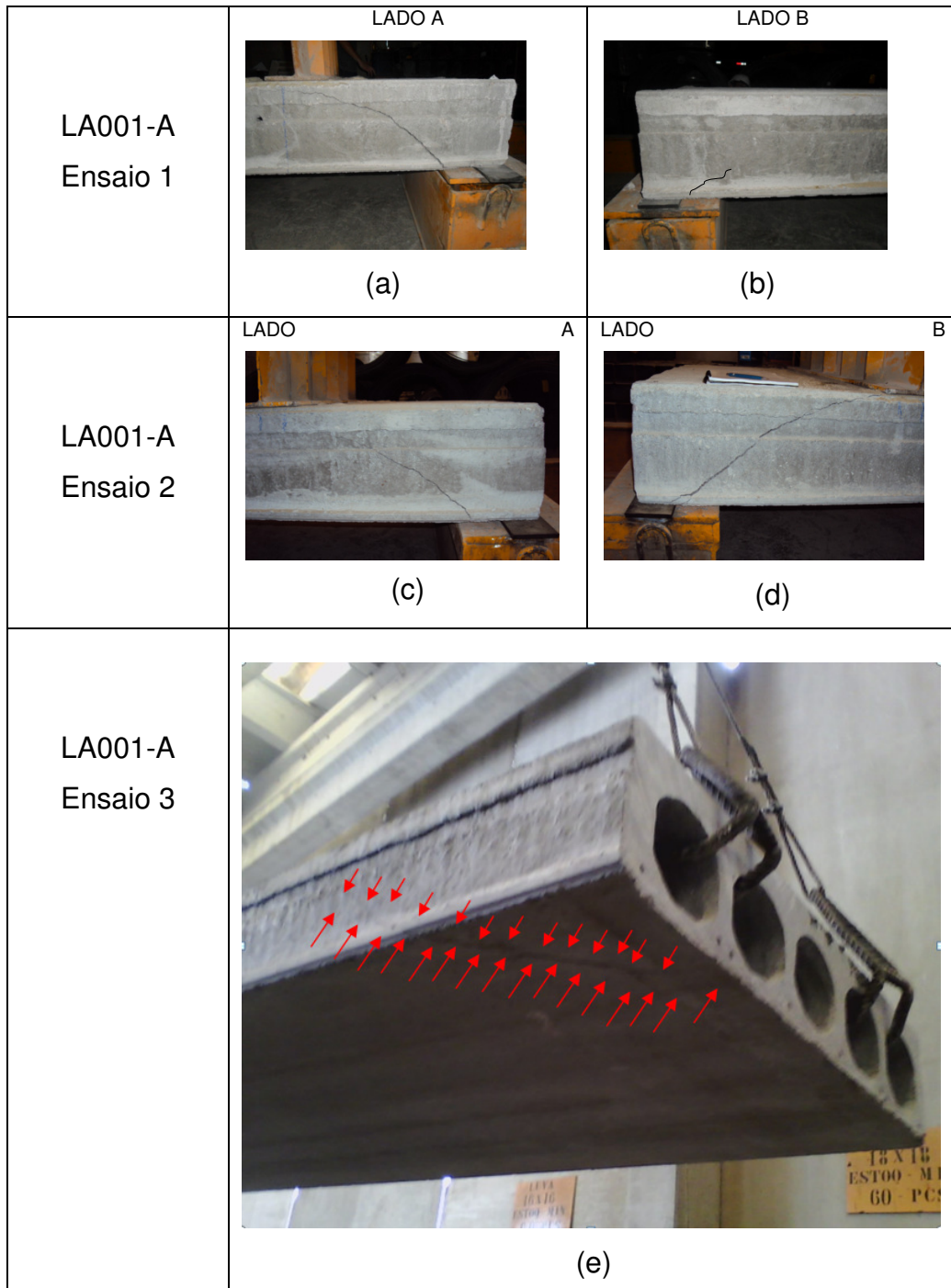


FIGURA 32 – FISSURAS DAS LAJES LA001-A APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

A carga de ruptura para este terceiro ensaio foi de apenas 18 tf. A redução na carga de ruptura para esta amostra ocorreu, provavelmente, devido a esta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, o que causou o início do escoamento do aço durante o primeiro ensaio.

Surgiram fissuras de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento apenas na primeira nervura da esquerda e surgiram fissuras de fendilhamento na segunda e terceira nervuras do lado esquerdo. As demais nervuras ficaram intactas.

4.6.1.2 Laje LA002-A

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA002-A que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, sem capa e com preenchimento de dois alvéolos.

Na primeira laje LA002-A observou-se que com 35 tf de carga não havia nenhuma fissura visível. Com 37 tf de carga surgiu uma fissura na parte superior do alvéolo central (Figura 33a) e uma pequena fissura de flexão embaixo da viga de transferência (Figura 33b) e a partir daí não foi possível aumentar a carga sobre a laje.

Na segunda laje LA002-A a ruptura ocorreu por falha da nervura por tração devido ao cisalhamento com 38 tf de carga (Figuras 33c e 33d).

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA002-A menos danificada durante o primeiro ensaio que foi a primeira amostra descrita anteriormente que tinha apenas uma fissura na parte superior do alvéolo, pois a fissura de flexão se fechou após a laje ser descarregada.

Portanto, para o terceiro ensaio de laje LA002-A o vão foi mantido para a laje com 4m de comprimento.

Com 23 tf de carga surgiu uma fissura na parte superior do primeiro alvéolo e a ruptura ocorreu com 29 tf. A redução na carga de ruptura para esta amostra ocorreu, provavelmente, devido a esta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, o que causou o início do escoamento do aço durante o primeiro ensaio.

Surgiram fissuras de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento apenas na primeira nervura e em uma nervura central adjacente ao alvéolo sem preenchimento. Ocorreram também fissuras junto às cordoalhas caracterizando o

seu escorregamento por falha de ancoragem, sendo que uma destas fissuras junto à cordoalha se prolongou pelo concreto do preenchimento de um alvéolo, o que demonstra que o mesmo trabalhou em conjunto com a seção da laje pré-fabricada (Figura 33f).

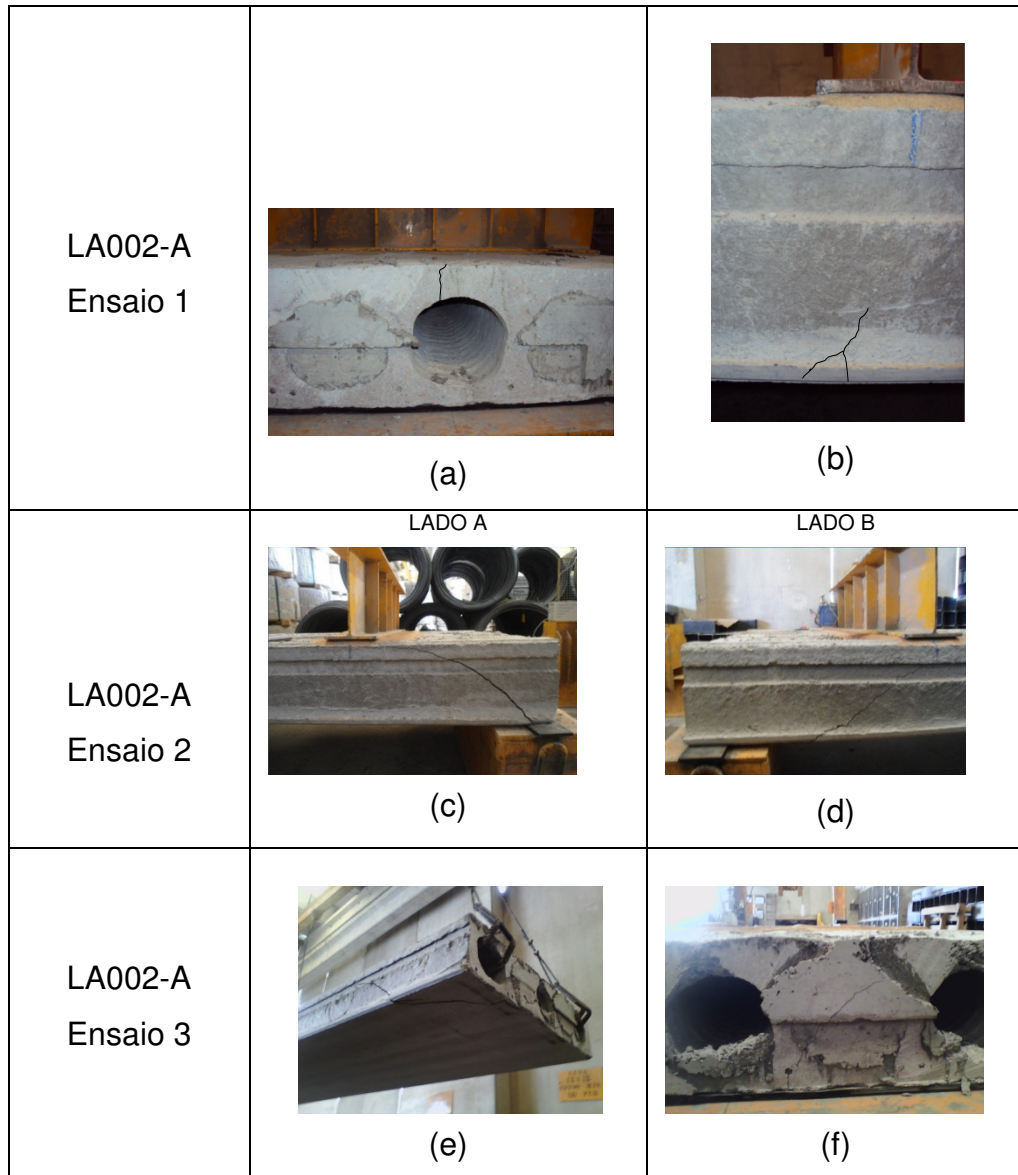


FIGURA 33 – FISSURAS DAS LAJES LA002-A APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

4.6.1.3 Laje LA003-A

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA003-A que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, sem capa e com preenchimento de três alvéolos.

Na primeira laje LA003-A observou-se que com 37 tf de carga surgiu uma pequena fissura embaixo da viga de transferência e o ensaio foi finalizado porque estava se aproximando da capacidade de carga máxima do equipamento.

Na segunda laje LA003-A a ruptura ocorreu por falha da nervura por tração devido ao cisalhamento com 35 tf de carga.

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA003-A menos danificada durante o primeiro ensaio que foi a primeira amostra descrita anteriormente que tinha apenas uma pequena fissura de flexão se fechou após a laje ser descarregada.

Portanto, para o terceiro ensaio de laje LA003-A o vão foi mantido para a laje com 4m de comprimento.

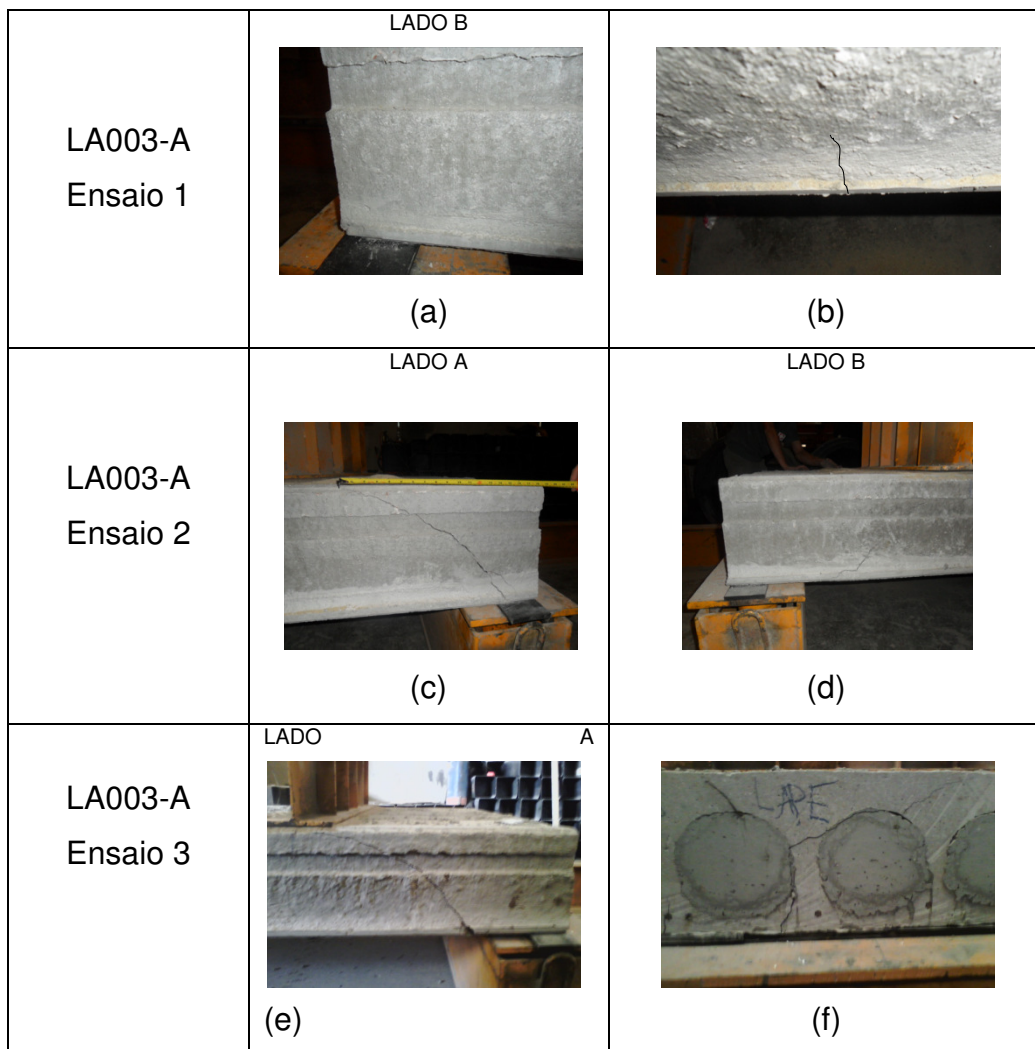


FIGURA 34 – FISSURAS DAS LAJES LA003-A APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

Com 18 tf de carga surgiu uma fissura na parte superior do primeiro alvéolo e a ruptura ocorreu com 25 tf. Assim como para as lajes LA001-A e LA002-A, a redução na carga de ruptura para esta amostra ocorreu, provavelmente, devido a

esta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, o que causou o início do escoamento do aço durante o primeiro ensaio.

