

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE ABERTURAS E CORTES**  
**OBLÍQUOS NA RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE EM**  
**LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS**

**GREGORY LEE PINHEIRO**

São Carlos – SP  
2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE ABERTURAS E CORTES**  
**OBLÍQUOS NA RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE EM**  
**LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS**

**GREGORY LEE PINHEIRO**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Estruturas e Construção Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho (DECiv - UFSCar)

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior (FEC - UNICAMP)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

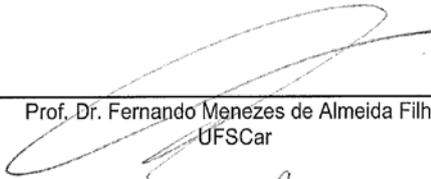
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

---

Folha de Aprovação

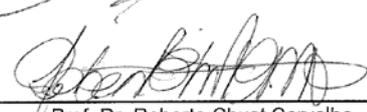
---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Gregory Lee Pinheiro, realizada em 22/02/2017:



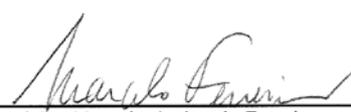
---

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho  
UFSCar



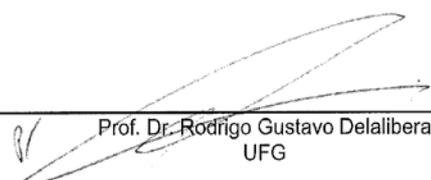
---

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho  
UFSCar



---

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira  
UFSCar



---

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera  
UFG



---

Prof. Dr. Ricardo Carrazedo  
EESC/USP

## **Agradecimentos**

À Deus e à minha família pelo suporte, apoio e incentivo.

Ao amigo, orientador e professor Fernando Almeida Filho, pela paciência, atenção, respeito, dedicação, ensinamento, ajuda e incentivo.

Ao meu amigo e co-orientador Armando Lopes Moreno Junior pelo privilégio de tê-lo como professor e por sua importante contribuição para esta pesquisa.

Ao professor e orientador da pesquisa nos Estados Unidos Arturo Ernest Schultz da *The University of Minnesota* pelo privilégio e honra de tê-lo como professor e por sua importante contribuição para a disseminação desta pesquisa ao redor do mundo.

Ao meu amigo Luis André Tomazoni por valorizar, incentivar e apoiar esta pesquisa.

À Rotesma Indústria de Pré-Fabricados de Concreto e à toda sua equipe por acreditar, compreender, valorizar, incentivar, apoiar e financiar o desenvolvimento da pesquisa, fornecendo: as lajes; o transporte; o guindaste; os materiais; as passagens aéreas e as estadias, necessários para a realização dos ensaios deste trabalho.

À Concrepav Concreteira (Grupo GNT) e à toda sua equipe por apoiar a pesquisa e gentilmente doar o concreto utilizado no capeamento dos modelos ensaiados.

À amiga Ana Cristina Pais pelo apoio e incentivo.

À toda equipe do Laboratório de Estruturas da UNICAMP, em especial aos amigos e engenheiros Marcelo Ramos e Luciano Passos pela grande e importante ajuda com os ensaios.

À equipe do NETRE-UFSCar e em especial ao professor Marcelo Ferreira pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao amigo Ricardo Canato pela ajuda com os ensaios de caracterização.

Ao amigo Eric Gonçalves pela ajuda com os ensaios das lajes.

Ao amigo Mateus Soriani da EspaFerro espaçadores pelo apoio aos ensaios.

A CAPES pela bolsa de doutorado concedida.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desta pesquisa.

## Resumo

**PINHEIRO, G. L. Estudo Sobre a Influência de Aberturas e Cortes Oblíquos na Resistência ao Esforço Cortante em Lajes Alveolares Protendidas Pré-Fabricadas.** 2017. 266 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo teórico e experimental sobre a influência de aberturas e cortes oblíquos na resistência ao esforço cortante de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. Com o intuito de compatibilizar a estrutura com a arquitetura e instalações, muitas vezes se faz necessário a execução de aberturas e cortes oblíquos (em um ângulo diferente de  $90^\circ$  em relação às cordoalhas). Os cortes oblíquos são destinados a adequar as lajes a uma arquitetura com geometria não retangular, e diante da ausência de estudos e normas sobre o tema, muitas vezes os projetistas de estruturas optam pelo uso de estruturas moldadas no local ao invés da realização dos cortes. As aberturas são basicamente destinadas às instalações, equipamentos ou até mesmo de outros elementos estruturais, sendo amplamente empregadas mesmo sem a existência de formulações ou procedimentos que determinem a resistência ao esforço cortante de lajes sob estas situações. No estudo teórico foi realizada a verificação das lajes sem aberturas ou cortes oblíquos por meio da ABNT NBR 14861:2011. No programa experimental, 17 lajes produzidas pelo processo de forma deslizante, com 200mm de altura e 6000mm de comprimento, sendo 11 lajes simples e 6 lajes duplas (posicionadas lado a lado com a execução de chave de cisalhamento e capa estrutural), com diferentes arranjos de aberturas, ângulos de corte e direção do carregamento, foram ensaiadas a força cortante. Para todos os exemplares ensaiados, os cortes oblíquos, as aberturas e o tipo de carregamento geraram uma perda de resistência ao esforço cortante, comprovando a importância e necessidade de um melhor desenvolvimento dos procedimentos de cálculo de lajes.

Palavra chave: laje alveolar, cortes oblíquos, aberturas, esforço cortante.

## **Abstract**

**PINHEIRO, G. L. Study of the Effect of Openings and Skew Cuts on the Shear Strength of Prestressed Precast Concrete Hollow Core Slabs.** 2017. 266 p. Dissertation (Doctorate in Structures and Civil Construction) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

This research conducts a theoretical and experimental study about the influence of openings and skew cuts on the shear strength of prestressed precast concrete hollow core slabs (HC). In order to best adapt the structure to the architectural and functional requirements of a building, it is usually necessary to execute openings and skew cuts (at an angle other than  $90^\circ$  with respect to strand direction) on the slabs. The skew cuts are designed to place the slabs on a floor that has a non-square geometry, and given the lack of technical studies and code procedures for slabs under these situations, designers often use cast-in-place concrete floors, instead executing the cuts. The openings are designed to fit the facilities, equipment or other structural elements, and are widely used even though there is no design formula or procedure to address your shear strength in that situation. In the theoretical study, the verification of the slabs without skew cuts or openings using the national code (ABNT NBR 14861:2011) was done. In the experimental program, 17 slabs produced by slip form process with 200 mm of depth and 6000 mm of length, being 11 single slabs specimens and 6 double slabs (placed side by side within shear key as well as structural overlay) having different opening, skew cut angle and loading arrangements, were tested and analyzed under shear force. For all the specimens studied the skew cuts, the openings and the loading way caused loss of shear strength, showing the importance and the need of better development of slab design procedures.

Keyword: hollow core slab, skew cuts, openings, shear strength.

## Lista de Símbolos

$a_g$	dimensão máxima do agregado graúdo (para concretos de alta resistência deve ser considerado zero).
$A$	área da seção transversal da laje;
$A_{alv}$	área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria, para alvéolo de seção circular;
$A_c$	área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada;
$A_{cp}$	área da seção transversal do concreto acima do eixo considerado;
$A_i$	afundamento inicial da cordoalha;
$A_f$	afundamento final da cordoalha;
$A_{S1}$	área da armadura de tração que se estende até não menos que $d + l_{b,nec}$ além da seção considerada;
$A_{st}$	área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ além da seção considerada;
$A_p$	seção transversal do aço protendido;
$A_{ps}$	área da armadura protendida localizada no lado tracionado pela flexão;
$b_{alv}$	largura horizontal do alvéolo a ser preenchido;
$b_c$	diâmetro do alvéolo;
$b_{ext}$	nervura externa;
$b_{int}$	nervura interna;
$b_w$	largura mínima da seção ao longo da altura útil $d$ ;
$b'_w$	largura total da nervura da laje alveolar composta com alvéolos preenchidos;
$C_e$	cobrimento esquerdo da cordoalha;
$C_d$	cobrimento direito da cordoalha;
$c_{inf}$	cobrimento inferior da cordoalha;
$d$	altura útil da seção transversal da laje alveolar;
$d'$	altura efetiva da seção transversal da laje alveolar composta;

$d_v$	altura de cisalhamento ou braço de alavanca à flexão, sendo adotado igual a $0,9d$ ;
$d_{tot}$	altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;
$d_p$	distância da extremidade da fibra mais comprimida até o centro de massa das armaduras protendidas e outras armaduras longitudinais não protendidas existentes, não devendo estar a menos de $0,8 \cdot h$ ;
$E$	módulo de elasticidade;
$E_c$	módulo de elasticidade do concreto moldado;
$E_{ci}$	módulo de elasticidade;
$E_p$	módulo de elasticidade do concreto pré-moldado;
$f_c'$	resistência a compressão do concreto [MPa];
$f_{cd}$	resistência de cálculo à compressão do concreto usada no projeto, conforme a ABNT NBR 9062:2006.
$f_{cm}$	resistência média a compressão do concreto;
$f_{ct}$	resistência a tração do concreto;
$f_{t,aço}$	resistência a tração da cordoalha da laje;
$f_{cta}$	resistência à tração de projeto do concreto.
$f_{ctk,inf}$	resistência característica inferior à tração do concreto;
$f_{ctk,sup}$	resistência característica superior à tração do concreto;
$f_{ct,m}$	resistência média a tração do concreto.
$f_{ck}$	resistência característica à compressão do concreto pré-moldado;
$f_{cm}$	resistência média à compressão do concreto;
$f_{cj}$	resistência à compressão do corpo de prova em $j$ dias;
$f_{pc}$	tensão de compressão resultante no concreto no centro da seção;
$f_{pe}$	tensão de compressão no concreto devido somente às forças de protensão, após descontadas as perdas de protensão, na fibra mais extrema da seção onde a tensão de tração é causada por carregamento externo;
$f_{p0}$	Tensão no aço protendido quando é nula a deformação do

concreto ao redor.