Na segunda laje LA003-A foi possível observar após o término do ensaio as fissuras nas nervuras internamente aos alvéolos extremos que não eram preenchidos com concreto (Figura 35).

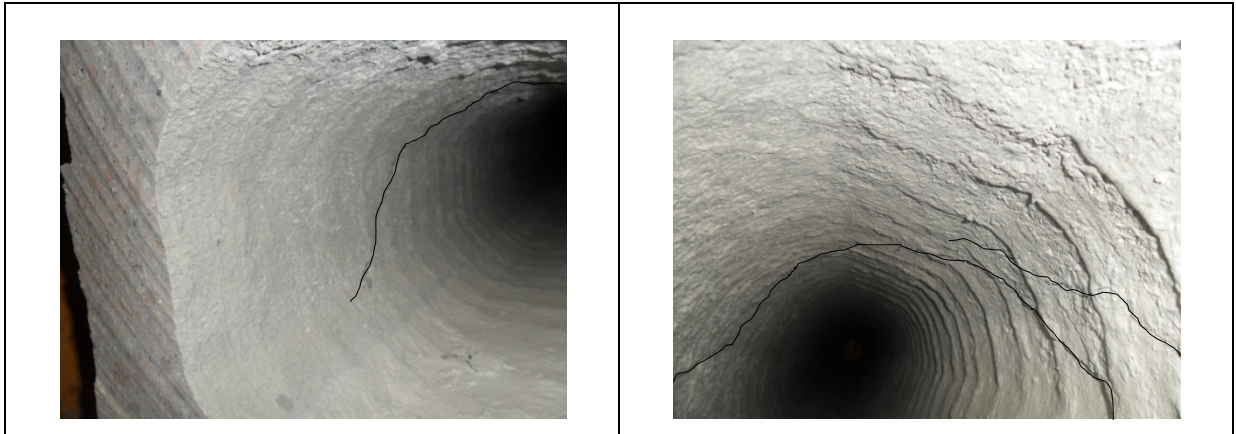


FIGURA 35 – FISSURAS NAS NERVURAS DAS LAJES LA003-A APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

Observou-se também fissuras junto às cordoalhas e escorregamento das mesmas (Figura 36).



FIGURA 36 – DETALHE DAS FISSURAS JUNTO ÀS CORDOALHAS DA SEGUNDA LA003-A.
FONTE: A autora (2012).

4.6.2 Lajes Com Capa

4.6.2.1 Laje LA001-B

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA001-B que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, com capa e sem preenchimento de alvéolos.

Na primeira laje LA001-B a ruptura ocorreu com 32,4 tf.

Foi possível observar fissuras em todas as nervuras típicas de falha por tração devido ao cisalhamento.

Na segunda laje LA001-B a ruptura ocorreu com 24,7 tf de carga.

Observou-se fissuras em todas as nervuras, exceto na última do lado direito. Estas fissuras são típicas de falha por tração devido ao cisalhamento.

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA001-B menos danificada durante o primeiro ensaio. Como uma extremidade já estava fissurada, posicionou-se o apoio a 30cm da extremidade, conforme a Figura 37, ficando o comprimento de ensaio com 3,70m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.



FIGURA 37 – APOIO DA LA001-B PARA O TERCEIRO ENSAIO.
FONTE: A autora (2012).

A carga de ruptura para este terceiro ensaio foi de 30 tf.

Esta laje já havia sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, mas mesmo assim a carga de ruptura ficou na média entre os valores dos dois primeiros ensaios.

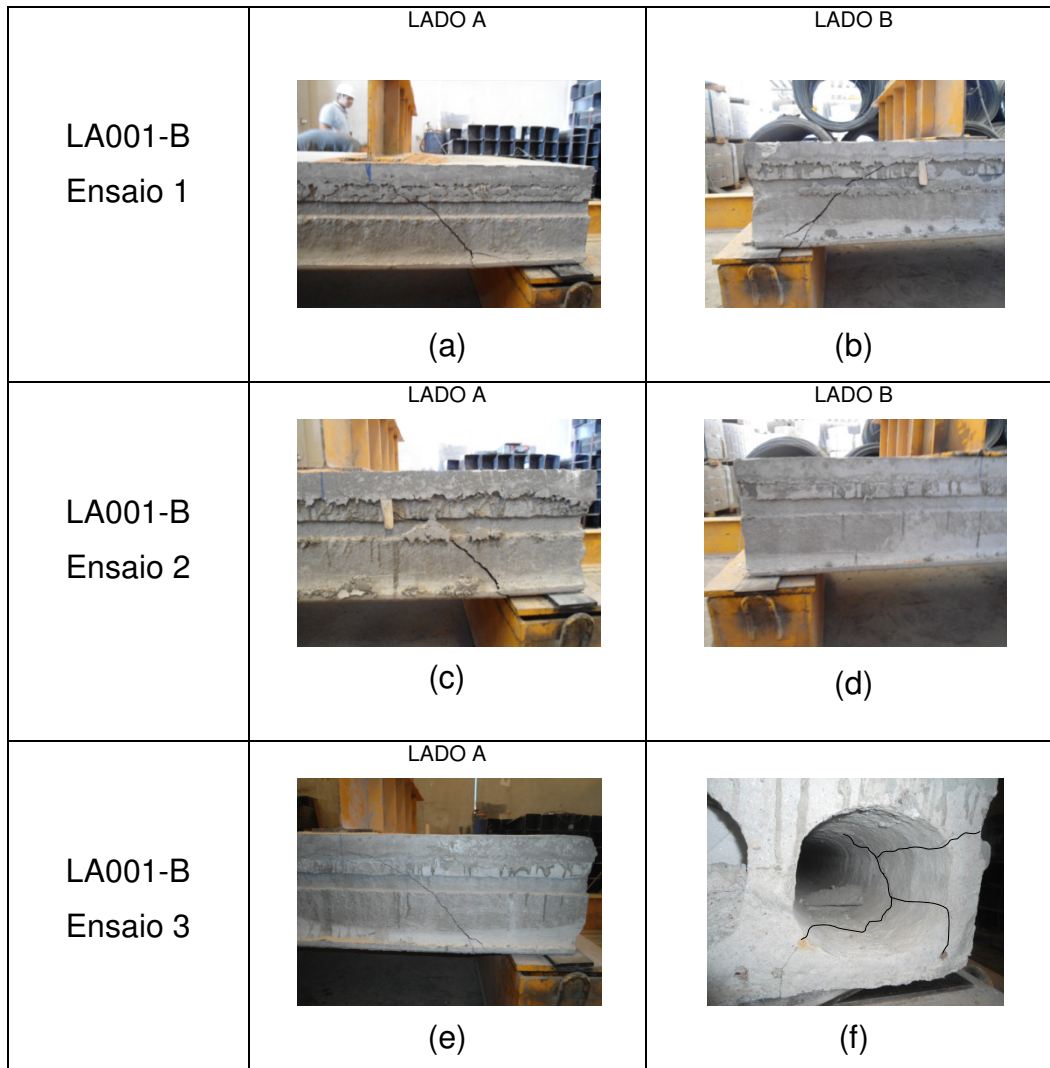


FIGURA 38 – FISSURAS DAS LAJES LA001-B APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

Surgiram fissuras de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento e fissuras de fendilhamento em algumas nervuras e fissuras junto às cordoalhas devido à falha de ancoragem e escorregamento das mesmas.

Na Figura 38f é possível observar que as fissuras junto às cordoalhas se unem à fissura da nervura por tração.

Na Figura 39 é possível visualizar as fissuras de tração devido ao cisalhamento nas nervuras internas das lajes LA001-B



FIGURA 39– FISSURAS NAS NERVURAS DA PRIMEIRA e SEGUNDA LA001-B.
 FONTE: A autora (2012).

4.6.2.2 Laje LA002-B

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA002-B que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, com capa e com preenchimento de dois alvéolos.

Na primeira laje LA002-B a ruptura ocorreu com 38,6 tf.

Observou-se uma fissura junto à quarta cordoalha e na nervura próxima a esta cordoalha (Figura 40b). Esta fissura se encontrou com a fissura de cisalhamento da primeira nervura. Na Figura 41 é possível observar estas fissuras se encontrando em uma vista da parte inferior da laje. O lado direito da seção não foi danificado pelas fissuras e as cordoalhas do lado direito não escorregaram.

Na segunda laje LA002-B a ruptura ocorreu com 34 tf de carga. Foram observadas fissuras na quarta e na quinta cordoalhas e na parte superior e inferior do alvéolo central que não é preenchido com concreto (Figura 40d). O lado direito da seção não foi danificado pelas fissuras e as cordoalhas do lado direito não escorregaram.

O escorregamento das cordoalhas é verificado quando as mesmas ficam afundadas para dentro do concreto após os ensaios. Portanto, é possível verificar que as cordoalhas não escorregaram quando a extremidade da cordoalha está rente à seção de concreto da laje, mostrando que não houve perda de aderência entre a cordoalha e o concreto.

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA002-B menos danificada durante o primeiro ensaio. Como uma extremidade já estava fissurada, posicionou-se o

apoio a 40cm da extremidade, ficando o comprimento de ensaio com 3,60m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.

Com 18 tf surgiu a primeira fissura localizada na parte superior de um alvéolo. A carga de ruptura para este terceiro ensaio foi de apenas 25 tf. A redução na carga de ruptura para esta amostra ocorreu, provavelmente, devido a esta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, o que causou o início do escoamento do aço durante o primeiro ensaio.

Surgiram fissuras de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento apenas na primeira nervura da esquerda (Figura 40e).

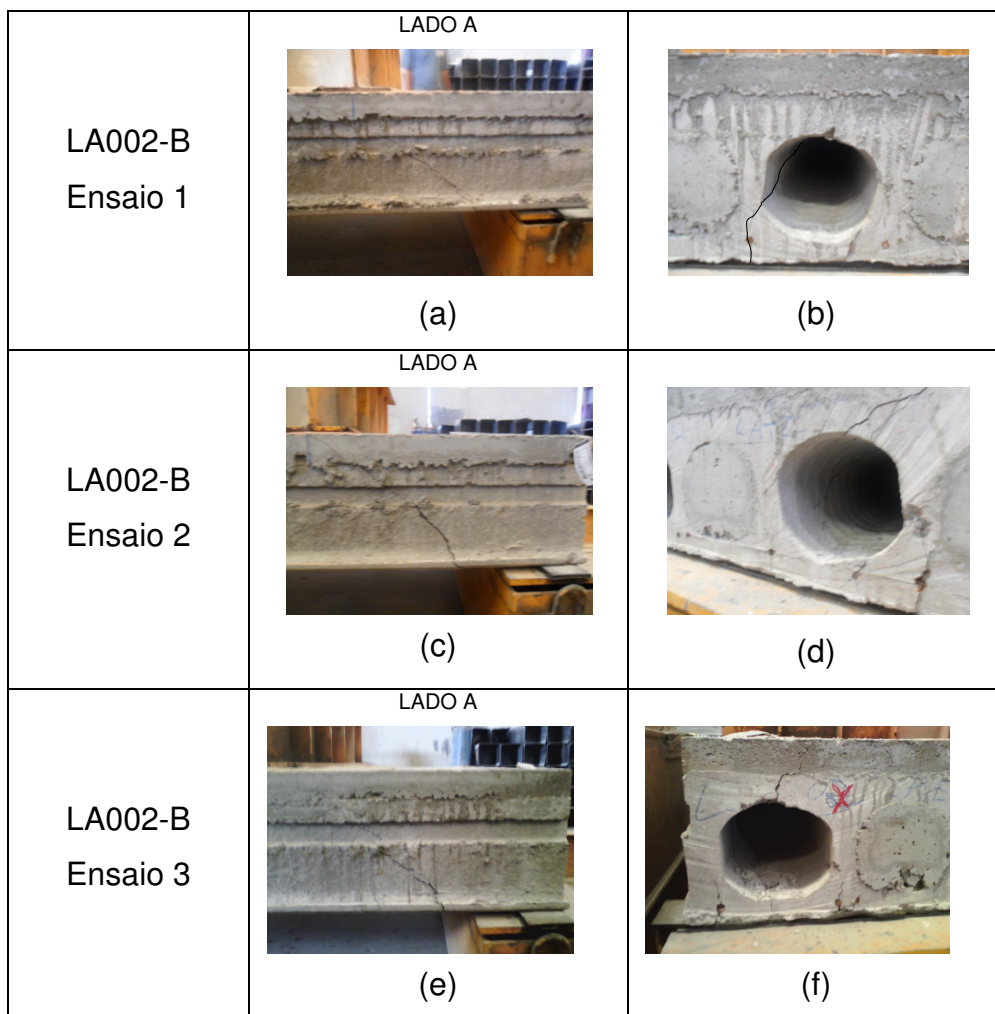


FIGURA 40 – FISSURAS DAS LAJES LA002-B APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).



FIGURA 41 – PRIMEIRA LA002-B APÓS O ENSAIO.
FONTE: A autora (2012).

4.6.2.3 Laje LA003-B

Foram realizados três ensaios com duas amostras de lajes LA003-B que são lajes alveolares com 26,5cm de espessura, com capa e com preenchimento de três alvéolos.

Na primeira laje LA003-B a ruptura ocorreu com 35 tf.



FIGURA 42 - FISSURA NA INTERFACE ENTRE O CONCRETO DA CAPA E O CONCRETO DA LAJE PRÉ-FABRICADA E FISSURAS JUNTO ÀS CORDOALHAS DA PRIMEIRA LA003-B.
FONTE: A autora (2012).

Observou-se uma fissura na interface entre o concreto da capa e o concreto da laje pré-fabricada, conforme mostra a Figura 42, caracterizando falha por cisalhamento na interface entre a laje e a capa.