$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;
$h_{cp}$	distância entre o ponto crítico e a superfície inferior da laje;
$I$	momento de inércia da seção;
$I_y$	momento de inércia da seção transversal;
$l_{pt2}$	valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em $85\phi$ );
$l_{tc}$	soma do comprimento necessário para atender às solicitações de força cortante com a altura da seção transversal.
$l_x$	distância da seção x a partir do final da laje;
$M$	momento fletor;
$M_{cre}$	momento responsável pela fissuração da seção devido à forças externas;
$M_{max}$	momento máximo de cálculo à forças externas;
$n$	quantidade de alvéolos preenchidos;
$N$	carga axial;
$N_{Ed}$	força normal na seção devido às ações aplicadas ou à protensão;
$N_p$	força de protensão final, depois de todas as perdas;
$N_{rup}$	carga de ruptura do corpo de prova;
$N_{sd}$	força longitudinal na seção devido à protensão ou carregamento (a compressão é considerada com sinal positivo);
$S$	momento estático da seção;
$S$	desvio padrão;
$S_{cp}$	primeiro momento da área ou momento estático da seção de concreto acima do eixo considerado;
$V_d$	força cortante da seção devido a carga permanente sem coeficiente de segurança;
$V_c$	força cortante, parcela resistida pelo concreto;
$V_{ci}$	força cortante, parcela resistida pelo concreto onde a diagonal fissurada provém da combinação entre cisalhamento e momento;

$V_{cw}$	força cortante resistida pelo concreto onde a fissura diagonal provém da maior tensão de tração principal;
$V_{EXP}$	valor experimental da força cortante;
$V_i$	força cortante de cálculo na seção, devido à forças externas, ocorrendo simultaneamente com $M_{m\acute{a}x}$ [N];
$V_n$	resistência ao esforço cortante;
$V_s$	força cortante, parcela resistida pela armadura transversal;
$V_{Rd1,a1}$	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.
$V_{Rd,c}$	força cortante resistente de cálculo.
$V_{Rd1}$	força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural;
$V_{Rd2}$	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;
$V_{Rdf}$	força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos;
$V'_{Rdt}$	força cortante de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa estrutural e com preenchimento de alvéolos;
$\overline{V}_{Rdf}$	força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes com capa estrutural;
$\overline{V}'_{Rdf}$	força cortante de cálculo em zona de flexão, para lajes com capa estrutural e com preenchimento de alvéolos;
$V_{Sd}$	força cortante solicitante de cálculo na seção;
$V_u$	força cortante solicitante;
$V_z$	força de cisalhamento;

$Z$	posição da tensão avaliada na seção transversal em relação ao eixo central;
$x_{cp}$	coordenada do ponto crítico;
$y_t$	distância do centro de massa da seção bruta, sem considerar o aço, até a face tracionada;
$\sum b_{w,1}$	somatório das nervuras internas da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;
$\sum b_{w,2}$	somatório das nervuras externas da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;
$\alpha_E$	coeficiente em função do tipo de agregado;
$\alpha_1$	$l_x/l_{pt2} \leq 1$ para armaduras pré-tracionadas, $l_x/l_{pt2} = 1$ para outros tipos de protensão;
$\varepsilon$	deformação específica;
$\varepsilon_x$	deformação longitudinal na metade da altura da seção transversal;
$\tau_{Rd}$	tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento;
$\rho$	taxa de armadura
$\rho'_1$	taxa de armadura específica da seção alveolar pré-moldada composta;
$\rho_2$	taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolo preenchido;
$\sigma$	tensão;
$\sigma_{cp}$	tensão de compressão do concreto devido à força de 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);
$\sigma_{cpm}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$\varphi$	coeficiente de ponderação da resistência;
$\lambda$	coeficiente de ponderação da resistência;
$\delta$	coeficiente de variação;
$\Delta l_0$	escorregamento da cordoalha;

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivos .....	3
1.2	Justificativas .....	3
1.3	Metodologia.....	4
2	Lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.....	6
2.1	LAP .....	6
2.1.1	Comportamento de lajes sem armadura transversal .....	10
2.2	Aberturas e cortes oblíquos em LAPs .....	13
2.2.1	Recomendações normativas .....	14
2.2.1.1	ABNT NBR 6118:2014 .....	14
2.2.1.2	ABNT NBR 9062:2006 .....	16
2.2.1.3	ABNT NBR 14861:2011 .....	16
2.2.2	Recomendações de manuais técnicos .....	17
2.2.2.1	MUNTE .....	17
2.2.2.2	FIB/FIP .....	21
2.2.2.3	ASSAP .....	22
2.2.2.4	AIDEPLA.....	25
2.2.2.5	PCI.....	28
2.2.2.6	SESOC/NZCS.....	32
2.2.3	Recomendações de fabricantes .....	33
2.2.3.1	CONCRETECH.....	33
2.2.3.2	HOLLOWCORE .....	35
2.2.3.3	BISON.....	38
2.2.3.4	CONSOLIS.....	38
2.2.4	Estudos sobre a execução de aberturas e cortes em LAP .....	40
2.2.4.1	Estudo numérico sobre o comportamento estrutural de lajes alveolares com pequenas aberturas.....	40
2.2.4.2	Estudo numérico sobre o comportamento estrutural de lajes alveolares com grandes aberturas .....	44
2.2.5	Conclusões iniciais sobre a execução de aberturas e cortes em LAPs	47
2.3	Modelos de cálculo.....	48
2.3.1	Modelo segundo a ABNT NBR 6118:2014 .....	49
2.3.2	Modelo segundo a ABNT NBR 14861:2011 .....	49
2.3.2.1	Mecanismos de ruptura segundo a ABNT NBR 14861:2011 .	50
2.3.2.2	Cálculo da resistência à força cortante .....	51
2.3.3	Modelo segundo o Eurocode 2 EN 1992-1-1:2004.....	58

2.3.3.1	Cálculo da resistência à força cortante .....	58
2.3.4	Modelo segundo o ACI 318:2014 .....	60
2.3.4.1	Cálculo da resistência à força cortante .....	61
2.3.5	Modelo segundo a FIB(1992) .....	66
2.3.5.1	Lajes sem capa estrutural .....	66
2.3.5.2	Lajes com capa estrutural .....	67
2.3.5.3	Lajes sem capa estrutural e com preenchimento de alvéolos	68
2.3.5.4	Lajes com capa estrutural e com preenchimento de alvéolos	69
2.3.6	Modelo segundo a CSA (2001) .....	70
2.3.7	Modelo segundo Yang (1994) .....	71
2.3.8	Modelo segundo Collins <i>et al.</i> (2008) .....	73
2.3.9	Conclusões iniciais sobre os modelos de cálculo de LAPs .....	74
3	Programa Experimental.....	75
3.1	Análise experimental.....	76
3.1.1	Tipologia de ensaios.....	76
3.1.1.1	Ensaio com o propósito de pesquisa e desenvolvimento.....	76
3.1.1.2	Ensaio para a avaliação de desempenho.....	77
3.1.1.3	Ensaio para controle da qualidade .....	77
3.2	Medidas preliminares .....	77
3.3	Ensaio padrão FIP.....	79
3.3.1	Ensaio de resistência ao esforço cortante .....	80
3.3.2	Caracterização do concreto .....	81
3.3.3	Caracterização do aço.....	83
3.4	Produção dos modelos ensaiados .....	84
3.5	Programa Experimental 1.....	92
3.5.1	Ensaio executados no Programa de Experimental 1 .....	92
3.5.2	Modelo de ensaio do Programa experimental 1 ( <i>Test set up</i> ) .....	94
3.5.3	Equipamentos de ensaio do Programa experimental 1 .....	95
3.5.4	Caracterização dos materiais utilizados do Programa experimental 1	96
3.5.4.1	Concreto.....	96
3.5.4.2	Aço.....	100
3.5.5	Medidas preliminares do Programa experimental 1.....	101
3.5.6	Preparação dos modelos do Programa experimental 1.....	106
3.5.7	Execução dos ensaios do Programa experimental 1.....	110
3.5.7.1	Ensaio da Laje 1 .....	110
3.5.7.2	Ensaio da Laje 2 .....	113
3.5.7.3	Ensaio da Laje 3 .....	115

3.5.7.4	Ensaio da Laje 4 .....	117
3.5.7.5	Ensaio da Laje 5 .....	120
3.5.7.6	Ensaio da Laje 6 .....	122
3.5.7.7	Ensaio da Laje 7 .....	124
3.5.7.8	Ensaio da Laje 08 .....	126
3.5.7.9	Ensaio da Laje 09 .....	128
3.5.7.10	Ensaio da Laje 10.....	130
3.5.7.11	Ensaio da Laje 11.....	132
3.5.8	Escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa experimental 1.....	134
3.5.9	Análise preliminar dos dados do Programa experimental 1.....	135
3.5.9.1	Dimensões das lajes .....	135
3.5.9.2	Cobrimento das cordoalhas .....	136
3.5.9.3	Espessura das nervuras .....	138
3.5.9.4	Contra flecha.....	139
3.5.9.5	Análise do escorregamento das cordoalhas das lajes .....	139
3.5.9.6	Valores experimentais.....	143
3.5.9.7	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011.....	144
3.5.9.8	Comparação entre valores experimentais.....	146
3.5.9.9	Comparação entre lajes com aberturas .....	147
3.5.9.10	Comparação entre lajes com cortes oblíquos .....	149
3.5.9.11	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada à aberturas frontais.....	150
3.5.9.12	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada à aberturas laterais .....	153
3.5.9.13	Comparação entre valores experimentais, valores adaptados e valores segundo a ABNT NBR 14861:2011 para lajes com aberturas .....	156
3.5.10	Conclusões preliminares do Programa experimental 1 .....	157
3.6	Programa Experimental 2.....	159
3.6.1	Modelo de ensaio do Programa experimental 2 ( <i>Test set up</i> ) ....	160
3.6.2	Equipamentos de ensaio do Programa experimental 2 .....	161
3.6.3	Caracterização dos materiais utilizados no Programa experimental 2 .....	163
3.6.3.1	Concreto.....	163
3.6.3.2	Argamassa .....	167
3.6.3.3	Aço.....	170
3.6.4	Medidas preliminares do Programa Experimental 2 .....	171
3.6.5	Preparação dos modelos.....	174

3.6.6	Execução dos ensaios.....	179
3.6.6.1	Ensaio da Laje 1 .....	180
3.6.6.2	Ensaio da Laje 2 .....	182
3.6.6.3	Ensaio da Laje 3 .....	183
3.6.6.4	Ensaio da Laje 4 .....	185
3.6.6.5	Ensaio da Laje 5 .....	188
3.6.6.6	Ensaio da Laje 6 .....	189
3.6.7	Escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa experimental 2.....	191
3.6.8	Análise preliminar dos dados do Programa experimental 2.....	192
3.6.8.1	Dimensões das lajes.....	192
3.6.8.2	Cobrimento das cordoalhas .....	193
3.6.8.3	Espessura das nervuras .....	195
3.6.8.4	Contra flecha.....	196
3.6.8.5	Análise do escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa Experimental 2.....	196
3.6.8.6	Valores experimentais.....	197
3.6.8.7	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011.....	198
3.6.8.8	Comparação entre valores experimentais.....	200
3.6.8.9	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada a panos de lajes com uma abertura frontal.....	201
3.6.8.10	Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada a panos de laje com duas aberturas laterais ...	204
3.6.8.11	Comparação entre valores experimentais, valores adaptados e valores segundo a ABNT NBR 14861:2011 para panos de laje com aberturas	207
3.6.9	Conclusões preliminares do Programa Experimental 2.....	209
4	Conclusões .....	211
4.1	Ensaio de lajes alveolares individuais (Programa experimental 1) ...	211
4.2	Ensaio de lajes alveolares duplas (Programa experimental 2).....	212
4.3	Considerações finais.....	213
4.4	Sugestões para trabalhos futuros .....	214
5	Referências.....	217
	Anexo 1 .....	222
	Anexo 2 .....	227
	Anexo 3 .....	231
	Anexo 4 .....	235
	Anexo 5.....	239

Anexo 6 .....	240
Anexo 7 .....	242
Anexo 8 .....	243

## Índice de figuras

Figura 1.1: Cortes oblíquos e aberturas em lajes alveolares.....	2
Figura 2.1: (a) Partes de uma laje alveolar; (b) Lajes alveolares de diferentes seções transversais.....	6
Figura 2.2: Seção de laje alveolar com capa estrutural de concreto. ....	8
Figura 2.3: Efeito diafragma rígido. ....	8
Figura 2.4: Detalhe da seção transversal da chave de cisalhamento. ....	9
Figura 2.5: Detalhe do preenchimento de alvéolos. ....	9
Figura 2.6: Elemento em concreto protendido submetido a flexão e cisalhamento. (a) Fissuras na nervura devido ao cisalhamento; (b) Fissuras de cisalhamento e de flexão; (c) Fissuras de flexão.....	11
Figura 2.7: Elemento com fissuras típicas de flexão. ....	12
Figura 2.8: Elemento com combinação de fissuras.....	13
Figura 2.9: Elemento com fissuras tipicamente de esforço cortante. ....	13
Figura 2.10: Exemplo de abertura (i) e de corte oblíquo (ii) em LAP.....	14
Figura 2.11: Reforço em bordas livres e aberturas em lajes. ....	15
Figura 2.12: Dimensões limites para aberturas de lajes com dispensa de verificação. ....	16
Figura 2.13: Esquema de instalação de alças de içamento. ....	18
Figura 2.14: Dimensão de aberturas com e sem necessidade de reforço. ....	19
Figura 2.15: Tipos de furos e aberturas em lajes. ....	21
Figura 2.16: Uso de apoios metálicos para grandes aberturas. ....	22
Figura 2.17: Exemplo de aberturas em lajes alveolares de 120 cm de largura.....	23
Figura 2.18: Corte longitudinal. ....	25
Figura 2.19: Ajuste da dimensão por meio da chave de cisalhamento. ....	25
Figura 2.20: Corte oblíquo em laje alveolar.....	26
Figura 2.21: Apoio oblíquo para lajes com ângulo reto. ....	26
Figura 2.22: Encaixe. ....	27
Figura 2.23: Detalhe de apoio metálico para grandes aberturas.....	27
Figura 2.24: Exemplo de aberturas, grandes aberturas e furos em lajes alveolares.....	28
Figura 2.25: Detalhe e tipos de apoios metálicos para grandes aberturas.....	29
Figura 2.26: Detalhe de abertura pequena.....	30
Figura 2.27: Largura efetiva resistente de uma laje para um carregamento em qualquer localização ao longo do vão. ....	30
Figura 2.28: Detalhe de abertura localizada mais próxima ao apoio.....	31
Figura 2.29: Detalhe de abertura sobre o apoio.....	31
Figura 2.30: Exemplo de aberturas em lajes alveolares.....	32
Figura 2.31: Dimensão máxima para abertura em LAP sem uso de apoio metálico.....	33
Figura 2.32: Abertura formada por laje apoiada por meio de suporte metálico.....	34
Figura 2.33: Indicação dos locais de realização de furos. a) lajes de altura nominal 200mm; b) lajes de altura nominal 300mm. ....	35
Figura 2.34: Aberturas, furos e apoios por meio de suporte metálico em LAPs. ....	36
Figura 2.35: Dimensão de abertura em uma laje. ....	36
Figura 2.36: Dimensão de abertura em duas lajes.....	37
Figura 2.37: Indicação dos locais de realização de furos. a) lajes de altura nominal 200mm; b) lajes de altura nominal 300mm. ....	37

Figura 2.38: Apoio metálico para laje.....	38
Figura 2.39: Tipos de aberturas e furos em laje.....	39
Figura 2.40: Grandes aberturas em laje: a) apoio metálico; b) viga de concreto. .....	39
Figura 2.41: Uso de apoio metálico.....	40
Figura 2.42: Tipos mais comuns de aberturas em LAP.....	41
Figura 2.43: Modelos de estudo.....	42
Figura 2.44: Seção transversal dos modelos de estudo.....	42
Figura 2.45: Curva momento versus deslocamento dos modelos de estudo. ...	43
Figura 2.46: Variação percentual da reação de apoio dos modelos de estudo.	44
Figura 2.47: Curva momento versus deflexão para lajes com abertura, sem capeamento e com capeamento de 4 e 8cm.....	45
Figura 2.48: Variação percentual da reação de apoio dos modelos de estudo.	46
Figura 2.49: Regiões e padrões de fissuração em elemento de concreto armado ou protendido. ....	50
Figura 2.50: Regiões e padrões de fissuração em elemento de concreto armado ou protendido. ....	51
Figura 2.51: Posicionamento recomendado para o preenchimento de alvéolos. .....	53
Figura 2.52: Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e preenchimento de alvéolos.....	54
Figura 2.53: Exemplo de seção transversal de laje alveolar com preenchimento de alvéolos. ....	60
Figura 2.54: Tipo de fissuras em vigas de concreto.....	63
Figura 3.1: Coleta de dados para análise dimensional das lajes.....	78
Figura 3.2: Modelo de ensaio ao cisalhamento.....	80
Figura 3.3: Extração de corpos de prova FIP(1992).....	82
Figura 3.4: Pista de concretagem.....	84
Figura 3.5: Limpeza da pista de concretagem.....	85
Figura 3.6: Pista de concretagem após aplicação de desmoldante. ....	85
Figura 3.7: Posicionamento das cordoalhas sobre a pista de concretagem. ...	86
Figura 3.8: Equipamento para protensão. ....	86
Figura 3.9: Cabos ancorados por cunhas. a) início da pista; b) final da pista. .	87
Figura 3.10: Pista de concretagem preparada para o início da produção. ....	87
Figura 3.11: Equipamento de produção de lajes alveolares por moldagem. ....	88
Figura 3.12: Produção do concreto. ....	88
Figura 3.13: Lançamento do concreto.....	89
Figura 3.14: Compactação e moldagem do concreto.....	89
Figura 3.15: Execução de ranhuras na superfície das lajes.....	90
Figura 3.16: Marcação dos locais de corte e abertura. ....	90
Figura 3.17: Execução dos cortes e aberturas.....	91
Figura 3.18: Processo de cura das lajes. ....	91
Figura 3.19: Corte das lajes. ....	92
Figura 3.20: Método de aplicação do carregamento em lajes com cortes oblíquos. .....	94
Figura 3.21: Esquema de ensaio de resistência a força cortante: a) vista lateral, b) vista frontal.....	94
Figura 3.22: Pórtico de ensaios NETPRE-UFSCar. ....	95
Figura 3.23: Moldagem de corpos de prova das lajes.....	98
Figura 3.24: Ensaio dos corpos de prova das lajes.....	98