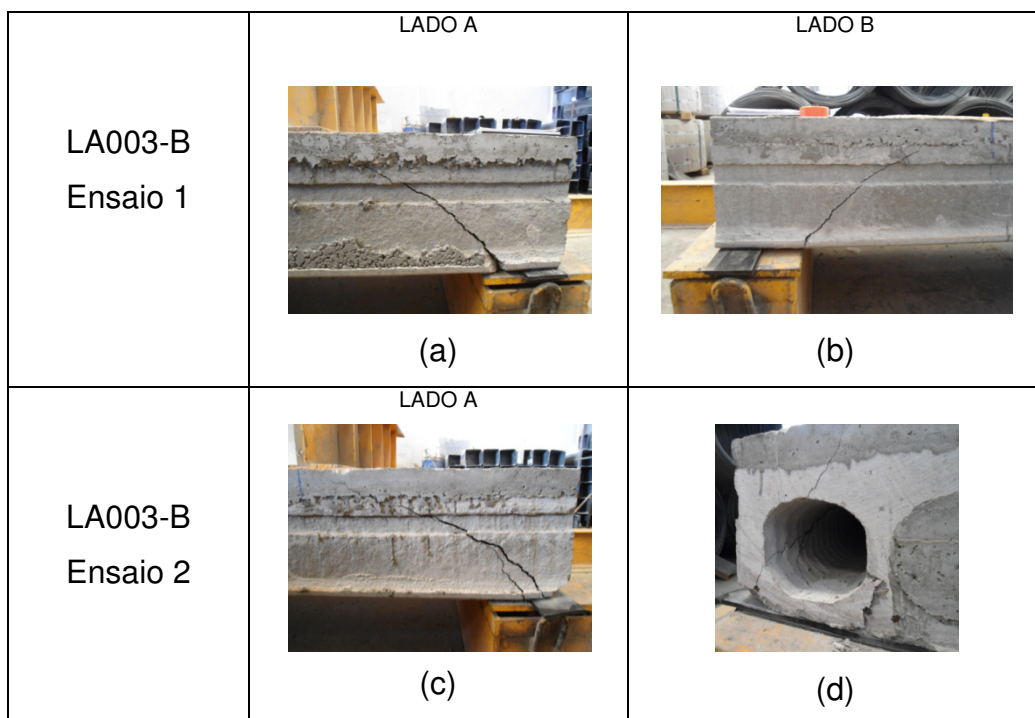
Notou-se um afundamento das cordoalhas e fissuras junto às mesmas, o que caracteriza falha de ancoragem das cordoalhas.

Na segunda laje LA003-B com a carga de 31 tf notou-se uma fissura no alvéolo e a ruptura por cisalhamento ocorreu com 32,6 tf de carga.

Para o terceiro ensaio foi escolhida a laje LA003-B menos danificada durante o primeiro ensaio. Como uma extremidade já estava fissurada, posicionou-se o apoio a 40cm da extremidade, ficando o comprimento de ensaio com 3,60m, de maneira a descartar a extremidade fissurada.

Com 29 tf surgiu a primeira fissura localizada na parte superior de um alvéolo. A carga de ruptura para este terceiro ensaio foi de 34 tf.

Esta laje já havia sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta, mas mesmo assim a carga de ruptura ficou na média entre os valores dos dois primeiros ensaios.



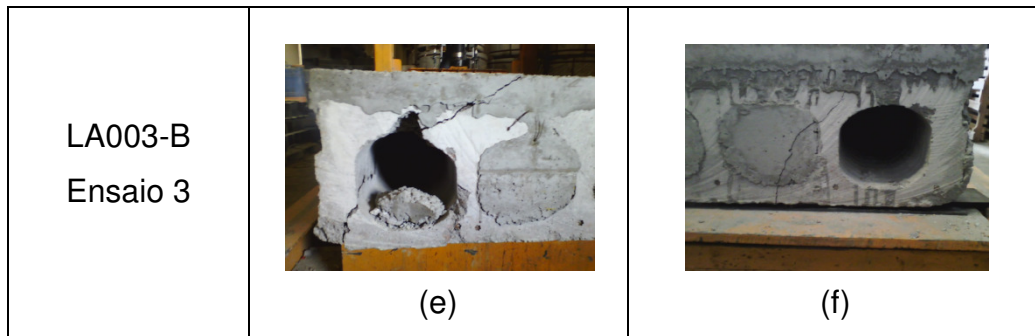


FIGURA 43 – FISSURAS DAS LAJES LA003-B APÓS OS ENSAIOS.
FONTE: A autora (2012).

Surgiram fissuras de falha da nervura por tração devido ao cisalhamento, fissuras junto às cordoalhas caracterizando falha por perda da ancoragem e escorregamento e uma fissura na parte inferior de um alvéolo concretado que atravessou o concreto do preenchimento do alvéolo, demonstrando que o mesmo trabalhou em conjunto com a seção da laje pré-fabricada (Figura 43f).

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Com os valores das cargas últimas obtidas nos ensaios, o peso próprio das lajes, da capa e do preenchimento dos alvéolos e o peso próprio da viga metálica de transferência de carga atuando na laje bi apoiada, calculou-se os valores do esforço cortante último experimental junto aos apoios das lajes.

Os valores do esforço cortante resistente foram calculados conforme a equação apresentada no item 19.4.1 da NBR 6118:2003 – Lajes sem armadura para força cortante e também conforme o item 7.3.2.8 da NBR 14861:2011, considerando-se 15% de perdas de protensão na idade dos ensaios e desconsiderando-se os coeficientes de minoração das resistências dos materiais.

O laboratório da empresa parceira fez as verificações e a comparação da massa específica dos corpos de prova cilíndricos de concreto com a massa específica de amostras do concreto retiradas das lajes alveolares.

A massa específica média dos corpos de prova foi de 2,28 kg/dm³ e das lajes alveolares ensaiadas foi de 2,38 kg/dm³.

Como a massa específica das lajes foi maior do que dos corpos de prova cilíndricos, supõe-se que a resistência à compressão das lajes é maior do que dos corpos de prova e considerou-se que os mesmos estão representando

adequadamente o concreto da laje alveolar. Assim, não foi feita a retirada de testemunhos das lajes para fazer novos ensaios de resistência à compressão.

Portanto, para o cálculo dos valores teóricos do esforço cortante resistente foi utilizada a resistência à compressão do concreto das lajes alveolares aos 28 dias (f_{ck}) obtida através de ensaios em corpos de prova cilíndricos que foi de 46,5 MPa. Foi utilizada também a resistência à compressão do concreto da capa e do preenchimento dos alvéolos aos 28 dias (f_{ck}) obtida através de ensaios em corpos de prova cilíndricos que foi de 51,1 MPa.

É muito comum que a resistência à compressão do concreto das lajes alveolares na prática seja significativamente maior que a resistência especificada em projeto. Isso ocorre devido ao processo fabril e ao ritmo de produção, no qual é necessária uma resistência mínima de liberação da protensão de 21 MPa em apenas 24 horas. Para se obter este valor neste prazo, é utilizado o cimento de alta resistência inicial e a cura a vapor. O fator água/cimento baixo também é inerente ao processo de produção das lajes alveolares e contribui para se obter altos valores de resistência à compressão. No caso das lajes ensaiadas para esta pesquisa, a resistência à compressão especificada em projeto foi de 30 MPa e o valor obtido nos ensaios com corpos de prova cilíndricos foi de 46,5 MPa aos 28 dias.

4.7.1 Correção a ser feita na NBR 14861:2011

Ao calcular-se o esforço cortante resistente através das equações apresentadas na NBR 14861:2011, inicialmente verificou-se que esta norma está muito mais rigorosa no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do que a NBR 6118:2003.

O Quadro 11 apresenta os valores do esforço cortante experimental, os valores dos esforços cortantes teóricos resistentes calculados conforme a NBR 6118:2003 e a NBR 14861:2011 e a relação entre o esforço cortante experimental e o esforço cortante teórico resistente.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 14861)
LA001-A-1	215,72	142,50	1,51	76,42	2,82
LA001-A-2	225,08	142,50	1,58	76,42	2,95
LA001-A-3	164,25	142,50	1,15	76,42	2,15
LA002-A-1	332,72	269,55	1,23	111,98	2,97
LA002-A-2	322,68	269,55	1,20	111,98	2,88
LA002-A-3	258,14	269,55	0,96	111,98	2,31
LA003-A-1	322,17	328,24	0,98	129,76	2,48
LA003-A-2	305,64	328,24	0,93	129,76	2,36
LA003-A-3	227,10	328,24	0,69	129,76	1,75
LA001-B-1	285,58	162,80	1,75	85,4	3,34
LA001-B-2	220,79	162,80	1,36	85,4	2,59
LA001-B-3	255,35	162,80	1,57	85,4	2,99
LA002-B-1	339,31	313,24	1,08	127,11	2,67
LA002-B-2	300,67	313,24	0,96	127,11	2,37
LA002-B-3	222,18	313,24	0,71	127,11	1,75
LA003-B-1	310,03	382,58	0,81	147,97	2,10
LA003-B-2	288,86	382,58	0,76	147,97	1,95
LA003-B-3	298,94	382,58	0,78	147,97	2,02

QUADRO 11 - COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS CORTANTES ÚLTIMOS EXPERIMENTAIS COM OS ESFORÇOS CORTANTES RESISTENTES CONFORME A NBR 6118:2003 E A NBR 14861:2011 (COM α EM DUPLICIDADE).

FONTE: A autora (2012).

Devido a esta grande diferença encontrada nos resultados calculados em relação à NBR 6118:2003, mesmo para lajes sem preenchimento de alvéolos, e devido aos valores experimentais estarem em média 2,5 vezes maiores que os valores calculados pela NBR 14861:2011, indo contra a economia, a autora desta dissertação consultou o professor Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, membro da Comissão de Estudo CE-18:600.19 - Comissão de Estudos de Painéis Alveolares de Concreto da ABNT, que publicou a revisão da norma brasileira NBR 14861. Ele verificou a informação e confirmou que efetivamente existe um erro no texto da norma, pois o coeficiente α foi considerado em duplicidade.

Esta autora alertou a secretária da Comissão CE-18:600.19, engenheira Daniela Gutstein que informou a ABNT para que seja providenciada uma emenda para correção desta informação na NBR 14861:2011.

O coeficiente α leva em consideração a redução da tensão de protensão na região do comprimento de transmissão e está apresentado da seguinte maneira nesta primeira versão da NBR 14861:2011:

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (22)$$

Onde:

l_x é a distância da seção x a partir do final da laje;

l_{pt2} é o valor de projeto do comprimento de transmissão (fixado em 85ϕ).

De acordo com Catoia (2011) a correção da tensão de protensão é prevista pelo fator $0,15\sigma_{cp}$, presente na equação recomendada pela NBR 6118:2003, para determinar a força cortante de cálculo.

Este fator $0,15\sigma_{cp}$ é o mesmo que aparece nas equações de $V_{p,1}$ e $V_{p,2}$ da NBR 14861:2011, conforme segue:

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (17)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (25)$$

Entretanto, nas equações de $\sigma_{cp,1}$ e $\sigma_{cp,2}$ o fator α aparece novamente:

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \alpha \quad (20)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \alpha \quad (28)$$

A ABNT emitirá em breve uma emenda da NBR 14861:2011 com as correções necessárias, na qual $\sigma_{cp,1}$ e $\sigma_{cp,2}$ deverão ficar conforme as equações 32 e 33:

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \quad (32)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \quad (33)$$

A seguir encontram-se as análises dos resultados com os valores de esforço cortante resistente calculado pela NBR 14861:2011 já com as correções descritas anteriormente.

4.7.2 Análise dos Valores de Esforço Cortante para Lajes sem Capa

O Quadro 12 apresenta os valores do esforço cortante último experimental ($V_{u,exp}$), obtido nos ensaios das lajes sem capa, os valores teóricos do esforço cortante resistente calculados conforme a NBR 6118:2003 e conforme a NBR 14861:2011 (V_{Rk1}) e as relações entre os valores experimentais e os valores teóricos.

Foi feita a correção nos valores de V_{Rk1} calculados através das equações da NBR 14861:2011 já retirando o coeficiente α para o cálculo correto do $\sigma_{cp,1}$, conforme observado anteriormente.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 14861)
LA001-A-1	215,72	142,50	1,51	142,50	1,51
LA001-A-2	225,08	142,50	1,58	142,50	1,58
LA001-A-3	164,25 *	142,50	1,15	142,50	1,15
LA002-A-1	332,72 **	269,55	1,23	192,29	1,73
LA002-A-2	322,68	269,55	1,20	192,29	1,68
LA002-A-3	258,14 *	269,55	0,96	192,29	1,34
LA003-A-1	322,17 ***	328,24	0,98	217,18	1,48
LA003-A-2	305,64	328,24	0,93	217,18	1,41
LA003-A-3	227,10 *	328,24	0,69	217,18	1,05
* Foram produzidas duas lajes de cada tipo e o terceiro ensaio foi realizado na outra extremidade de uma laje que já havia sido ensaiada anteriormente					
** A partir deste valor a carga parou de aumentar					
*** Ensaio interrompido devido à carga estar próxima a capacidade do equipamento					

QUADRO 12 – VALORES DE ESFORÇO CORTANTE PARA LAJES SEM CAPA.
FONTE: A autora (2012).

Costa et al. (2011) informam que de acordo com o anexo A2:2009 incorporado na revisão da EN 1168:2005, a aprovação da peça ensaiada ou a condição para que a confiabilidade do modelo teórico seja confirmada somente irá ocorrer se forem atendidas as seguintes condições:

- $R_{test}/R_{calc} \geq 0,95$ para cada ensaio

- Proporção $(R_{\text{test}}/R_{\text{calc}})_{\text{med}} \geq 1,00$ para a média de três ensaios

Onde:

R_{calc} é a resistência ao esforço cortante último calculado para cada elemento ensaiado

R_{test} é a resistência ao esforço último atual para cada elemento ensaiado

A proporção $(R_{\text{test}}/R_{\text{calc}})_{\text{med}}$ é o valor médio dos três valores de carga última atual e o correspondente valor esperado da carga última.

Conforme pode ser observado no Quadro 13, calculando-se o esforço cortante resistente teórico de acordo com a NBR 6118:2003, com exceção de duas lajes sem capa e com preenchimento de três alvéolos, todas as lajes atendem à primeira condição do anexo A2:2009 da EN 1168:2005, ou seja, $R_{\text{test}}/R_{\text{calc}} = V_{u,\text{exp}}/V_{Rk1} \geq 0,95$.