Figura 3.25: Retífica dos corpos de prova das lajes.....	99
Figura 3.26: Análise dimensional das lajes. ....	101
Figura 3.27: Pontos de análise dimensional das LAPs. ....	102
Figura 3.28: Medidas de cobertura e posição efetiva das cordoalhas. ....	103
Figura 3.29: Medidas da espessura das nervuras da laje. ....	104
Figura 3.30: Medida da contra-flecha da laje. ....	105
Figura 3.31: a) Processo de pintura das lajes; b) Pintura executada. ....	107
Figura 3.32: Aparelho de apoio fixo.....	107
Figura 3.33: Aplicação de graxa entre o apoio de madeira e a viga metálica. ....	108
Figura 3.34: Posicionamento das lajes para ensaio. ....	108
Figura 3.35 : Execução da regularização com areia sobre a laje. ....	109
Figura 3.36: Montagem do esquema de ensaio. ....	109
Figura 3.37: Ensaio Laje 1.....	111
Figura 3.38: Fissuras na região inferior da Laje 1. ....	111
Figura 3.39: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 1. ....	112
Figura 3.40: Ensaio da Laje 2.....	113
Figura 3.41: Fissuras na região inferior da Laje 2. ....	114
Figura 3.42: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da laje 2. ....	114
Figura 3.43: Ensaio da Laje 3.....	115
Figura 3.44: Fissuras na região inferior da Laje 3: a) lado direito; b) lado esquerdo. ....	116
Figura 3.45: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da laje 3. ....	116
Figura 3.46: Ensaio da Laje 4.....	117
Figura 3.47: Fissuras na região superior da Laje 4. ....	118
Figura 3.48: Fissuras na região inferior da Laje 4. ....	118
Figura 3.49: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 4. ....	119
Figura 3.50: Ensaio da Laje 5.....	120
Figura 3.51: Fissuras na região inferior da Laje 5. ....	121
Figura 3.52: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 5. ....	121
Figura 3.53: Ensaio da Laje 6.....	122
Figura 3.54: Fissuras na região inferior a aplicação do carregamento da Laje 6. ....	123
Figura 3.55: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 6. ....	123
Figura 3.56: Ensaio da Laje 7.....	124
Figura 3.57: Fissuras na região da ruptura da Laje 7.....	125
Figura 3.58: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 7.....	125
Figura 3.59: Ensaio da Laje 08.....	126
Figura 3.60: Fissuras na região inferior da Laje 08. ....	127
Figura 3.61: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 08. ....	127
Figura 3.62: Ensaio da Laje 09.....	128
Figura 3.63: Fissuras na região oposta a aplicação do carregamento da Laje 09. ....	129
Figura 3.64: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 09. ....	129
Figura 3.65: Ensaio da Laje 10.....	130
Figura 3.66: Fissuras na região superior da Laje 10. ....	131
Figura 3.67: Fissuras na região superior da Laje 10. ....	131
Figura 3.68: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 10. ....	132
Figura 3.69: Ensaio da Laje 11.....	133
Figura 3.70: Fissuras na região superior da Laje 11. ....	133
Figura 3.71: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 11. ....	134

Figura 3.72: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 1.....	141
Figura 3.73: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 2.....	141
Figura 3.74: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 3.....	142
Figura 3.75: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 4.....	142
Figura 3.76: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 5.....	142
Figura 3.77: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante. ....	146
Figura 3.78: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas laterais ou centrais. ....	148
Figura 3.79: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante de lajes com cortes oblíquos. ....	149
Figura 3.80: Valores experimentais, valores adaptados e valores de norma da resistência ao esforço cortante.....	156
Figura 3.81: Comparação entre as médias dos Valores experimentais com o Valores adaptados de Cálculo e Valores adaptados de Projeto.....	157
Figura 3.82: Esquema do ensaio – Vista lateral. ....	160
Figura 3.83: Esquema do ensaio – Vista Frontal.....	161
Figura 3.84: Pórtico de ensaio da FEC – UNICAMP. ....	162
Figura 3.85: Moldagem de corpos do capeamento estrutural. ....	164
Figura 3.86: Ensaio dos corpos de prova das lajes. ....	164
Figura 3.87: Corpos de prova da chave de cisalhamento. ....	168
Figura 3.88: Ensaio dos corpos de prova das lajes. ....	168
Figura 3.89: Posicionamento das lajes para ensaio. ....	174
Figura 3.90: Execução da chave de cisalhamento. ....	175
Figura 3.91: Preparação para a execução da capa estrutural.....	175
Figura 3.92: Execução da capa estrutural.....	176
Figura 3.93: Processo de pintura das lajes. ....	177
Figura 3.94: Aparelho de apoio. ....	177
Figura 3.95 : Execução da regularização sobre a laje.....	178
Figura 3.96: Montagem do esquema de ensaio. ....	178
Figura 3.97: Deslocamento dos apoios. ....	179
Figura 3.98: Ensaio Laje 1.....	180
Figura 3.99: Curva do Ensaio da Laje 1. ....	181
Figura 3.100: Fissuras na região entre a laje e a capa estrutural.....	181
Figura 3.101: Ensaio Laje 2.....	182
Figura 3.102: Curva do Ensaio da Laje 2. ....	183
Figura 3.103: Ensaio Laje 3.....	184
Figura 3.104: Curva do Ensaio da Laje 3. ....	185
Figura 3.105: Ensaio Laje 4.....	186
Figura 3.106: Curva do Ensaio da Laje 4. ....	187
Figura 3.107: Ensaio Laje 5.....	188
Figura 3.108: Curva do Ensaio da Laje 5. ....	189
Figura 3.109: Ensaio Laje 6.....	190
Figura 3.110: Curva do Ensaio da Laje 6. ....	191
Figura 3.111: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante. ....	200
Figura 3.112: Valores experimentais, valores adaptados e valores de norma da resistência ao esforço cortante.....	208

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Dimensões máximas de aberturas em lajes junto a pilares.....	20
Tabela 2.2 – Dimensões máximas de furos e aberturas .....	21
Tabela 2.3 – Dimensões máximas de furos e aberturas. ....	39
Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação do concreto devido ao tipo de agregado.....	62
Tabela 3.1: Programa de ensaios. ....	93
Tabela 3.2: Ensaio de caracterização do concreto das lajes.....	99
Tabela 3.3: Características das cordoalhas. ....	100
Tabela 3.4: Resultado dos ensaios de controle de qualidade do aço. ....	101
Tabela 3.5: Dimensões das LAPs. ....	103
Tabela 3.6: Valores de cobertura e posição das cordoalhas. ....	104
Tabela 3.7: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes. ....	105
Tabela 3.8: Valores da contra-flecha das lajes.....	106
Tabela 3.9: Valores do escorregamento inicial das cordoalhas das lajes. ....	106
Tabela 3.10: Valores do escorregamento final das cordoalhas das lajes.....	135
Tabela 3.11: Desvios nas dimensões das lajes.....	136
Tabela 3.12: Desvios nos cobrimentos das cordoalhas das lajes. ....	137
Tabela 3.13: Desvios nas espessuras das nervuras das lajes. ....	138
Tabela 3.14: Desvios nas contra flechas das lajes.....	139
Tabela 3.15: Valores do escorregamento médio e escorregamento limite das cordoalhas.....	140
Tabela 3.16: Valores do escorregamento das cordoalhas das lajes. ....	140
Tabela 3.17: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante. ....	143
Tabela 3.18: Valor de projeto da resistência ao esforço cortante.....	144
Tabela 3.19: Valor de cálculo da resistência ao esforço cortante. ....	145
Tabela 3.20: Valor teórico característico da resistência ao esforço cortante. ....	145
Tabela 3.21: Comparativo das resistências ao esforço cortante da Laje 1. ...	146
Tabela 3.22: Comparação entre valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas ou cortes oblíquos e a laje de referência. ....	147
Tabela 3.23: Comparação entre os valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas laterais ou centrais com a laje de referência. ....	148
Tabela 3.24: Comparação entre os valores de resistência ao esforço cortante de lajes com cortes em diferentes ângulos oblíquos e diferentes posições de aplicação de carregamento. ....	150
Tabela 3.25: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante... ..	151
Tabela 3.26: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante. .	152
Tabela 3.27: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante. ....	152
Tabela 3.28: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura frontal.....	153
Tabela 3.29: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante... ..	154
Tabela 3.30: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante. .	154
Tabela 3.31: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante. ....	155
Tabela 3.32: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura lateral. ....	155
Tabela 3.33: Programa de ensaios. ....	159

Tabela 3.34: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 1. ...	165
Tabela 3.35: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 2. ...	165
Tabela 3.36: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 3. ...	166
Tabela 3.37: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 4. ...	166
Tabela 3.38: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 5. ...	167
Tabela 3.39: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 6. ...	167
Tabela 3.40: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 1. ....	169
Tabela 3.41: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 2. ....	169
Tabela 3.42: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 3. ....	169
Tabela 3.43: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 4. ....	170
Tabela 3.44: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 5. ....	170
Tabela 3.45: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 6. ....	170
Tabela 3.46: Dimensões das LAPs. ....	171
Tabela 3.47: Valores de cobertura e posição das cordoalhas. ....	172
Tabela 3.48: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes. ....	173
Tabela 3.49: Valores da contra-flecha das lajes.....	173
Tabela 3.50: Valores do escorregamento inicial das cordoalhas das lajes. ...	174
Tabela 3.51: Valores do escorregamento final das cordoalhas das lajes.....	192
Tabela 3.52: Dimensões das LAPs. ....	193
Tabela 3.53: Valores de cobertura e posição das cordoalhas. ....	194
Tabela 3.54: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes. ....	195
Tabela 3.55: Valores da contra-flecha das lajes.....	196
Tabela 3.56: Valores do escorregamento das cordoalhas das lajes. ....	197
Tabela 3.57: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante. ....	197
Tabela 3.58: Valor de Projeto da resistência ao esforço cortante. ....	198
Tabela 3.59: Valor de cálculo da resistência ao esforço cortante. ....	199
Tabela 3.60: Valor Teórico Característico da resistência ao esforço cortante. ....	199
Tabela 3.61: Comparativo das Resistência ao esforço cortante da Laje 2.....	200
Tabela 3.62: Comparação entre dos valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas e a laje de referência.....	201
Tabela 3.63: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante... ..	202
Tabela 3.64: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante. .	203
Tabela 3.65: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante. ....	203
Tabela 3.66: Comparativo das resistências ao esforço cortante de panos de laje com uma abertura frontal. ....	204
Tabela 3.67: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante... ..	205
Tabela 3.68: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante. .	206
Tabela 3.69: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante. ....	206

Tabela 3.70: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura lateral. ....	207
--	-----

## 1 Introdução

O concreto pré-moldado pode ser definido como sendo aquele preparado, moldado e curado em um local que não seja seu destino final.

Segundo VASCONCELLOS (2002), não é possível datar o início da pré-fabricação de estruturas, tendo em vista que o próprio nascimento do concreto armado ocorreu com a pré-moldagem de elementos fora do local de seu uso. Desse modo, é possível afirmar que os elementos pré-fabricados surgiram com a invenção do concreto armado.

O grande crescimento do sistema pré-fabricado na Europa foi consequência da necessidade de reconstrução após a Segunda Guerra Mundial, sendo o período de 1945 a 1950 caracterizado pela expressiva demanda de construções, tais como habitação, escolas, hospitais, indústrias, pontes, e etc.

No Brasil o cenário histórico não foi o mesmo, o sistema foi impulsionado pela busca da racionalização, com consequente diminuição de gastos e aumento de lucros, diante de um mercado em crescimento e em constante disputa.

O sistema pré-fabricado em concreto teve ascensão juntamente com a evolução da indústria da construção civil, tendo relação com a mecanização dos meios industriais de modo geral. O seu desenvolvimento está ligado não só aos processos de fabricação, mas também aos processos de transporte e montagem dos elementos.

A industrialização da construção civil através da utilização de peças de concreto pré-fabricado promoveu no Brasil e no mundo um salto de qualidade nos canteiros de obras, pois através de componentes industrializados com alto controle ao longo de sua produção, com materiais de boa qualidade, fornecedores selecionados e mão-de-obra treinada e qualificada, as obras tornaram-se mais organizadas e seguras, (SERRA, 2005).

Este sistema torna-se crescente na atualidade em virtude da necessidade de uma maior velocidade de produção e montagem de estruturas. Em meio a isso, surge o interesse de se aprimorar seus elementos constituintes, (PINHEIRO, 2014).

De acordo com ACKER (2002), o uso de estruturas em concreto pré-moldado em edificações está amplamente relacionado à uma forma de

construir econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A indústria de pré-fabricados vem fazendo esforços para se adequar às demandas da sociedade, no que diz respeito a: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e sustentabilidade.

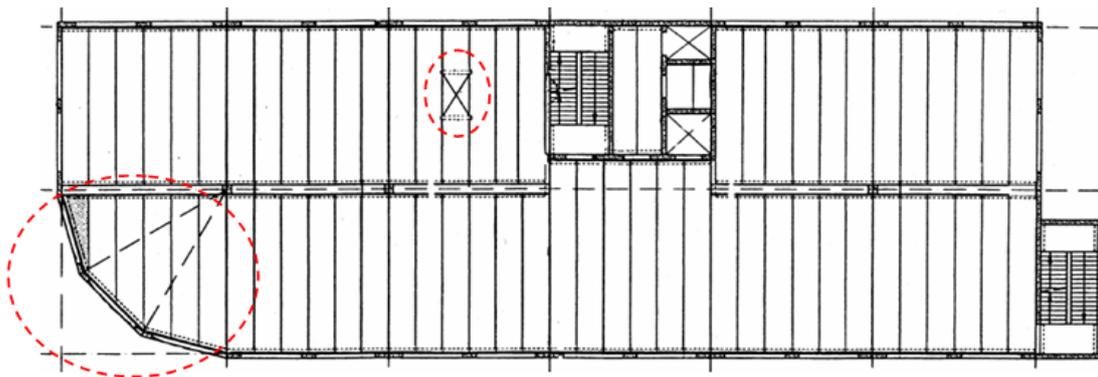
Um dos principais elementos em questão são as lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, que segundo COSTA (2009), apresentam-se como uma solução estrutural avançada para piso e forro, devido ao seu baixo peso próprio e melhor uso dos materiais, tornando-a economicamente viável.

As lajes alveolares são amplamente utilizadas no Brasil e no mundo pelo fato de possuírem montagem rápida e custo competitivo. Seu processo de produção é altamente mecanizado, garantindo assim uma grande produtividade.

Devido ao amplo emprego das lajes alveolares, frequentemente surge a necessidade de adequar e compatibilizar a estrutura com a arquitetura e instalações.

É extremamente comum a execução de cortes em ângulo diferentes de  $90^\circ$  (denominados cortes oblíquos) ou aberturas nas lajes alveolares, conforme a Figura 1.1.

**Figura 1.1: Cortes oblíquos e aberturas em lajes alveolares.**



**Fonte: ACKER (2002).**

O sistema de lajes alveolares possui uma ampla flexibilidade em relação a execução de cortes e aberturas. As aberturas normalmente são utilizadas para a passagem das instalações hidráulicas, elétricas, ar condicionado,

combate a incêndio, dentre outros. Os cortes oblíquos são normalmente empregados em arquiteturas com geometria não retangular.

Diante da importância deste elemento estrutural, este trabalho desenvolve um estudo sobre lajes alveolares pré-fabricadas protendidas (LAPs).

### **1.1 Objetivos**

Esta pesquisa tem como objetivo efetuar um estudo teórico e experimental sobre a influência de aberturas e cortes oblíquos na resistência ao esforço cortante de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.

Como objetivos específicos tem-se:

- i) Analisar, o comportamento das LAPs perante diferentes arranjos de abertura em sua extremidade, quando sujeitas ao esforço predominante de força cortante;
- ii) Analisar, o comportamento das LAPs perante cortes oblíquos, ou seja, em ângulos diferentes de  $90^\circ$ , quando sujeitas ao esforço predominante de força cortante;
- iii) Realizar a análise teórica das lajes sem aberturas ou cortes oblíquos por meio da ABNT NBR 14861:2011.

A partir dos resultados obtidos, procura-se fornecer parâmetros para o dimensionamento de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, aumentando o domínio técnico sobre o assunto e tornando o sistema construtivo mais seguro, racional e sustentável.

Dessa forma, espera-se contribuir para um melhor entendimento sobre o comportamento das LAPs que contenham aberturas e cortes oblíquos, quando submetidas ao esforço cortante.

### **1.2 Justificativas**

Estruturas pré-fabricadas em concreto são largamente utilizadas na construção civil nas diversas regiões do Brasil. Apesar disso, pesquisas nessa área ainda são recentes e restritas a algumas instituições de ensino superior, como por exemplo: a Universidade Estadual de Campinas - LES (Laboratório de Estruturas) e a Universidade Federal de São Carlos - NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto)

que desde o início de suas atividades no ano de 2004 já ensaiou mais de 300 lajes alveolares.

O trabalho é justificado pelo amplo e crescente uso das lajes alveolares no país, bem como pela carência de estudos, dados, parâmetros de dimensionamento e normas técnicas nacionais sobre o tema aberturas e cortes oblíquos em LAPs, que faz com que os profissionais e pesquisadores se amparem em normas técnicas, manuais e trabalhos estrangeiros, muitas vezes incompletos e inconclusivos.

Na literatura nacional e estrangeira pesquisada (América do Norte, Europa, Oceania), o assunto é superficialmente mencionado, não sendo possível encontrar trabalhos, manuais e normas técnicas que apresentem uma metodologia conclusiva de cálculo para elementos com essa particularidade, confirmando a necessidade de uma pesquisa que aborde a temática de modo mais profundo, na mesma linha de pesquisa apresetada no estudo numérico “*Numerical study on structural behavior of HC floors with large openings*” (BERNARDI, et al 2012), fornecendo informações que contribuam para o melhor entendimento do seu comportamento estrutural.

### **1.3 Metodologia**

Este trabalho é desenvolvido por meio de um estudo teórico e experimental.

A análise do comportamento das LAPs perante diferentes arranjos de abertura, e diferentes tipologias de corte oblíquo, quando sujeitas ao esforço predominante de força cortante, é realizada com base na literatura técnica nacional e internacional.

Os principais manuais de fabricantes, manuais técnicos, e normas técnicas internacionais e nacionais são analisados a fim de buscar uma metodologia de cálculo para lajes alveolares com aberturas e cortes oblíquos.

Em uma segunda etapa, dois amplos programas experimentais, envolvendo duas universidades brasileiras (Universidade Federal de São Carlos – UFSCar e Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP), e empresas do setor privado da construção civil (Rotesma Indústria de Pré-Fabricados de Concreto e Concrepav Concreteira), são desenvolvidos por meio de ensaios em real grandeza de lajes alveolares.

O primeiro programa experimental é focado em unidades de laje alveolar, enquanto o segundo trata da realização de ensaios em panos de lajes, ou seja, mais de um elemento de laje alveolar, fazendo uso de chave de cisalhamento e capeamento estrutural, dispostos de modo a reproduzir um pano de laje.

## 2 Lajes alveolares protendidas pré-fabricadas

Neste item serão abordadas as lajes alveolares e discutido: o comportamento de elementos que não possuem armadura transversal; as principais normas técnicas que tratam de lajes alveolares protendidas; e os cortes e aberturas em LAPs.

### 2.1 LAP

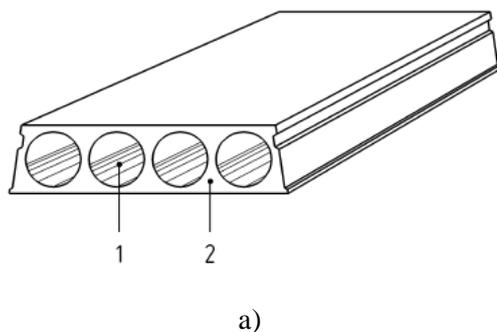
O sistema de lajes alveolares possui montagem rápida e custo competitivo. A técnica de protensão faz com que o elemento adquira uma seção de altura reduzida contribuindo para a diminuição do seu peso próprio e tornando a estrutura mais eficiente, (STANTON, 1992).

As LAPs são elementos pré-fabricados que contem vazios contínuos ao longo de seu comprimento proporcionando uma redução do peso próprio e do custo de fabricação, (CHENG E WANG, 2010).

Conforme SCHULTZ (2010), os vazios gerados pelos alvéolos são contínuos ao longo da laje e o concreto que preencheria o espaço gerado não possui contribuição significativa para a resistência à flexão, justificando assim sua seção transversal. Além de reduzir o peso do elemento, os vazios fornecem um espaço físico para a passagem das instalações elétrica e hidráulica.

A região compreendida entre um alvéolo e outro é denominada nervura, e confere rigidez ao elemento. Na Figura 2.1 são mostrados: a) (1) alvéolo, (2) nervura; b) seções típicas de laje alveolar.

**Figura 2.1: (a) Partes de uma laje alveolar; (b) Lajes alveolares de diferentes seções transversais.**



Fonte: EN 1168:2005; ASSAP (2002).

As primeiras lajes alveolares surgiram na década de 50, junto ao aumento significativo no uso de estruturas pré-fabricadas em concreto, como consequência da industrialização, da demanda por estruturas e da necessidade de se obter um elemento estrutural que possua uma melhor utilização dos materiais com expressiva redução do desperdício, em outras palavras: *“que possua um maior grau de otimização”*, (PINHEIRO, 2014).