Calculando-se o esforço cortante resistente teórico de acordo com a NBR 14861:2011, todas as lajes sem capa atendem à primeira condição do anexo A2:2009 da EN 1168:2005, ou seja, $R_{\text{test}}/R_{\text{calc}} = V_{u,\text{exp}}/V_{Rk1} \geq 0,95$.

Ferreira et al. (2008), Costa (2009) e Catoia (2011) já haviam observado que os valores de força cortante experimental para lajes com alvéolos preenchidos não cresciam, em relação aos valores para as lajes sem preenchimento de alvéolos, na mesma proporção que os valores de força cortante resistente calculados de acordo com a NBR 6118:2003.

Por isso, a única alteração que houve nos cálculos da força cortante resistente na NBR 14861:2011 em relação à NBR 6118:2003 foi a redução da resistência da parcela que representa a concretagem dos alvéolos e a recomendação de que a concretagem de mais de dois alvéolos seja feita somente se for devidamente fundamentada em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental.

No Quadro 13 observa-se que os valores da força cortante resistente calculados de acordo com as duas normas, para lajes sem capa e sem preenchimento de alvéolos, são iguais.

Para as lajes com preenchimento de alvéolos verifica-se que os valores calculados pela NBR 6118:2003 são maiores que os calculados através da NBR 14861:2011. Assim, os valores de resistência de acordo com a NBR 14861:2011 são favoráveis à segurança e no caso destes ensaios realizados, são menores que os

valores experimentais, mostrando que os critérios adotados para redução da resistência da concretagem dos alvéolos na NBR 14861:2011 para as lajes sem capa estão coerentes com a prática.

Laje	$V_{u,exp,med}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp,med}}{VRk1}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp,med}}{VRk1}$ (NBR 14861)
LA001-A	201,68	142,50	1,42	142,50	1,42
LA002-A	304,51	269,55	1,13	192,29	1,58
LA003-A	284,97	328,24	0,87	217,18	1,31

QUADRO 13 – VALORES MÉDIOS DE ESFORÇO CORTANTE PARA LAJES SEM CAPA.
FONTE: A autora (2012).

Comparando-se os valores do esforço cortante último experimental médio apresentados no Quadro 13, entre os três tipos de laje sem capa, observa-se que houve um incremento de 51% para as lajes com dois alvéolos preenchidos em relação às lajes com alvéolos vazios. Entretanto, para o caso das lajes com preenchimento de três alvéolos, o incremento foi de apenas 41,3% em relação às lajes sem preenchimento.

No ensaio da LA002-A-1 o valor do esforço cortante experimental para esta laje com dois alvéolos preenchidos foi 3% acima do maior o valor obtido para as lajes com três alvéolos preenchidos (LA003-A-1). Houve também um caso para a laje com três alvéolos preenchidos (LA003-A-3) que ficou abaixo de todos os valores das lajes com dois alvéolos preenchidos.

A partir destes resultados, conclui-se que a recomendação da NBR 14861:2011 para que seja limitado o número de alvéolos preenchidos a no máximo dois alvéolos é coerente com o comportamento das lajes de espessura 26,5cm na prática.

A posição dos alvéolos preenchidos com concreto deve influenciar mais na resistência ao cisalhamento da laje do que o aumento da quantidade de alvéolos preenchidos. Como nas lajes com dois alvéolos preenchidos foi adotado o preenchimento de alvéolos alternados, de acordo com a recomendação da Figura 5 da NBR 14861:2011 (Figura 12 desta dissertação), conclui-se que o preenchimento

de alvéolos alternados é uma boa alternativa para se obter os valores esperados de resistência ao cisalhamento.

Catoia (2011) também observou em sua pesquisa que a resistência experimental pouco variou para as situações com dois ou quatro alvéolos preenchidos para as lajes de 20cm de espessura. Ela afirmou que este efeito está relacionado com a disposição desses alvéolos. Por meio dos ensaios, Catoia (2011) identificou a presença de pontos fracos nas unidades de lajes parcialmente preenchidas. No caso de dois alvéolos preenchidos, apresentaram-se como pontos fracos os alvéolos de extremidade e a nervura central, que, por sua vez, permaneceu como ponto fraco nas unidades com quatro preenchimentos.

Na pesquisa aqui apresentada, pode-se dizer que ocorreu este mesmo fenômeno, pois diversas lajes com três alvéolos preenchidos fissuraram nos alvéolos e nervuras externos que não foram preenchidos assim como ocorreu para algumas lajes com dois alvéolos preenchidos.

As relações $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ para V_{Rk1} calculados de acordo com a NBR 6118 são maiores do que 1,00, com exceção das lajes com três alvéolos concretados que foi de 0,87.

Portanto, a proporção $(R_{test}/R_{calc})_{med} = V_{u,exp,med}/V_{Rk1} \geq 1,00$ para a média de três ensaios, com V_{Rk1} calculado conforme a NBR 6118, foi atendida para as lajes sem capa e sem preenchimento de alvéolos e para as lajes sem capa com preenchimento de dois alvéolos, sendo reprovadas as lajes sem capa com preenchimento de três alvéolos.

As relações $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ para V_{Rk1} calculados de acordo com a NBR 14861 são maiores do que 1,00 para todos os tipos de laje sem capa.

A proporção $(R_{test}/R_{calc})_{med} = V_{u,exp,med}/V_{Rk1} \geq 1,00$ para a média de três ensaios, com V_{Rk1} calculado conforme a NBR 14861, foi atendida para todas as lajes sem capa, com e sem preenchimento de alvéolos. Portanto, todas as lajes sem capa foram aprovadas para a segunda condição estabelecida pelo anexo A2:2009 da EN 1168:2005 e a confiabilidade do modelo teórico apresentado na NBR 14861:2011 foi confirmada, desde que seja feita a correção desta norma eliminando o coeficiente α do cálculo da tensão $\sigma_{cp,1}$.

Mesmo sendo atendidas as duas condições do anexo A2:2009 da EN 1168:2005 para a maioria das lajes ensaiadas sem capa e para o cálculo dos

valores teóricos de acordo com as duas normas brasileiras, vale lembrar que no terceiro ensaio dos três tipos de laje sem capa, a carga de ruptura foi bem menor do que das demais lajes do mesmo tipo, provavelmente devido ao fato do terceiro ensaio de todas as lajes ter sido feito com uma laje já ensaiada anteriormente na extremidade oposta e a armadura ativa já ter atingido o escoamento naquela região.

O Quadro 14 mostra o valor do esforço cortante último experimental médio calculado apenas para os dois primeiros ensaios de cada tipo de laje sem capa e a relação entre este valor e os valores dos esforços cortantes resistentes teóricos calculados de acordo com a NBR 6118:2003 e NBR 14861:2011.

Laje	$V_{u,exp,med}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 14861)
LA001-A	220,40	142,50	1,55	142,50	1,55
LA002-A	327,70	269,55	1,22	192,29	1,70
LA003-A	313,91	328,24	0,96	217,18	1,45

QUADRO 14 - VALORES DE ESFORÇO CORTANTE MÉDIO APENAS PARA OS DOIS PRIMEIROS ENSAIOS DE CADA TIPO DE LAJES SEM CAPA.

FONTE: A autora (2012).

Analisando o Quadro 14, verifica-se que as relações $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ melhoraram, mas mesmo assim, para as lajes sem capa e com preenchimento de três alvéolos continua não atendendo a proporção $(R_{test}/R_{calc})_{med} = V_{u,exp,med}/V_{Rk1} \geq 1,00$, calculando-se V_{Rk1} através da NBR 6118:2003. Mesmo que elas atendessem esta condição, não seria possível garantir a confiabilidade do modelo teórico apresentado na NBR 6118:2003 para as lajes sem capa e com três alvéolos preenchidos porque a proporção deve ser feita para uma média de três ensaios.

4.7.3 Análise dos Valores de Esforço Cortante para Lajes com Capa

O Quadro 15 apresenta os valores do esforço cortante último experimental ($V_{u,exp}$), obtido nos ensaios das lajes com capa, os valores teóricos do esforço

cortante resistente calculados conforme a NBR 6118:2003 e conforme a NBR 14861:2011 (V_{Rk1}) e a relação entre os valores experimentais e os valores teóricos.

Foi feita a correção nos valores de V_{Rk1} calculados através das equações da NBR 14861:2011 já retirando o coeficiente α para o cálculo correto do $\sigma_{cp,2}$, conforme observado anteriormente.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$ (NBR 14861)
LA001-B-1	285,58	162,80	1,75	162,80	1,75
LA001-B-2	220,79	162,80	1,36	162,80	1,36
LA001-B-3	255,35 *	162,80	1,57	162,80	1,57
LA002-B-1	339,31	313,24	1,08	221,19	1,53
LA002-B-2	300,67	313,24	0,96	221,19	1,36
LA002-B-3	222,18 *	313,24	0,71	221,19	1,00
LA003-B-1	310,03	382,58	0,81	250,39	1,24
LA003-B-2	288,86	382,58	0,76	250,39	1,15
LA003-B-3	298,94 *	382,58	0,78	250,39	1,19

* Foram produzidas duas lajes de cada tipo e o terceiro ensaio foi realizado na outra extremidade de uma laje que já havia sido ensaiada anteriormente.

QUADRO 15 – VALORES DE ESFORÇO CORTANTE PARA LAJES COM CAPA.
FONTE: A autora (2012).

Conforme pode ser observado no Quadro 15, calculando-se o esforço cortante resistente teórico de acordo com a NBR 6118:2003, as lajes com capa e sem preenchimento de alvéolos e duas lajes com capa e com preenchimento de dois alvéolos atendem à primeira condição do anexo A2:2009 da EN 1168:2005, ou seja, $R_{test}/R_{calc} = V_{u,exp}/V_{Rk1} \geq 0,95$.

Uma das lajes com capa e com preenchimento de dois alvéolos (LA002-B-3) e todas as lajes com capa e com preenchimento de três alvéolos não atenderam esta primeira condição.

Para as lajes com preenchimento de três alvéolos este resultado já era esperado, pois já foi constatado em outras pesquisas que a resistência ao esforço cortante para lajes com três alvéolos preenchidos não cresce na mesma proporção que é calculada através do item 19.4.1 da NBR 6118:2003.

Quanto à laje com capa e com preenchimento de dois alvéolos (LA002-B-3) que não atendeu a primeira condição do anexo A2:2009 da EN 1168:2005, a carga de ruptura da mesma foi menor do que das demais lajes do mesmo tipo,

provavelmente devido ao fato desta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta e a armadura ativa já ter atingido o escoamento naquela região.

Quanto às outras duas lajes que já tinham sido ensaiadas anteriormente com aplicação da carga na outra extremidade, LA001-B-3 e LA003-B-3, as mesmas obtiveram resultados satisfatórios, dentro da média entre os valores obtidos para as demais lajes do mesmo tipo.

Calculando-se o esforço cortante resistente teórico de acordo com a NBR 14861:2011, todas as lajes com capa atendem à primeira condição do anexo A2:2009 da EN 1168:2005, ou seja, $R_{\text{test}}/R_{\text{calc}} = V_{u,\text{exp}}/V_{Rk1} \geq 0,95$.

Nota-se que, assim como para as lajes sem capa, para o caso das lajes com capa a única alteração que houve nos cálculos da força cortante resistente na NBR 14861:2011 em relação à NBR 6118:2003 foi a redução da resistência da parcela que representa a concretagem dos alvéolos. Recomenda-se que a concretagem de mais de dois alvéolos seja feita somente se for devidamente fundamentada em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental.

No Quadro 15 observa-se que os valores da força cortante resistente calculados de acordo com as duas normas, para lajes com capa e sem preenchimento de alvéolos, são iguais.

Para as lajes com capa e com preenchimento de alvéolos verifica-se que os valores calculados pela NBR 6118:2003 são bem maiores que os calculados através da NBR 14861:2011. Assim, os valores de resistência de acordo com a NBR 14861:2011 são favoráveis à segurança e no caso destes ensaios realizados, são menores que os valores experimentais, mostrando que os critérios adotados para redução da resistência da concretagem dos alvéolos para as lajes com capa na NBR 14861:2011 estão coerentes com a prática.

A Figura 44 apresenta as relações $V_{u,\text{exp}}/V_{Rk1}$, entre os valores do esforço cortante último experimental ($V_{u,\text{exp}}$) obtido nos ensaios das lajes com e sem capa e os valores teóricos do esforço cortante resistente V_{Rk1} calculados conforme a NBR 6118:2003.

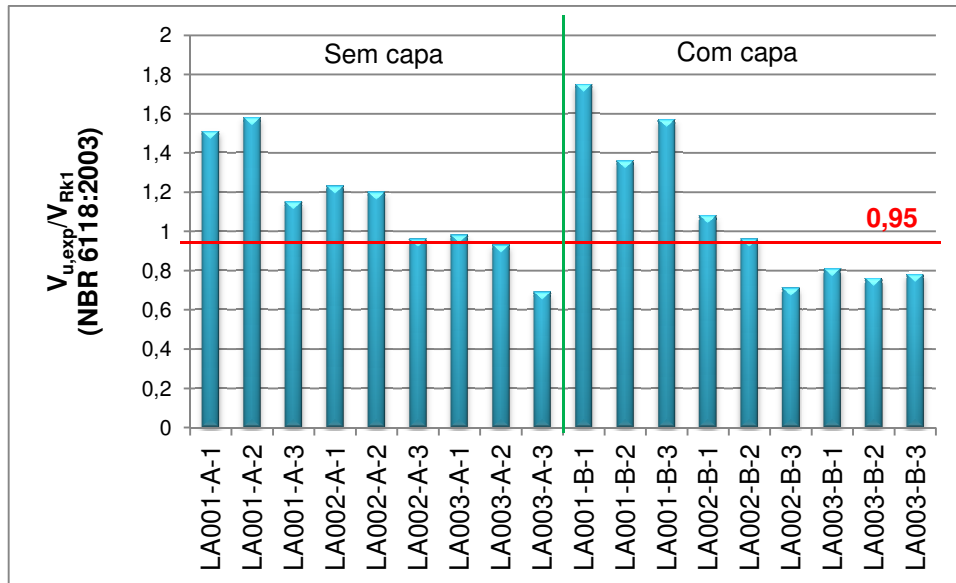


FIGURA 44 - RELAÇÕES $V_{u,exp}/V_{Rk1}$ PARA LAJES COM E SEM CAPA COM V_{Rk1} CALCULADO PELA NBR 6118:2003.