De modo geral, as LAPs são econômicas, possuem boa resistência ao fogo e isolamento acústico, além de vencer grandes vãos mesmo sendo um elemento relativamente esbelto, (MONES E BREÑA, 2013).

Essas lajes possuem ainda como vantagem a compatibilidade de uso com diversos sistemas estruturais, como por exemplo: concreto pré-moldado, concreto moldado in loco, estrutura metálica, alvenaria estrutural, dentre outros, (COSTA, 2009).

MELO (2004) afirma que por conta das lajes alveolares serem produtos industrializados com baixo número *homem-hora* envolvido em sua produção, sua produtividade aumenta consideravelmente, e o nível de industrialização eleva o controle de qualidade durante todo o processo.

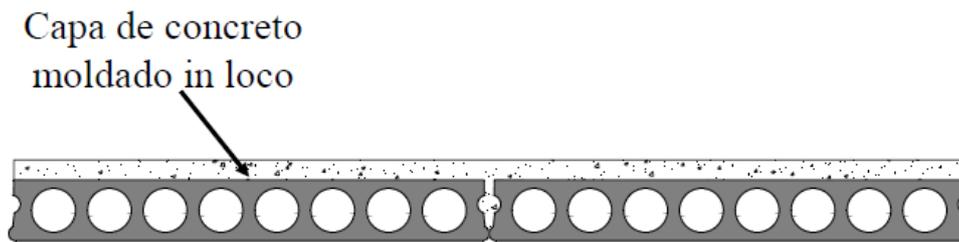
A ABNT NBR 14861 (2011) define laje alveolar como: *“peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitivo, sob rigorosas condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento”*.

É usual o emprego de lajes alveolares com capa estrutural de concreto moldado in loco.

A capa estrutural tem como objetivo formar uma seção composta de maior altura útil que irá aumentar a capacidade resistente à flexão e melhorar o desempenho do elemento como diafragma horizontal na estrutura

Em geral o capeamento possui um espessura mínima de 50 mm na região de sua menor altura (normamente onde se encontra a contra-flecha máxima da laje). A capa estrutural tem ainda a finalidade de conferir acabamento, assegurando o nivelamento da superfície da laje, conforme a Figura 2.2.

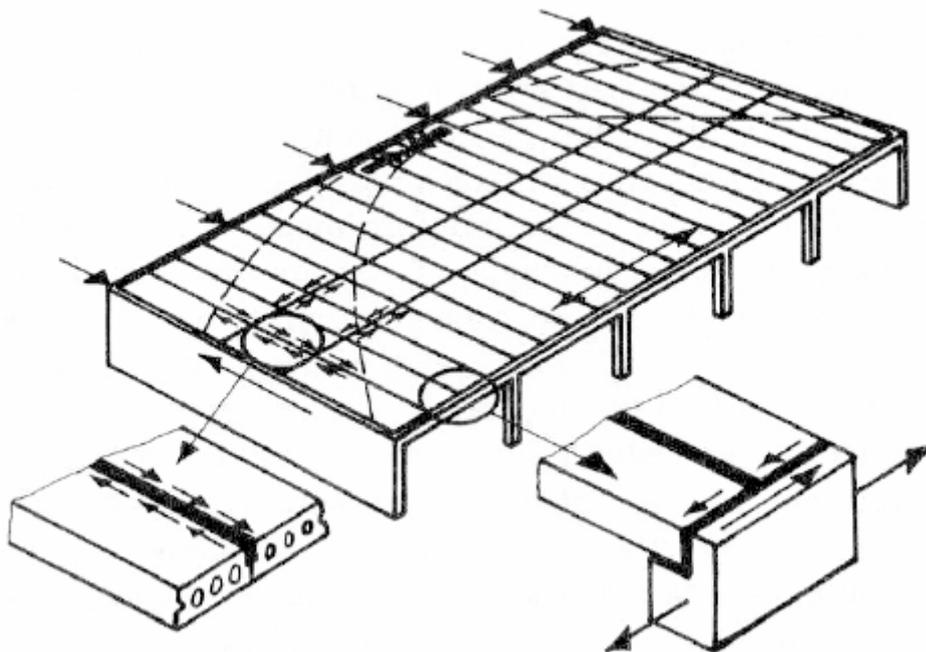
**Figura 2.2: Seção de laje alveolar com capa estrutural de concreto.**



Fonte: COSTA (2009).

Em edifícios de múltiplos pavimentos e de altura elevada, as lajes alveolares possuem a capacidade de transferência de esforços horizontais, tendo importante papel como diafragma rígido, conforme a Figura 2.7.

**Figura 2.3: Efeito diafragma rígido.**

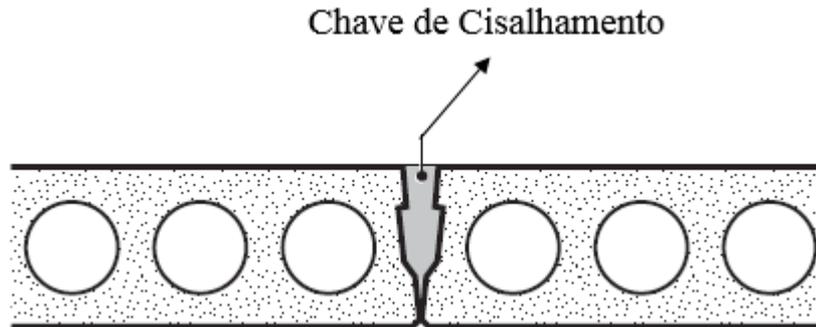


Fonte: FIB (2013).

Ao se garantir a aderência entre a capa e a superfície da laje junto ao apoio, a capa moldada *in loco* pode contribuir para o aumento da capacidade da resistência ao cisalhamento, contudo o principal dispositivo empregado para a transferência de esforços de cisalhamento é a chave de cisalhamento,

moldada no local por meio de graute, argamassa ou concreto, conforme a Figura 2.4

**Figura 2.4: Detalhe da seção transversal da chave de cisalhamento.**

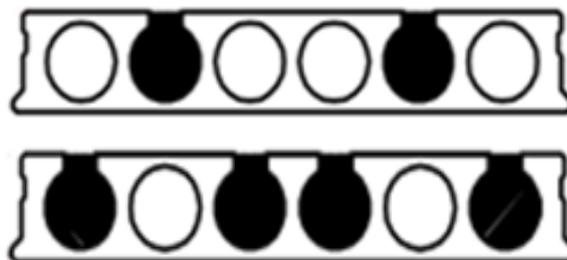


**Fonte: NPCAA adaptado (2003).**

As LAPs geralmente possuem apenas armadura longitudinal protendida devido ao seu processo de fabricação que não permite a inserção de armaduras transversais, tais como estribos, para esforço cortante, (SCHULTZ, 2010).

Em decorrência da ausência de armadura transversal para resistir à força cortante, há situações em que as lajes alveolares resistem ao momento fletor porém não resistem ao esforço cortante. Como solução o preenchimento de alvéolos com concreto nas extremidades da laje pode ser adotado, aumentando a resistência ao esforço cortante por meio do aumento da área e da largura mínima da seção transversal de concreto da laje na região próxima aos apoios, conforme a Figura 2.9.

**Figura 2.5: Detalhe do preenchimento de alvéolos.**



**Fonte: PINHEIRO (2014).**

### 2.1.1 Comportamento de lajes sem armadura transversal

Como citado anteriormente, devido ao seu processo produtivo, as lajes alveolares em sua grande maioria não fazem uso de armadura transversal, sendo o esforço cortante resistido pela protensão da armadura longitudinal e pela resistência a tração do concreto.

As lajes alveolares podem apresentar diferentes tipos de ruptura, podendo inclusive haver a combinação de mecanismos.

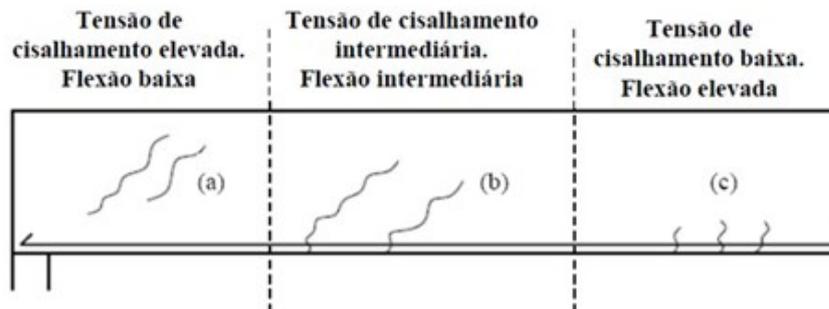
Os modos de ruptura mais observados são:

- Falha por perda da ancoragem (designado por escorregamento da cordoalha);
- Falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência a tração do concreto);
- Falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento);
- Falha por flexão – ELU (podendo haver escorregamento da cordoalha junto ao apoio quando próximo a ruptura);
- Falha por flexão combinada a cisalhamento (podendo ocorrer em peças com vãos pequenos e/ou com carregamentos mais elevados);
- Falha por flexão combinada a escorregamento de cordoalha;
- Separação da capa estrutural de concreto com a laje.

Segundo COSTA (2009) a falha de ancoragem em elementos que fazem uso da pré-tração (onde a protensão é transferida ao elemento pela aderência entre a armadura e o concreto) é mais comum do que aqueles que usam o processo de pós-tração (que possuem dispositivos para a transferência dos esforços ao elemento).

A Figura 2.6 representa um elemento bi-apoiado em concreto armado submetido a esforços de flexão e cisalhamento, e três diferentes padrões de fissuras são apresentados.

**Figura 2.6: Elemento em concreto protendido submetido a flexão e cisalhamento. (a) Fissuras na nervura devido ao cisalhamento; (b) Fissuras de cisalhamento e de flexão; (c) Fissuras de flexão.**



**Fonte: RETTNE e EDEKLING (2006).**

A região definida por (a), próxima ao apoio, apresenta a maior concentração de esforços de cisalhamento e a menor de esforços de flexão, com momento próximo a zero. As fissuras são inclinadas e aparecerão na nervura quando a tensão de tração principal alcançar a resistência à tração do concreto no ponto crítico.

Em regiões submetidas a carregamentos distribuídos, com momentos mais elevados e com cisalhamento reduzido (região central do vão), é mais comum o aparecimento de fissuras de flexão, definidas por (c).

Nas regiões de transição entre (a) e (c) as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento, e neste caso a tensão de cisalhamento é mais elevada, conforme notado em (b). Estas fissuras são denominadas fissuras de cisalhamento e de flexão, pois há uma interação dos mecanismos, e desse modo nem sempre é bem definido o mecanismo de ruptura que ocorre por uma combinação.

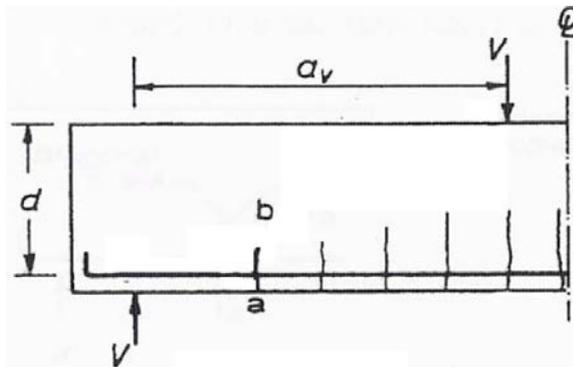
Os esforços de torção, quando existirem, podem causar fissuras e a ruptura do elemento.

Em lajes com o capeamento estrutural, quando o elemento é submetido a um esforço de flexão, a tensão de cisalhamento entre a capa e a laje aparece, e caso o valor resistente do concreto seja superado, ocorrerá a separação entre elas.

O modo de falha de um elemento está diretamente relacionado a distância  $a_v$  entre o ponto de aplicação do carregamento e o apoio, e a altura  $d$  da laje.

Elementos com uma relação  $a_v/d > 6$ , normalmente tendem a entrar em colapso por um mecanismo de flexão, e fissuras como as expostas na Figura 2.7 tendem a aparecer.

**Figura 2.7: Elemento com fissuras típicas de flexão.**

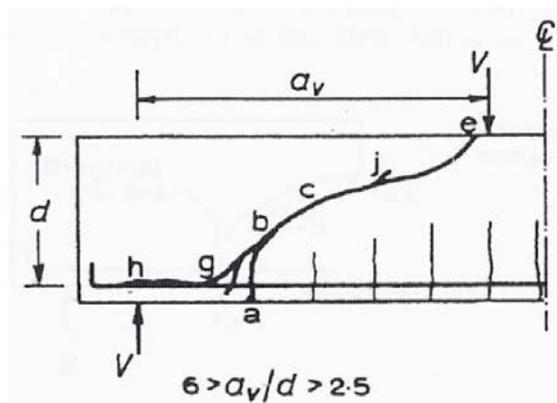


Fonte: KONG e EVANS (2001).

Elementos com uma relação  $6 > a_v/d > 2,5$ , Figura 2.8, normalmente tendem a entrar em colapso por um mecanismo de cisalhamento. Ao aumentar o valor da força  $V$ , a fissura (a-b) próxima ao apoio pode se propagar em direção ao ponto de aplicação de carga (e) tornando se uma fissura inclinada, e sendo denominada fissura de cortante com interação de flexão ou simplesmente fissura diagonal. Com um aumento ainda maior da força  $V$  a ruína pode ocorrer de duas maneiras:

- i. Se  $a_v/d$  for relativamente alto, a fissura (a-b) pode rapidamente se propagar até (e) causando a ruína do elemento, e a esse modo de ruptura é dado o nome de Falha por Tração Diagonal;
- ii. Se  $a_v/d$  for relativamente baixo, a fissura diagonal tende a parar em algum lugar próximo a (j), e um número aleatório de fissuras deve se formar em torno da cordoalha. Se  $V$  continuar a ser aumentado, a fissura diagonal irá caminhar ao longo da armadura na região representada por (g-h). O acúmulo de tensão na cordoalha causa a sua perda de aderência com o concreto desencadeando o seu deslocamento e determinando o colapso do elemento.

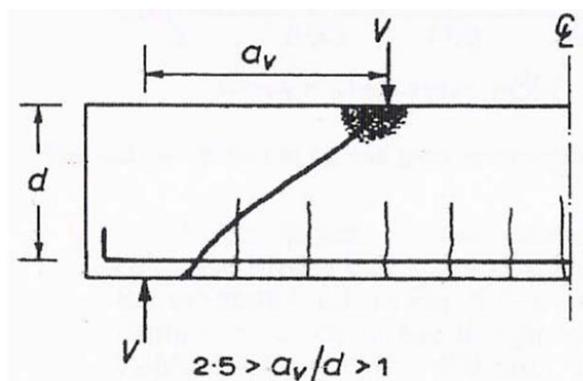
Figura 2.8: Elemento com combinação de fissuras.



Fonte: KONG e EVANS (2001).

Elementos com uma relação  $2,5 > a_v/d > 1$ , normalmente tendem a entrar em colapso por um mecanismo de cisalhamento, que é independente das fissuras de flexão. Ao aumentar a força  $V$ , a fissura se propaga até a região de aplicação do carregamento, onde há um acúmulo de tensões, e causa a ruptura do elemento, que pode ser explosiva, conforme Figura 2.9.

Figura 2.9: Elemento com fissuras tipicamente de esforço cortante.



Fonte: KONG e EVANS (2001).

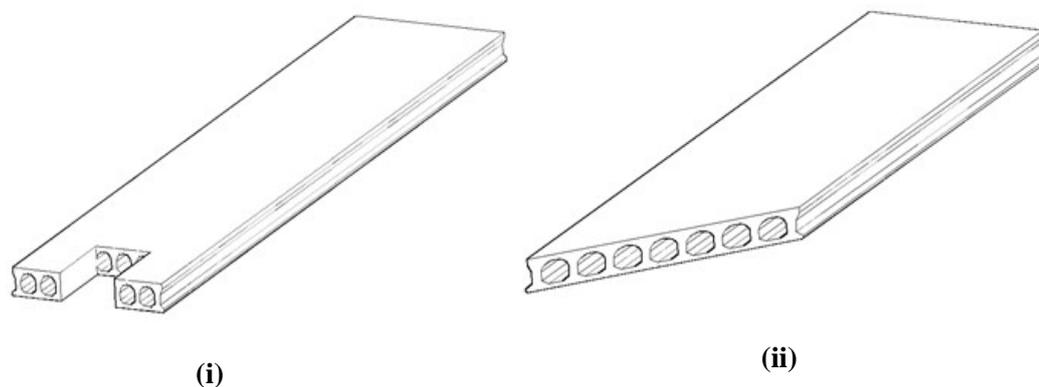
Para o caso particular onde a relação  $a_v/d < 1$ , ao carregamento é transferido diretamente para o apoio, e a ruptura do elemento ocorre por compressão do concreto.

## 2.2 Aberturas e cortes oblíquos em LAPs

De modo geral, com o intuito de compatibilizar a estrutura com a arquitetura e instalações, se faz necessário a execução de aberturas ao longo

da região abrangida pela LAP, conforme mostrado na Figura 2.10 (i). Essas passagens são basicamente destinadas a abrigar as instalações, equipamentos ou até mesmo outros elementos estruturais. Ainda, visando a compatibilização, comumente é realizado o corte transversal no topo da laje em um ângulo diferentes de 90° a fim de se adequar à arquitetura, conforme mostrado na Figura 2.10 (ii).

**Figura 2.10: Exemplo de abertura (i) e de corte oblíquo (ii) em LAP.**



**Fonte: O AUTOR.**

Diversos tipos de aberturas e recortes podem ser executados conforme as especificações de projeto e de fabricação. Os métodos executivos e limites permitidos variam conforme o fabricante, manual técnico e norma técnica. Neste item serão abordadas algumas recomendações.

## **2.2.1 Recomendações normativas**

A seguir são apresentadas as principais recomendações normativas a respeito de cortes e aberturas em LAPs.

### **2.2.1.1 ABNT NBR 6118:2014**

A ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, aborda lajes com furos e aberturas em lajes maciças, e prescreve o reforço dessas regiões conforme a Figura 2.11.

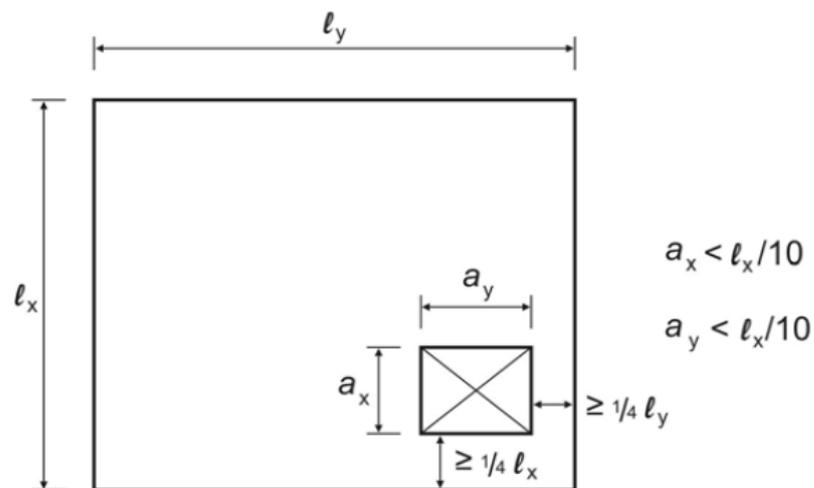


a) as dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor ( $l_x$ ), conforme a Figura 2.12;

b) a distância entre a face de uma abertura e uma borda livre da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada;

c) a distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão.

**Figura 2.12: Dimensões limites para aberturas de lajes com dispensa de verificação.**



**Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).**

De maneira geral os furos tem dimensões relativamente pequenas em relação a laje, enquanto as aberturas não. Um conjunto de furos muito próximos entre si deve ser tratado como uma abertura.