FONTE: A autora (2012).

A Figura 45 apresenta as relações $V_{u,exp}/V_{Rk1}$, entre os valores do esforço cortante último experimental ($V_{u,exp}$) obtido nos ensaios das lajes com e sem capa e os valores teóricos do esforço cortante resistente V_{Rk1} calculados conforme a NBR 14861:2011.

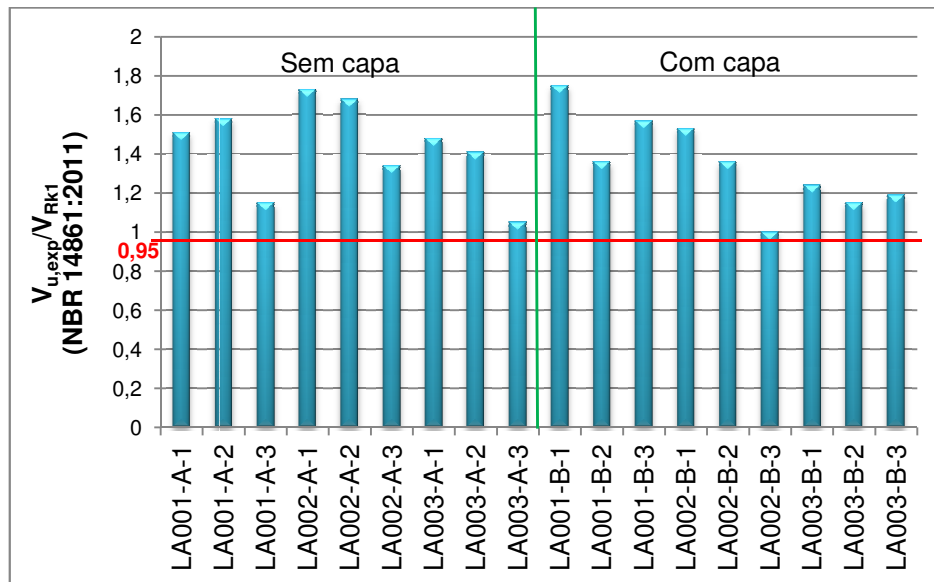


FIGURA 45 - RELAÇÕES $V_{u,exp}/V_{Rk1}$ PARA LAJES COM E SEM CAPA COM V_{Rk1} CALCULADO PELA NBR 14861:2011.

FONTE: A autora (2012).

Laje	$V_{u,exp,med}$ (kN)	V_{Rk1} (kN) NBR 6118	$\frac{V_{u,exp,med}}{V_{Rk1}}$ (NBR 6118)	V_{Rk1} (kN) NBR 14861	$\frac{V_{u,exp,med}}{V_{Rk1}}$ (NBR 14861)
LA001-B	253,91	162,80	1,56	162,80	1,56
LA002-B	287,39	313,24	0,92	221,19	1,30
LA003-B	299,28	382,58	0,78	250,39	1,20

QUADRO 16 – VALORES MÉDIOS DO ESFORÇO CORTANTE PARA LAJES COM CAPA.
FONTE: A autora (2012).

Comparando-se os valores do esforço cortante último experimental médio apresentados no Quadro 16, entre os três tipos de laje com capa, observa-se que houve um incremento de 13% para as lajes com dois alvéolos preenchidos em relação às lajes com alvéolos vazios. Para o caso das lajes com preenchimento de três alvéolos, o incremento foi de 17,9% em relação às lajes sem preenchimento.

O resultado parece coerente, mas vale lembrar que uma laje LA002-B-3 teve sua carga de ruptura bem menor do que das demais lajes do mesmo tipo, provavelmente devido ao fato desta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta e a armadura ativa já ter atingido o escoamento naquela região.

Descartando-se o valor da LA002-B-3 e fazendo-se a média do esforço cortante último experimental apenas para as outras duas lajes, LA002-B-1 e LA002-B-2, o valor encontrado é de 320 kN que é 26% maior do que o valor para as lajes com capa e sem preenchimento de alvéolos.

E assim confirma-se a informação de que para as lajes com capa a recomendação da NBR 14861:2011 para que seja limitado em dois o número de alvéolos preenchidos também é coerente com o comportamento das lajes na prática.

A relação $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ para V_{Rk1} calculado de acordo com a NBR 6118 é maior do que 1,00 apenas para as lajes com capa sem preenchimento de alvéolos, e para a média do esforço cortante último experimental dos dois primeiros ensaios de lajes com capa e com preenchimento de dois alvéolos, descartando-se o valor da terceira laje que rompeu precocemente.

Entretanto, de acordo com o anexo A2:2009 da EN 1168:2005, a proporção $(R_{\text{test}}/R_{\text{calc}})_{\text{med}} = V_{u,\text{exp,med}}/V_{\text{RK1}}$ deve ser maior ou igual a 1,00 para a média de três ensaios. Sendo assim, com V_{RK1} calculado conforme a NBR 6118, foi atendida esta condição apenas para as lajes com capa e sem preenchimento de alvéolos.

A proporção $(R_{\text{test}}/R_{\text{calc}})_{\text{med}} = V_{u,\text{exp,med}}/V_{\text{RK1}} \geq 1,00$ para a média de três ensaios, com V_{RK1} calculado conforme a NBR 14861, foi atendida para todas as lajes com capa, com e sem preenchimento de alvéolos. Portanto, todas as lajes com capa foram aprovadas para a segunda condição estabelecida pelo anexo A2:2009 da EN 1168:2005 e a confiabilidade do modelo teórico apresentado na NBR 14861:2011 foi confirmada, desde que seja feita a correção desta norma eliminando o coeficiente α do cálculo da tensão $\sigma_{\text{cp},2}$.

Comparando-se os valores do esforço cortante último experimental médio entre lajes sem capa e lajes com capa, observou-se que para as lajes sem preenchimento de alvéolos houve um aumento de 25,9% na resistência, para as lajes com preenchimento de dois alvéolos houve uma redução de 5,6% na resistência e para as lajes com preenchimento de três alvéolos houve um aumento de 5% na resistência.

A redução no valor do esforço cortante último experimental médio ocorreu porque uma laje LA002-B-3 teve sua carga de ruptura bem menor do que das demais lajes do mesmo tipo, provavelmente devido ao fato desta laje já ter sido ensaiada anteriormente na extremidade oposta e a armadura ativa já ter atingido o escoamento naquela região.

Descartando-se o valor da LA002-B-3 e fazendo-se a média do esforço cortante último experimental apenas para as outras duas lajes, LA002-B-1 e LA002-B-2, o valor encontrado é de 320 kN que é 5,1% maior do que o valor médio para as lajes sem capa e com preenchimento de dois alvéolos.

A Figura 46 apresenta as relações $V_{u,\text{exp,med}}/V_{\text{RK1}}$, entre os valores do esforço cortante último experimental médio ($V_{u,\text{exp,med}}$) obtido nos ensaios das lajes com e sem capa e os valores teóricos do esforço cortante resistente V_{RK1} calculados conforme a NBR 6118:2003.

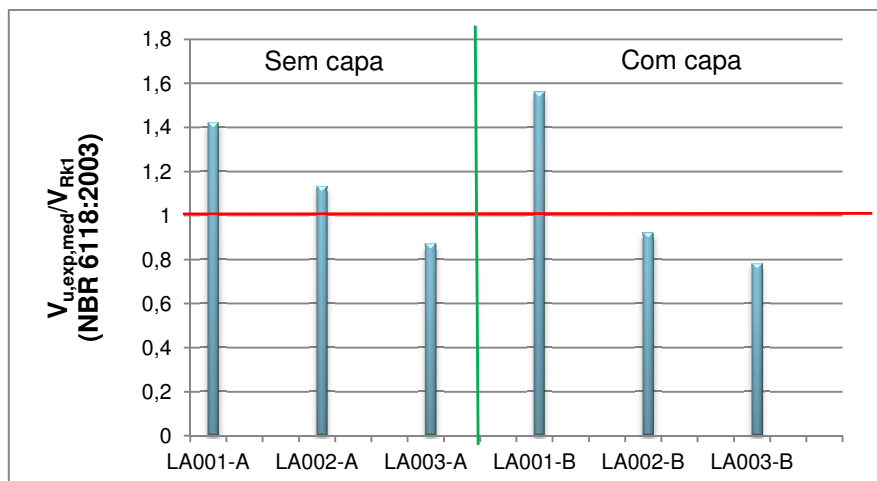


FIGURA 46 - RELAÇÕES $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ PARA LAJES COM E SEM CAPA COM V_{Rk1} CALCULADO PELA NBR 6118:2003.

FONTE: A autora (2012).

A Figura 47 apresenta as relações $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$, entre os valores do esforço cortante último experimental médio ($V_{u,exp,med}$) obtido nos ensaios das lajes com e sem capa e os valores teóricos do esforço cortante resistente V_{Rk1} calculados conforme a NBR 14861:2011.

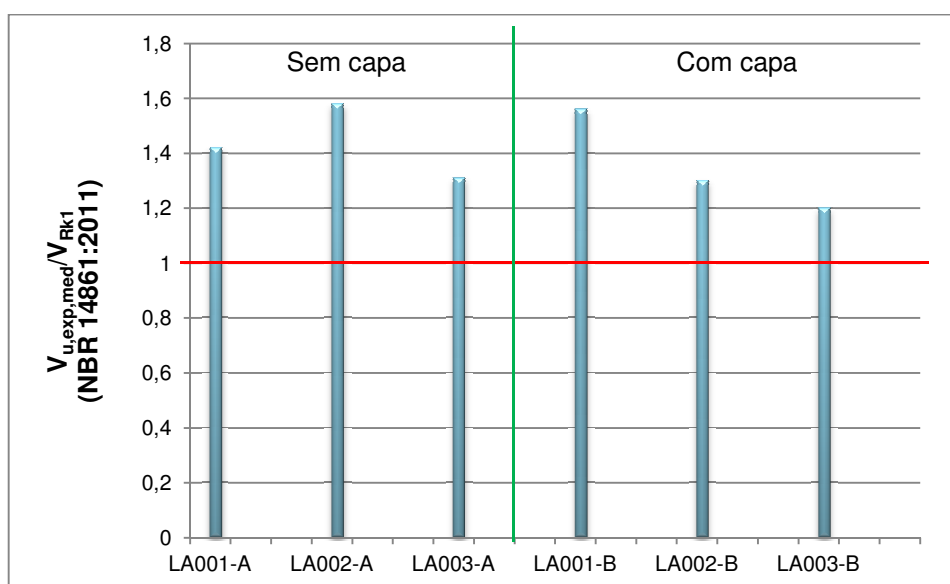


FIGURA 47 - RELAÇÕES $V_{u,exp,med}/V_{Rk1}$ PARA LAJES COM E SEM CAPA COM V_{Rk1} CALCULADO PELA NBR 14861:2011.




FONTE: A autora (2012).




4.7.4 Análise da fissuração e mecanismos de ruptura para as lajes alveolares ensaiadas

O Quadro 17 apresenta as fissuras típicas que surgiram durante os ensaios e a identificação dos mecanismos de ruptura associados a cada tipo de fissura.

De acordo com Catoia (2011), com a aplicação da força a 2,5 h do apoio, o mecanismo de cisalhamento tende a ocorrer em região fissurada à flexão.

Portanto, deveria ocorrer um maior número de lajes com fissura do tipo f do Quadro 17, ou seja, uma fissura de flexão se une à fissura de cisalhamento reduzindo a capacidade resistente da laje com a sobreposição dos dois mecanismos de ruptura.

Foto das fissuras	Descrição	Mecanismo de Ruptura
 <p>(a)</p>	Fissura junto à cordoalha e afundamento da mesma	Falha da ancoragem (escorregamento da armadura ativa)
 <p>(b)</p>	Fissura inclinada em um ângulo variando entre 30 a 50° partindo do apoio e atingindo a parte superior da laje mudando para horizontal	Falha da nervura por tração gerada pelo cisalhamento na região com espessura mínima entre os alvéolos e esmagamento do concreto na mesa superior.
 <p>(c)</p>	Fissura no flange de concreto localizado na parte superior do alvéolo	Falha do flange por tração

 <p>(d)</p>	<p>Fissura de flexão embaixo da região de aplicação da carga</p>	<p>Flexão na borda inferior</p>
 <p>(e)</p>	<p>Fissuras junto às cordoalhas se unindo com as fissuras inclinadas nas nervuras</p>	<p>Falha da nervura por tração gerada pelo cisalhamento na região com espessura mínima entre os alvéolos, falha da ancoragem (escorregamento da armadura ativa) e esmagamento do concreto na mesa superior.</p>
 <p>(f)</p>	<p>Fissura na parte inferior se unindo à fissura inclinada na nervura e à fissura na altura da cordoalha</p>	<p>Flexão na parte inferior aliada a falha da nervura por tração devido ao cisalhamento e fissura devido ao escorregamento da armadura ativa.</p>

QUADRO 17 – FISSURAS TÍPICAS DAS LAJES NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO E MECANISMOS DE RUPTURA ASSOCIADOS.

FONTE: A autora (2012).

Mas no caso dos ensaios com lajes de espessura 26,5cm realizados para esta pesquisa, a maioria das lajes apresentou fissuras dos tipos a, b e e (Quadro 17). Isso significa que a ruptura em geral ocorreu por falha na nervura por tração devido ao cisalhamento e falha de ancoragem (escorregamento das cordoalhas).

O fato destas lajes serem relativamente altas e o vão ser curto influenciou nestes mecanismos, pois quanto mais altas e mais curtas as lajes, maior é a tendência das mesmas se romperem por cisalhamento ao invés de flexão. Foi observada a ruptura frágil na maioria dos elementos ensaiados.

5 MODELOS DE BIELAS E TIRANTES DAS LAJES ALVEOLARES SUBMETIDAS A ENSAIOS DE CISALHAMENTO

5.1 DEFINIÇÃO DO MODELO ADOTADO PARA AS LAJES ENSAIADAS

Baseando-se nas informações levantadas na revisão bibliográfica sobre lajes alveolares e modelos de bielas e tirantes e com os resultados dos ensaios de cisalhamento em lajes alveolares realizados definiram-se as cargas aplicadas, a força de protensão e as principais dimensões geométricas dos modelos de bielas e tirantes.

Após cada ensaio foram medidas as dimensões da fissura na região da nervura da laje alveolar, especificamente a fissura que surgiu devido ao cisalhamento na nervura, conforme a fissura do tipo 1 ilustrada por Catoia (2011) e reproduzida na Figura 48 a seguir.

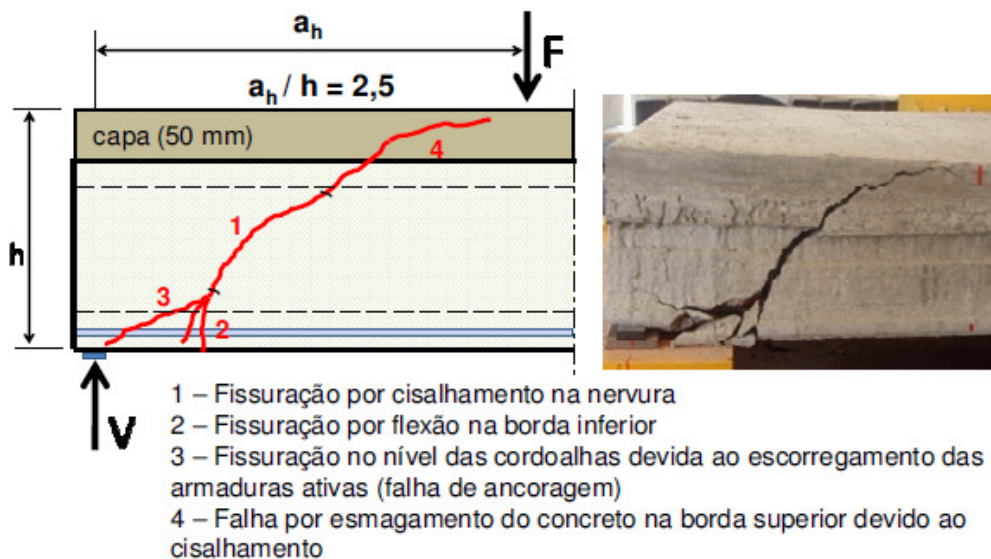


FIGURA 48 – MECANISMOS DE COMPORTAMENTO PARA LAJES COM CAPA.
 FONTE: CATOIA (2011).

O ângulo θ entre esta fissura e a cordoalha é o ângulo θ entre a primeira biela comprimida junto ao apoio da laje alveolar e o banzo inferior do modelo de treliça. Através do ângulo θ , calculou-se o ângulo β entre o tirante tracionado e o banzo inferior, e assim foi possível calcular as distâncias entre os nós da treliça.

$$\beta = 90^\circ - \theta \quad (34)$$

Devido à existência de um coeficiente nomeado como α na NBR 14861:2011 e que foi muito citado nesta dissertação, alterou-se a notação comumente utilizada pela bibliografia para o ângulo entre o tirante tracionado e o banzo inferior para β .

A Figura 49 ilustra a fissura de cisalhamento na nervura de uma laje alveolar e a representação das bielas e do banzo superior comprimidos em azul e dos tirantes e banzo inferior tracionados em vermelho.

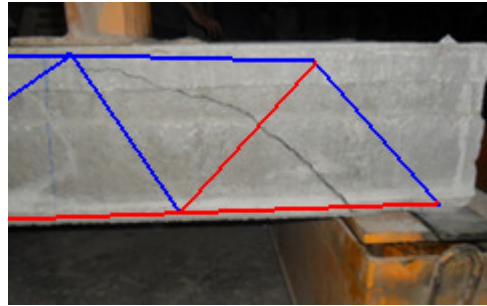


FIGURA 49 – REPRESENTAÇÃO DAS BIELAS, TIRANTES E BANZOS DO MODELO DE TRELIÇA POSICIONADOS EM RELAÇÃO À FISSURA DE CISALHAMENTO NA NERVURA DA LAJE ALVEOLAR.

FONTE: A autora (2012).

Através da Figura 49 é possível perceber que a fissura de cisalhamento na nervura é localizada entre duas bielas comprimidas e é perpendicular ao tirante de concreto tracionado. Esta fissura surge justamente devido à força de tração no tirante na região de menor espessura da nervura.

Determinou-se que o ponto de aplicação da carga no ensaio, localizado a 61cm do eixo do apoio da laje, seria o segundo nó no banzo superior da treliça. Na Figura 49 este segundo nó está representado logo abaixo da viga metálica de transferência de carga. O ângulo da biela que chega neste nó foi denominado como θ_2 . Convencionou-se que todas as demais bielas da treliça fossem paralelas a esta, tendo o ângulo de inclinação θ_2 e os tirantes tivessem o ângulo β_2 , exceto na região central da treliça que teriam as inclinações necessárias para fechar o comprimento da treliça, que é o comprimento da laje menos 10cm de apoio, ou seja, 390cm.

O peso próprio da laje foi dividido entre os dez nós superiores da treliça.

A força de protensão na data dos ensaios foi considerada como a força de protensão inicial menos 15% de perdas. Esta força foi inserida no modelo como cargas horizontais aplicadas aos nós da treliça, conforme recomendado pela bibliografia.

A força de protensão foi aplicada nos três nós localizados ao longo do comprimento de transmissão da força de protensão que foi adotado igual a 85ϕ , conforme recomenda a NBR 14861:2011, sendo ϕ o diâmetro das cordoalhas.

Considerou-se que no nó localizado na extremidade da laje a força de protensão (ou a tensão de compressão devido à força de protensão σ_p) é igual a zero e que esta cresce linearmente até o comprimento de transmissão (l_{pt}), conforme determina o Eurocode 2 (2004) e ilustra a Figura 50.

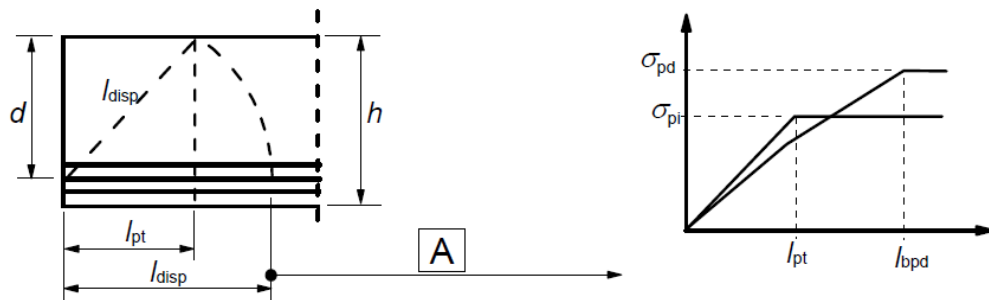


FIGURA 50 – DISTRIBUIÇÃO LINEAR DE TENSÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO ELEMENTO. FONTE: EUROCODE 2 (2004).

A Figura 51 apresenta o modelo de treliça adotado para as lajes alveolares ensaiadas.

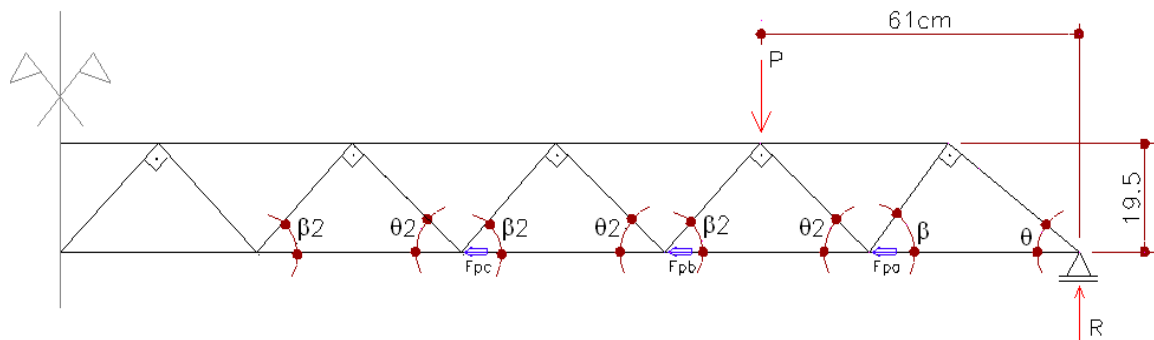


FIGURA 51 – MODELO DE TRELIÇA ADOTADO PARA AS LAJES ALVEOLARES. FONTE: A autora (2012).

A altura de 19,5cm do modelo apresentado na Figura 51 se refere a distância entre as cordoalhas, que são representadas pelo banzo inferior da treliça, e uma distância de 3,5cm da parte superior da laje, representando a posição do banzo superior. A medida de 61cm é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro do apoio da laje sobre a viga.

O ângulo θ se refere ao ângulo de inclinação da primeira biela junto ao apoio da laje, que é igual ao ângulo de inclinação das fissuras de tração devido ao

cisalhamento observadas na altura média das nervuras das lajes alveolares após os ensaios.

O ângulo β é aquele entre a reta perpendicular à biela junto ao apoio e o banzo inferior da treliça, ou seja, é o ângulo de inclinação do tirante mais tracionado do modelo.

Ainda na Figura 51, a biela formada entre o ponto de aplicação da carga e o nó do encontro do tirante mais tracionado com o banzo inferior da treliça tem o ângulo de inclinação denominado θ_2 . E o próximo tirante tem ângulo de inclinação α_2 .

As parcelas da força de protensão aplicadas em três nós ao longo do comprimento de transmissão foram denominadas de F_{pa} , F_{pb} e F_{pc} , conforme pode ser visualizado na Figura 51.

A Figura 52 apresenta a seção das lajes alveolares LP26,5 e a representação dos tirantes na região hachurada, mostrando também a seção do tirante equivalente para a largura de uma laje, considerando-se o ponto mais crítico, ou seja, a largura mínima de todas as nervuras.

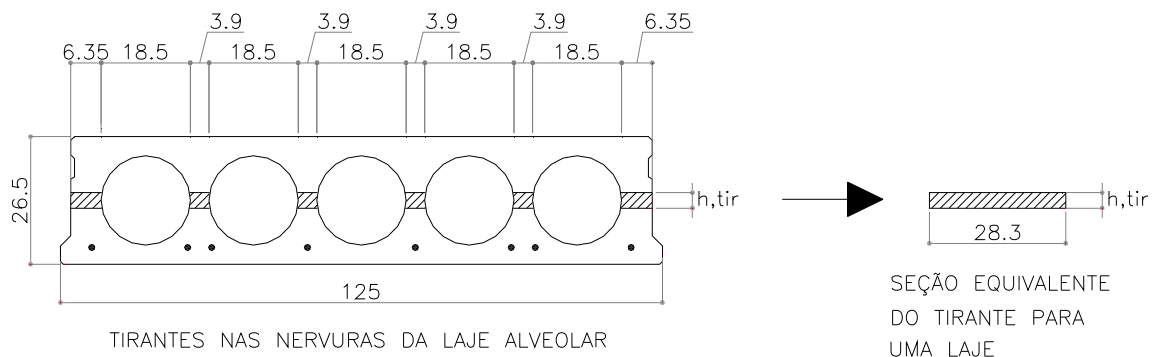


FIGURA 52 – REPRESENTAÇÃO DO TIRANTE DE CONCRETO NA REGIÃO DA NERVURA NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA LAJE ALVEOLAR E TIRANTE EQUIVALENTE PARA UMA LAJE LP26,5 DE 125CM, CONSIDERANDO-SE A LARGURA MÍNIMA DAS NERVURAS.

FONTE: A autora (2012).

Utilizou-se como ferramenta para cálculo das forças nas bielas e tirantes o programa computacional CAST (*Computer Aided Strut-and-Tie*) desenvolvido pelos pesquisadores Tjen Tjhin e Daniel Kuchma da Universidade de Illinois at Urbana-Champaign nos Estados Unidos da América especificamente para cálculo de estruturas de concreto simples, armado ou protendido, utilizando os princípios do

modelo de bielas e tirantes. Este programa está disponível gratuitamente na internet e foi utilizada a versão 0.9.11 atualizada em 26/01/2004.

O programa computacional CAST ainda não disponibiliza nesta versão as opções para modelagem com tirantes de concreto e forças de protensão. Por isso utilizou-se esta ferramenta somente para cálculo das forças nas bielas e tirantes e as tensões foram verificadas manualmente.

5.2 MODELO DE BIELAS E TIRANTES PARA AS LAJES LA001-A

O ângulo θ médio obtido para as fissuras de cisalhamento nas nervuras lajes lajes LA001-A foi de aproximadamente 38° .

Portanto o ângulo β a ser adotado no modelo para estas lajes é de 52° .

A carga aplicada média entre os três ensaios nas LA001-A foi de 229,20 kN.

Com estas informações e seguindo os padrões definidos no item 5.1, desenhou-se o modelo de treliça para a LA001-A no programa CAST, conforme as Figuras 53 e 54.

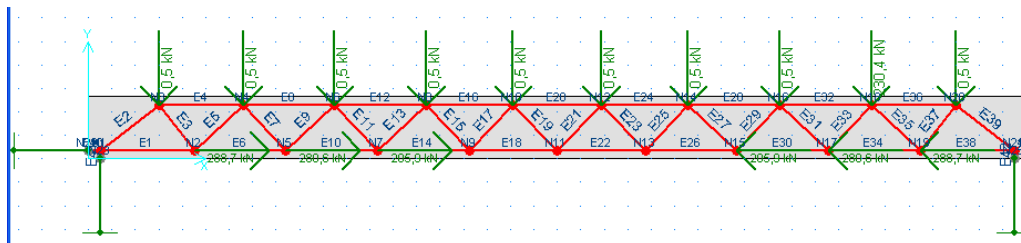


FIGURA 53 – MODELO DE TRELIÇA DAS LA001-A FEITO NO PROGRAMA CAST.
FONTE: A autora (2012), gerado no programa CAST.

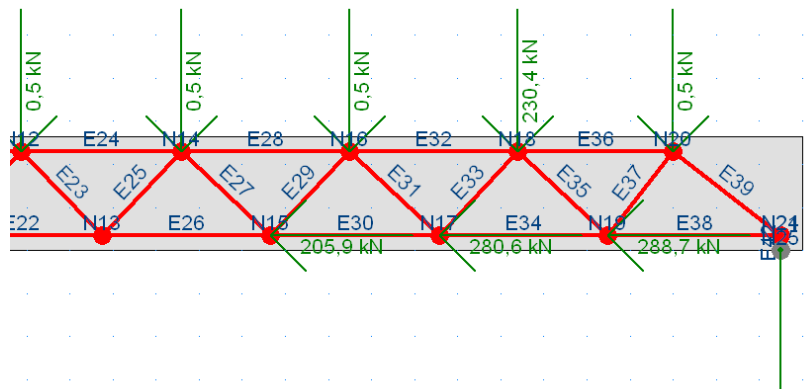


FIGURA 54 – MODELO DE BIELAS E TIRANTES NA REGIÃO DO APOIO NO LADO QUE FOI APLICADA A CARGA NOS ENSAIOS DAS LA001-A.
FONTE: A autora (2012), gerado no programa CAST.

A Figura 55 apresenta os modelos de bielas e tirantes na região do apoio das lajes LA001-A após o processamento do modelo e cálculo das forças nas barras da treliça no programa CAST.

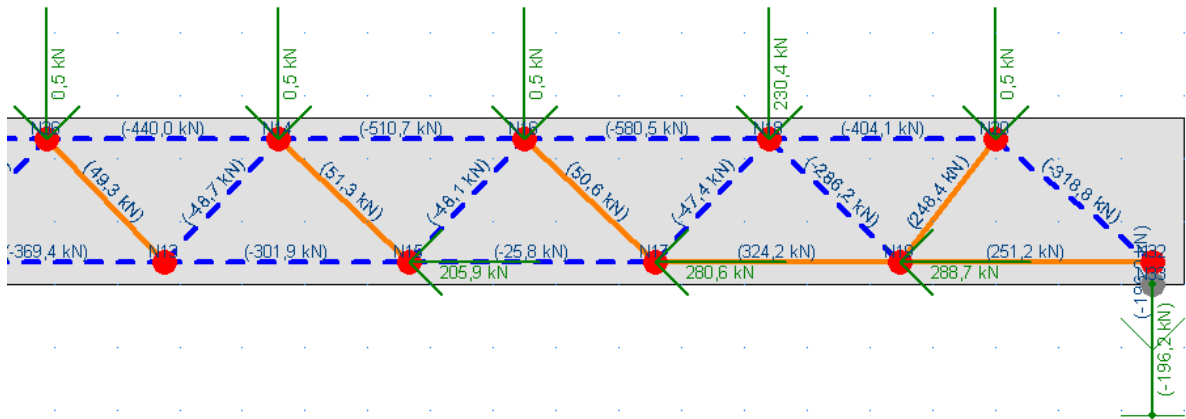


FIGURA 55 - MODELOS DE BIELAS E TIRANTES NA REGIÃO DO APOIO DAS LAJES LA001-A E FORÇAS NAS BARRAS DA TRELIÇA APÓS O PROCESSAMENTO NO CAST.
FONTE: A autora (2012), gerado no programa CAST.

Analisando-se a Figura 55 com o resultado do processamento no programa computacional CAST, confirma-se que a primeira biela junto ao apoio está comprimida (representação em linha tracejada azul e valor da força com sinal negativo) e perpendicularmente à fissura de cisalhamento na região da nervura encontra-se o tirante de concreto tracionado (representação em linha contínua alaranjada e valor da força com sinal positivo).

As duas bielas representadas abaixo do ponto de aplicação da carga durante os ensaios estão comprimidas.

O banzo superior está comprimido como era esperado.

Na região do início do comprimento de transmissão da força de protensão, próximo à extremidade da laje alveolar, o banzo inferior está tracionado. Logo após o terceiro nó do banzo inferior, antes do término do comprimento de transmissão da força de protensão, o banzo inferior passa a estar comprimido em função da força de protensão.

Com o valor da força de tração no tirante de concreto perpendicular à fissura de cisalhamento na nervura, o valor da resistência característica inferior à tração do concreto calculado conforme a NBR 6118:2003 e a soma das larguras das nervuras

da laje alveolar, é possível calcular a espessura do tirante de concreto (h_{tir}), conforme segue.

$$F_{tir} = 248,40 \text{ kN (força de tração no tirante de concreto)}$$

$$f_{ctk,inf} = 2,716 \text{ MPa (resistência característica inferior à tração do concreto)}$$

$$b_{w,tir} = 28,3 \text{ cm (soma das larguras das nervuras da laje alveolar)}$$

$$A_{tir} = \frac{F_{tir}}{f_{ctk,inf}} = \frac{248,40 \text{ kN}}{2,716 \text{ MPa}} = \frac{24840 \text{ kgf}}{27,16 \text{ kgf/cm}^2} = 914,58 \text{ cm}^2 \quad (35)$$

(área da seção do tirante)

$$h_{tir} = \frac{A_{tir}}{b_{wtir}} = \frac{914,58}{28,3} = 32,32 \text{ cm (espessura do tirante de concreto)} \quad (36)$$

Como o valor calculado para a espessura do tirante é maior do que a altura da laje alveolar, conclui-se que um dos seguintes fatores pode estar interferindo na resistência à tração do concreto na região da nervura da laje alveolar:

- a) Uma largura maior que a mínima está contribuindo com a resistência à tração da nervura;
- b) A resistência à tração real do concreto é maior do que o valor calculado conforme a NBR 6118:2003;
- c) A força de protensão esteja contribuindo mais para a resistência ao cisalhamento da laje alveolar do que o considerado no modelo de bielas e tirantes;
- d) Outros mecanismos estejam contribuindo para a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares, como por exemplo, o intertravamento entre os agregados.

Considerando-se a suposição a, calculou-se a largura média das nervuras da laje alveolar $b_{w,med}$, ao longo da altura de 18,5cm do alvéolo e a espessura do tirante de concreto para esta largura, conforme segue.

$$b_{w,med} = \frac{28,3+120,4}{2} = 74,35 \text{ cm} \quad (37)$$

$$h_{tir} = \frac{A_{tir}}{b_{wtir}} = \frac{914,58}{74,35} = 12,30 \text{ cm (espessura do tirante de concreto)} \quad (38)$$

Este resultado obtido para a espessura do tirante, considerando-se a largura média das nervuras ao longo da altura dos alvéolos, é coerente e, portanto, conclui-se que a tensão de tração está se distribuindo ao longo da altura do alvéolo pela espessura de 12,3cm.

Os modelos de bielas e tirantes para as lajes LA002-A, LA003-A, LA001-B, LA002-B e LA003-B não foram desenvolvidos neste trabalho, pois devem seguir a mesma lógica realizada para a laje LA001-A.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta dissertação de mestrado foi estudar o comportamento das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento. Este objetivo foi atingido para um tipo específico de lajes alveolares com espessura de 26,5cm e alvéolos circulares.

Sabe-se que a espessura da laje e o formato dos alvéolos influenciam no seu comportamento à ruptura, portanto recomenda-se que em trabalhos futuros sejam estudadas lajes com espessuras maiores (32, 40 e 50cm) que também tem sido produzidas no Brasil.

Uma das propostas desta pesquisa era verificar a eficácia do preenchimento dos alvéolos executado após a liberação da força de protensão e concretados juntamente com a capa. Foram feitas aberturas na parte superior dos alvéolos durante a produção para facilitar a entrada do concreto da capa, da maneira como a empresa patrocinadora desta pesquisa costuma fazer na prática. Procurou-se simular a concretagem dos alvéolos e da capa na obra em apenas uma etapa. Mesmo com certa falta de aderência entre o concreto do preenchimento e da laje pré-fabricada observada em algumas peças, houve um acréscimo nos valores de esforço cortante experimental em relação às lajes sem preenchimento de alvéolos. Observou-se também que em algumas lajes houve uma fissura contínua entre a laje pré-fabricada e o concreto do preenchimento, mostrando que os dois concretos trabalharam em conjunto.

Desde que sejam feitas as correções nos itens 7.3.2.8.1 e 7.3.2.8.2 da NBR 14861:2011, eliminando o coeficiente α do cálculo da tensão $\sigma_{cp,1}$ e $\sigma_{cp,2}$, conforme apresentado no item 4.6 desta dissertação, a confiabilidade do modelo teórico apresentado na NBR 14861:2011 foi confirmada, de acordo com as duas condições apresentadas no Anexo A2:2009 da norma europeia EN 1168:2011:

- $R_{test}/R_{calc} \geq 0,95$ para cada ensaio
- Proporção $(R_{test}/R_{calc})_{med} \geq 1,00$ para a média de três ensaios.

Isso significa que os coeficientes de redução da resistência da parcela referente ao preenchimento dos alvéolos propostos na NBR 14861:2011 estão de acordo com os valores experimentais.

A recomendação apresentada no item 7.3.2.7 da NBR 14861:2011, de limitar a quantidade de alvéolos preenchidos em no máximo dois, é válida para as lajes de 26,5cm de espessura ensaiadas nesta pesquisa. Em várias amostras com preenchimento de três alvéolos a resistência experimental foi inferior às amostras com preenchimento de apenas dois alvéolos. O preenchimento de alvéolos alternados apresentou resultados satisfatórios o que não ocorreu no caso do preenchimento de três alvéolos adjacentes.

Diversas lajes com dois alvéolos preenchidos fissuraram nos alvéolos e nervuras externas e central que não foram preenchidos. Nas lajes com três alvéolos preenchidos os alvéolos externos se mantiveram como ponto fraco da seção. Provavelmente devido à existência destes pontos fracos com mesma espessura de concreto na parte superior do alvéolo e na nervura da laje com dois alvéolos preenchidos que várias peças com três alvéolos preenchidos resistiram igual ou menos do que as lajes com três alvéolos preenchidos.

Confirmou-se através da análise dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa que os valores de força cortante resistente para lajes com alvéolos preenchidos calculados através da NBR 14861:2011 se aproximam mais dos valores experimentais do que os valores calculados através da NBR 6118:2003. Confirmou-se também a inadequação da utilização da equação apresentada no item 19.4.1 – Lajes sem armadura para força cortante, da NBR 6118:2003, para o caso de alvéolos preenchidos. A falha na utilização desta equação para estes casos está no fato de se aumentar a área de concreto da seção transversal e a largura b_w considerando-se que a seção funcionará como um material único. Devido à dificuldade de aderência entre o concreto da laje pré-fabricada com o concreto dos alvéolos e devido à diferença entre os módulos de elasticidade destes concretos, o cálculo correto está apresentado na norma específica sobre lajes alveolares. Ressalta-se que para lajes sem preenchimento de alvéolos o cálculo da resistência à força cortante pela NBR 14861:2011 é idêntico ao cálculo para lajes sem armadura para força cortante apresentado na NBR 6118:2003 e mostra-se adequado em relação aos resultados práticos.

A partir destas conclusões surge a questão: “E quanto aos milhares de metros quadrados de lajes alveolares existentes com preenchimento de alvéolos e que não foram dimensionados conforme a NBR 14861:2011?”

Conforme palavras do Eng^o Alio Ernesto Kimura em seu curso “Pilares de Concreto Armado”, “segurança é algo imponderável”. O que é seguro para mim pode não ser seguro para outra pessoa.

O engenheiro estrutural tem certa liberdade de estabelecer critérios de segurança conforme a sua experiência e seu conhecimento sobre determinado tipo de estrutura. Entretanto, seguindo as recomendações normativas, o profissional sempre estará amparado pela lei.

As comissões que revisam as normas técnicas buscam equações que resultem em valores mais próximos do comportamento real das estruturas. Foi o que aconteceu no caso da NBR 14861 no item que trata da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares com alvéolos preenchidos. Conseguiu-se uma equação que representa melhor o comportamento real das lajes ao cisalhamento, mas isso não significa que as lajes existentes terão problemas estruturais. O maior ganho neste caso é deixar de concretar alvéolos que não contribuirão para a resistência das lajes adotando a solução técnica correta que realmente irá melhorar o comportamento da estrutura.

Verificou-se uma boa aderência entre a capa de concreto e as lajes alveolares. Houve apenas uma pequena fissura entre a capa e a laje em um dos ensaios com ocorrência da ruptura por cisalhamento logo em seguida, mas esta laje já estava com um valor de carga elevada e concluiu-se que a ruptura não ocorreu devido à falta de aderência entre laje e capa. Portanto, o sistema que a empresa fabricante das lajes adota para proporcionar rugosidade na superfície da laje e melhorar assim a aderência com a capa é eficaz. Com o acréscimo da capa de 5cm de espessura de concreto com resistência à compressão de 51,1MPa e armada com tela soldada tipo Q138, obteve-se um aumento de 25,9% na resistência das lajes sem preenchimento de alvéolos e de 5% na resistência das lajes com preenchimento de dois e três alvéolos.

Nesta pesquisa, o terceiro ensaio para todas as lajes teve que ser feito com uma mesma peça que havia sido ensaiada anteriormente, pois ocorreu um erro na quantidade de lajes solicitadas em projeto. O erro foi percebido somente quando a

execução dos ensaios já estava em andamento e não havia tempo hábil para produzir e concretar alvéolos e capa de mais lajes. Através dos resultados dos ensaios notou-se que o terceiro ensaio na maioria dos casos teve valores de esforço cortante resistente menores que os outros dois ensaios, prejudicando a média dos resultados. Portanto, esta autora recomenda que não seja ensaiada duas vezes uma mesma laje, mesmo que a carga seja aplicada em extremidades opostas para cada ensaio.

Foi desenvolvido um modelo de treliça para um dos seis tipos de lajes ensaiadas e verificou-se que este modelo de bielas e tirantes foi adequado para representar as forças atuantes durante a ruptura das lajes alveolares.

Verificou-se que a tensão de tração nas nervuras atua ao longo de uma parte considerável da altura da laje e que pode ser adequado levar em consideração as larguras médias das nervuras ao longo de toda a altura dos alvéolos ao invés de se considerar apenas a largura mínima das nervuras colaborando com a resistência à tração dos tirantes de concreto.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Recomenda-se que em trabalhos futuros sejam estudadas e ensaiadas lajes com espessuras maiores (32, 40 e 50cm) que também tem sido produzidas no Brasil.

Uma sugestão para pesquisas futuras é estudar a influência do posicionamento dos alvéolos preenchidos na resistência ao cisalhamento, fazendo-se ensaios com diversas opções de combinação de alvéolos preenchidos, de maneira a orientar os engenheiros calculistas quanto à escolha dos alvéolos a concretar. Sugere-se que para as lajes LP26,5 sejam ensaiadas lajes com preenchimento de um alvéolo central e lajes com preenchimento dos quatro alvéolos laterais sem preencher o alvéolo central.

A nova norma NBR 14861:2011 determina que o comprimento que deve ser concretado dos alvéolos, L_{pr} , seja a soma do comprimento de transmissão da força de protensão ($l_{pt2}=85\phi$, sendo ϕ o diâmetro das cordoalhas) mais a soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante e a altura da seção transversal. Esta soma resulta em um comprimento sempre muito maior do que os valores que os calculistas costumavam utilizar até 2011. Sugere-se que seja

avaliado através de ensaios, se é necessário o preenchimento dos alvéolos por todo o comprimento de transmissão da força de protensão. No caso dos ensaios realizados para a presente dissertação, o comprimento preenchido foi de 80cm que é menor que o comprimento de transmissão ($l_{pt2}=85\phi=107,95\text{cm}$) e os resultados obtidos foram satisfatórios. Mas não se sabe o que ocorreria no caso da carga ser aplicada em uma posição fora do comprimento de preenchimento e dentro do comprimento de transmissão, por exemplo.

Devido à escassez de prazo para finalizar esta pesquisa, não foi possível finalizar os modelos de bielas e tirantes para as lajes LA002-A, LA003-A, LA001-B, LA002-B E LA003-B. Esta autora pretende finalizar estes modelos e publicar em artigo futuro e sugere que outros pesquisadores aprofundem a ideia, desenvolvendo modelos para outras espessuras de lajes e configurações de preenchimento de alvéolos e capa.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6118: 2003 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 14861:2011 – Lajes Alveolares de Concreto Protendido – Requisitos e Procedimentos.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 9062:2006 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado.**

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS – ASSAP – **Manual ASSAP - The hollow core floor – Design and applications.** Verona, Italy, 2002.

CANADIAN PRESTRESSED PRECAST CONCRETE STRUCTURES – CPCI. Prestressed concrete in Canada. A short history – 1952 to 2000. Disponível em: <www.cpci.ca/?sc=history&pn=prestressedincanada>. Acesso em 18 de maio de 2010.

CATOIA, B. Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão. Tese de Doutorado, EESC-USP, 2011.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB-FIP – Model Code, 1990.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1168:2005 – Precast concrete products – Hollow core slabs.** (English version) Brussels: CEN, 2005.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1192:2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.** (English version) Brussels: CEN, 2004.

COSTA. O. O. Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. Dissertação de Mestrado, UFSCar, 2009.

COSTA. O. O., CARVALHO, R.C., ALMEIDA FILHO, F. M. e FERREIRA, M. A. Avaliação experimental de lajes alveolares em concreto protendido. **Concreto & Construções**, IBRACON, Ano XXXIX, nº 64, pág. 71 à 77, Out-Nov-Dez-2011.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC-USP, 2000.

ELEMATIC – Extruder E9 – Product Description. Disponível em: <http://www.precastfountain.com/precast_machinery/extruder-1>. Acesso em 18 de junho de 2011.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE – FIP. Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab floors. London, England, 1992.

FERREIRA, M. A., FERNANDES, N. S., CARVALHO, R.C., ORTENZI, A., DONIAK, I. L. O. e LIVI, L. O. B. Resistência de lajes alveolares pré-fabricadas ao cisalhamento. **Téchne**. Revista de Tecnologia da Construção, v. 132, p. 62-66, 2008.

GIRHAMMAR, U.A.; PAJARI, M. Tests and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units and concrete topping. **Construction and Building Materials**, Vol. 22, pág. 1708-1722, 2008.

JOHN, V.M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Reciclar para construir. PCC-Poli USP. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm>. Acesso em: 06 abril 2010.

JUNG, S.; KIM K.S. Knowledge-based prediction of shear strength of concrete beams without shear reinforcement. **Engineering Structures**, Volume 30, Issue 6, p. 1515-1525, jun. 2008.

KUO, W.W., CHENG, T. J. e HWANG, S. J. Force Transfer Mechanism and shear strength of reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, p. 1-10, 2010.

KIMURA, A. E. Pilares de Concreto Armado. Apostila do Curso. São Paulo, 2012.

LACERDA, I. G. Diretrizes para a reutilização de ancoragem ativa em lajes de edificações verticais de múltiplo uso e/ou pisos industriais protendidos. Dissertação de mestrado, PPGCC, UFPR, 2007.

MARTI, P. Application of Plastic Analysis to Shear Design of Reinforced Concrete Members. Lecture notes for a visit to Japan, sponsored by the Building Research Institute, Ministry of Constructions, Japan, 1987.

MELO, C. E. E. **Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto**. São Paulo: Pini, 2004.

PETRUCELLI, N.S. Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas. Dissertação de Mestrado, UFSCar, 2009.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI) **Manual for the design of hollow core slabs**. Second Edition, Chicago, Illinois, 1998.

RIBEIRO, J. L. D e CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Série Monográfica Qualidade, Porto Alegre, 2003.

ROBSON, C. **Real World Research**. 2nd Ed. Blackwell Publishing, 2002.

SANTOS, D. Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes. Dissertação de mestrado, EESC-USP, 2006.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. Toward a consistent design of structural concrete. PCI Journal, v.32, n.3, p.74-150, May-June, 1987.

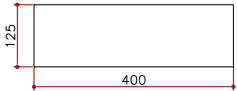
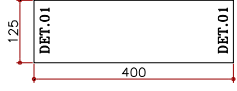
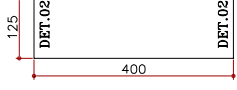
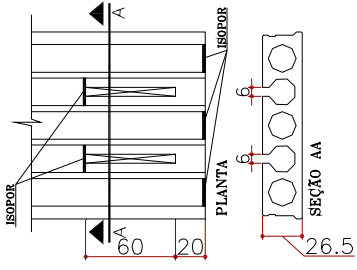
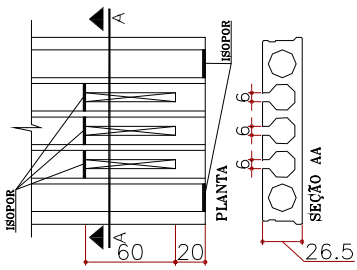
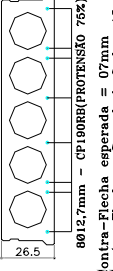
SILVA, R.C. e GIONGO, J.S. **Modelos de Bielas e Tirantes Aplicados a Estruturas de Concreto Armado**. São Carlos: EESC-USP, 2000.

VERÍSSIMO, G. S. e KLÉOS M. LENZ, C. J. **Concreto Protendido – Fundamentos Básicos**. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, 4ª edição, novembro de 1998.

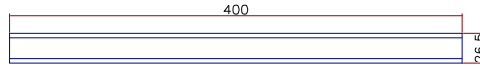
WANG, G. L.; MENG, S. P. Modified strut-and-tie model for prestressed concrete deep beams. **Engineering Structures**, p. 3489-3496, 2008.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2ª Ed. Porto Alegre : Bookman, 2001.

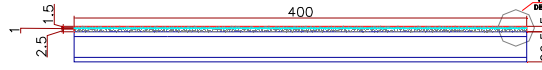
ANEXO A – PROJETOS PARA FABRICAÇÃO, CAPEAMENTO E CONCRETAGEM DOS ALVÉOLOS DAS LAJES

<p>LA001-LP26.5(04x) VOL.0,750m³(1.838ton)</p> 	<p>LA002-LP26.5(04x) VOL.0,750m³(1.838ton)</p> 	<p>LA003-LP26.5(04x) VOL.0,750m³(1.838ton)</p> 					
<p>DETALHE 01</p> 				<p>DETALHE 02</p> 			
<p>OBS.: - C/c de concreto = 30MPa; - C/c de aço = 50MPa; - Cobrimento mínimo da armadura = 2,5cm; - fator $s/f_c < 0,46$ - Para fabricação das peças para manuseio e transporte ver procedimento PS-QUA-001. - Para pontos de apoio para armazenamento das peças no pátio de transporte ver procedimento PS-QUA-002. - Para tolerâncias dimensionais dos elementos prefabricados, ver procedimento sistêmico PS-QUA-003. - Para largura das lajes com largura menor do que 125cm, as peças deverão ser içadas com cinta, corrente ou cabo de aço, evitando a utilização de guarni, de armar e superfície da laje para aderência da capa. TAMPAR ALVÉOLOS: SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input checked="" type="checkbox"/> </p>				<p>ARMADURA PARA AS LAJES LP26.5</p>  <p>8Ø12,7mm - CP190RH(PROTENSÃO 75%) Contra-Flecha esperada = 07mm Contra-Flecha máx. admissível = 13mm</p>			
<p>RETIRAR O CONCRETO</p>				<p>REVISÃO</p>			
<p>CONTRATANTE: ALESSANDRA</p>				<p>ENGENHEIRO: ALESSANDRA</p>			
<p>DATA: 05/12/11</p>				<p>DESENHO: Thisis</p>			
<p>ESCALA: 1/75</p>				<p>PRONCHIA: 4734-E01A</p>			
<p>REFERÊNCIA: FORMA E ARMADURA DE LP26.5</p>				<p>LIBERADO PARA PRODUÇÃO</p>			
<p>OBRA/LOCAL: LAJES PARA ENSAIOS</p>				<p>Thesis</p>			
<p>05/12/11</p>				<p>05/12/11</p>			
<p>ALESSANDRA</p>				<p>ALESSANDRA</p>			

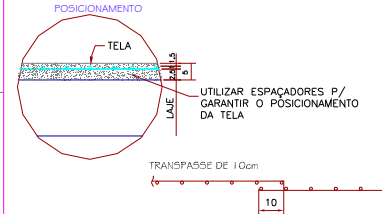
TIPO A - LA001-(02x) - DEVERÃO SER DEIXADOS SEM CAPA



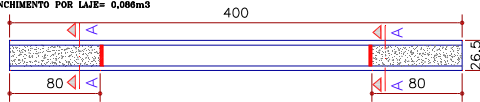
TIPO B - LA001-(02x) - TELA TIPO Q196- CAPA CONCRETO fck=30MPa
VOLUME DA CAPA POR LAJE= 0,25m³



DET.01



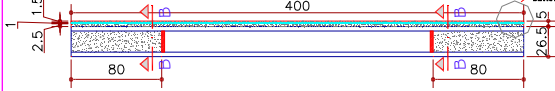
TIPO A - LA002-(02x) - DEVERÃO SER DEIXADOS SEM CAPA
VOLUME DO ENCHIMENTO POR LAJE= 0,086m³



OBS.:
PREENCHER 2 ALVÉOLOS COM CONCRETO fck=30MPa POR 80cm.



TIPO B - LA002-(02x) - TELA TIPO Q196- CAPA CONCRETO fck=30MPa

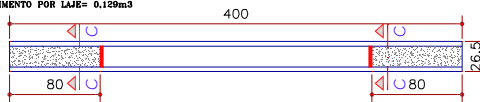


OBS.:
PREENCHER 2 ALVÉOLOS COM CONCRETO POR 80 CM JUNTAMENTE COM A CONCRETAGEM DO CAPEAMENTO



VOLUME (m³)	
CAPA	0,25
ENCHIMENTO	0,086
TOTAL POR LAJE	0,336

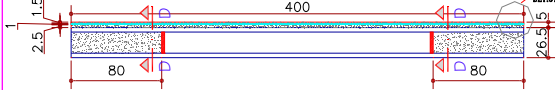
TIPO A - LA003-(02x) - DEVERÃO SER DEIXADOS SEM CAPA
VOLUME ENCHIMENTO POR LAJE= 0,129m³



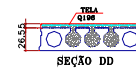
OBS.:
PREENCHER 3 ALVÉOLOS COM CONCRETO fck=30MPa POR 80cm.



TIPO B - LA003-(02x) - TELA TIPO Q196- CAPA CONCRETO fck=30MPa



OBS.:
PREENCHER 3 ALVÉOLOS COM CONCRETO POR 80 CM JUNTAMENTE COM A CONCRETAGEM DO CAPEAMENTO



VOLUME (m³)	
CAPA	0,25
ENCHIMENTO	0,129
TOTAL POR LAJE	0,379

RESUMO DO VOLUME-CONCRETO fck=30MPa				
LAJE	CAPA	ENCHIMENTO	QUANTIDADE	TOTAL
LA001-A	-	-	2x	0,000
LA001-B	0,25	-	2x	0,500
LA002-A	-	0,086	2x	0,172
LA002-B	0,25	0,086	2x	0,672
LA003-A	-	0,129	2x	0,258
LA003-B	0,25	0,129	2x	0,758
TOTAL (m³)				2,36

OBSERVAÇÕES:

- 1) Espessura do capeamento variável com a contra-flecha: e=5cm no meio do vão e e=(5cm+contra-flecha) nas extremidades.
- 2) Se necessário fator o transpasse na tela com 10cm, conforme detalhe.
- 3) Tela tipo Q196-80mm-malha 10x10cm.
- 4) Peso da tela para cada laje de 4m =16,56kgf / peso total=93,3kg.
- 5) A execução da capa e do preenchimento dos alvéolos deverá ter rigoroso controle para garantir uma perfeita aderência do concreto da capa e dos alvéolos com a laje. A superfície da laje e o interior dos alvéolos a serem concretados devem estar rigorosamente limpos (LIVRE DE PO, MANOIAS DE GRAXA, etc). E saturada (MOLHANDO DUAS HORAS ANTES DO INÍCIO DA CONCRETAGEM). Conforme item 6.3.6 e) da NBR 9062.

A LIBERADO PARA PRODUÇÃO		Thais		13/12/11		ALESSANDRA	
revisão	descrição	data	elaborado	data	resp.		
		PROJETO LAJES PARA ENSAIO		PROJETO ESTRUTURAL			
LULA CASSOL		PROJETO ALESSANDRA FRANÇA		PROJETO ALESSANDRA			
PROJETO CAPEAMENTO E ENCHIMENTO DE ALVÉOLOS		PROJETO E02A		PROJETO E02A			
PROJETO 15/12/11		PROJETO 1/76		PROJETO Thais		PROJETO 4754	

APÊNDICE A - GRÁFICOS DESLOCAMENTO VERTICAL X CARGA DAS LAJES DURANTE OS ENSAIOS