### **2.2.1.2 ABNT NBR 9062:2006**

Segundo a ABNT NBR 9062:2006 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado- é admissível a utilização na obra de elementos fora das tolerâncias definidas, desde que não comprometam o desempenho estrutural, arquitetônico, ou a durabilidade da obra como um todo. É necessário existir a comprovação do desempenho do elemento estrutural por parte do responsável pelo projeto estrutural.

### **2.2.1.3 ABNT NBR 14861:2011**

Segundo a norma técnica nacional ABNT NBR 14861:2011 Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e

procedimento, item 8.9, as aberturas e recortes em lajes alveolares devem ser definidos na fase de projeto.

As especificações devem constar do projeto de fabricação das lajes, e caso haja a necessidade de execução de aberturas e recortes, em uma fase posterior a de projeto e produção, em outras palavras, durante a obra, as modificações devem ser encaminhadas para avaliação do projetista.

As aberturas também possuem tolerâncias para a variação de formato, sendo admissível um desvio de  $\pm 20$  mm em relação às dimensões definidas em projeto. Contudo, para o caso de lajes com cortes em diagonal (oblíquos), as tolerâncias podem sofrer variações em relação ao especificado pela norma.

De acordo com o item 14.4.4 da ABNT NBR 14861:2011, quando forem realizadas aberturas no concreto em seu estado fresco, deve-se assegurar que o concreto vizinho ao serviço não seja danificado. Ao danificar, por exemplo, as paredes dos alvéolos junto aos recortes, pode-se também afetar a ancoragem das cordoalhas, que por sua vez podem ser reduzidas em uma situação mais desfavorável dos dois lados da abertura.

Algumas vezes um pré-corte feito no concreto fresco, em lajes espessas (com altura maior ou igual a 30 cm), é preferível para se evitar trincas transversais de retração, durante e após o processo de cura.

## **2.2.2 Recomendações de manuais técnicos**

A seguir são apresentadas as recomendações de manuais técnicos a respeito de cortes e aberturas em LAPs.

### **2.2.2.1 MUNTE**

As recomendações do Manual MUNTE de Projetos em Pré-Fabricados de concreto, em sua segunda edição publicada pela editora PINI em 2007, baseado na NBR 9062 e nos procedimentos da Munte (empresa que atuou no mercado nacional sendo instalada no país em 1975), contemplam as aberturas e recortes em lajes alveolares.

Os tipos de cortes mencionados são:

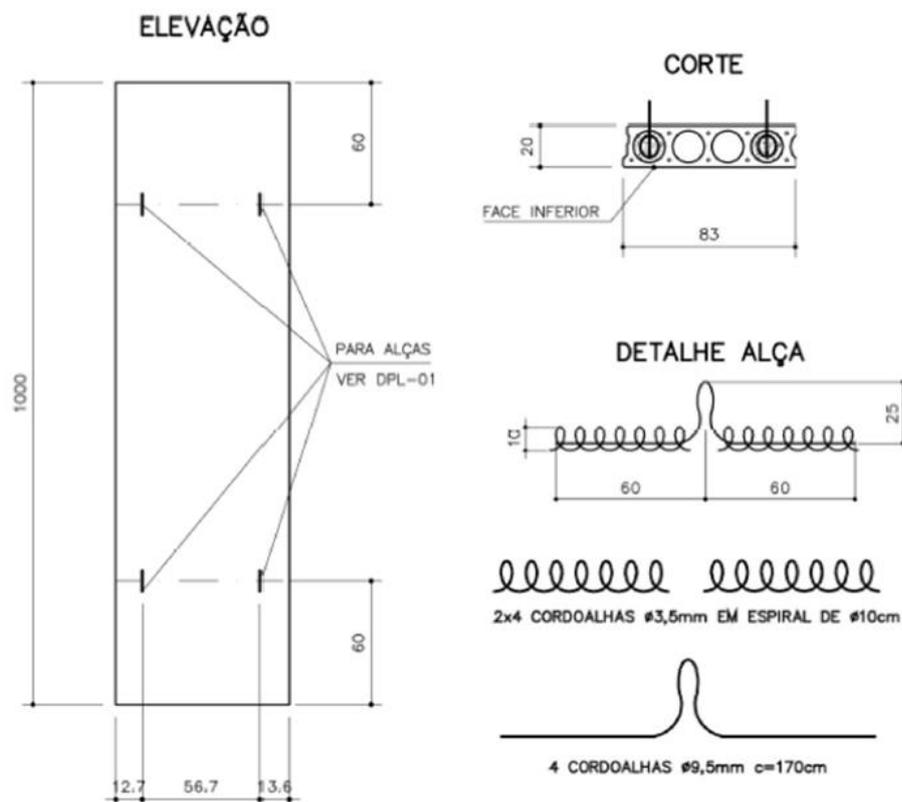
- a) Corte longitudinal: é a pior situação de corte em uma laje. Pela dificuldade de execução (maior quantidade de concreto que acarreta

um maior desgaste da serra) não se deve realizar o corte na região da nervura, mesmo que para isso a laje fique com uma dimensão inferior a necessária.

Para lajes cortadas longitudinalmente são permitidos recortes de adequação ao pilar somente na lateral já cortada, devendo permanecer 75% da largura da laje (após o corte longitudinal) com apoio em viga e/ou consolo no pilar.

Após ser cortada longitudinalmente, a laje fica insegura para o transporte e montagem, sendo sugerido um esquema de instalação de alça de içamento, conforme mostrado na Figura 2.13.

**Figura 2.13: Esquema de instalação de alças de içamento.**

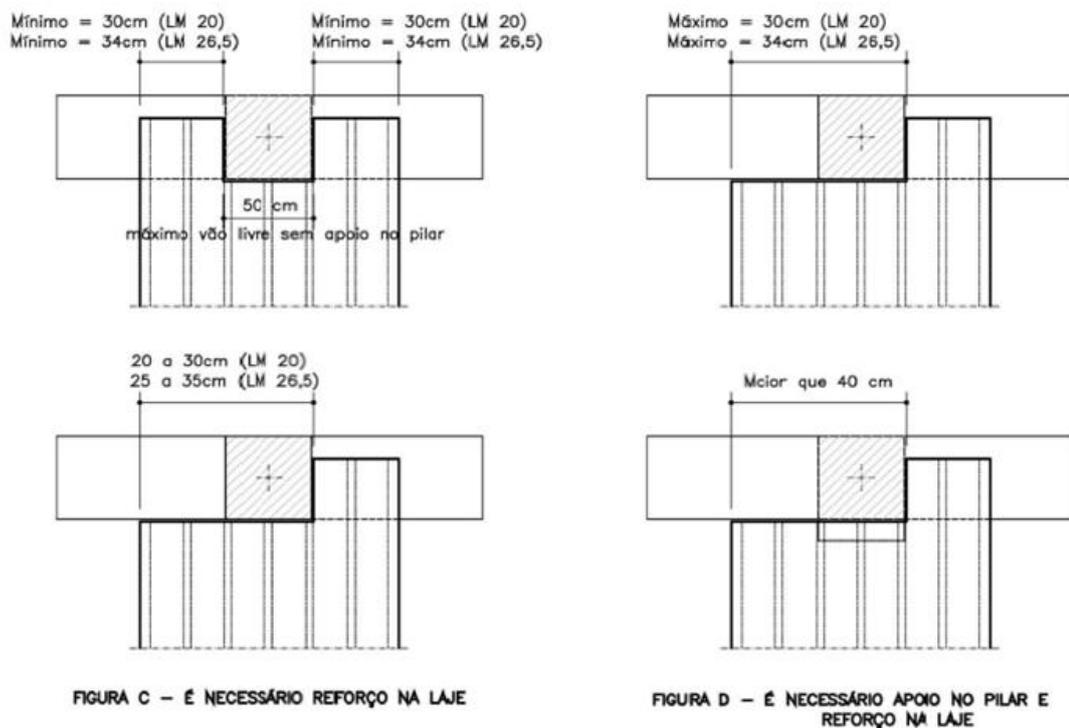


Fonte: MUNTE (2007).

A menor largura permitida para uma laje é de 400 mm, e caso seja necessário fazer o acerto da modulação menor que esta medida, contudo, superior a 250 mm (onde se realiza a concretagem *in loco* de uma laje maciça), deve-se recortar duas lajes e montá-las em locais separados no pano de laje.

b) Corte nas extremidades: é a situação que ocorre principalmente devido ao ajuste junto aos pilares. Para lajes com altura de 200 mm, este corte pode ter largura de até 200 mm. Para elementos com 265 mm de altura, a largura da abertura é de até 250 mm. Não se faz restrições quanto ao comprimento do corte. Quando os recortes forem maiores que as dimensões acima, o reforço é necessário e deve ser devidamente indicado em projeto. A Figura 2.14 apresenta exemplo e dimensões de aberturas com e sem a necessidade de reforço.

**Figura 2.14: Dimensão de aberturas com e sem necessidade de reforço.**



**Fonte: MUNTE (2007).**

O apoio mínimo para uma laje alveolar é de 66% de sua largura (790 mm), logo, é possível a existência de recortes em ambas as extremidades, desde que se respeite o valor mínimo do apoio.

A Tabela 2.1 apresenta as dimensões máximas de aberturas em lajes junto a pilares.

**Tabela 2.1 – Dimensões máximas de aberturas em lajes junto a pilares.**

	LM 20	LM 26,5
Máximo recorte sem qualquer reforço	$L \leq 20$ cm	$L \leq 25$ cm
Recorte com reforço na laje	$20 < L \leq 30$ cm	$25 < L \leq 34$ cm
Recorte com reforço na laje e apoio no pilar	$L > 41$ cm	$L > 41$ cm
Mínima faixa lateral junto ao pilar	$X \geq 30$ cm	$X \geq 35$ cm

**Fonte: MUNTE (2007).**

Um exemplo de projeto de reforço de lajes com altura 200 mm e 265 mm com aberturas frontais é apresentado no Anexo 3 deste trabalho. Para a situação em que a laje está sendo cortada em sua quina para encaixar no pilar, caso a abertura exceda 410 mm, seu apoio na viga fica comprometido, devendo assim existir um consolo para o apoio da laje também no pilar, mantendo uma largura mínima de apoio da laje de 790 mm. Quando o recorte na laje for central, o valor mínimo do apoio cai para 680 mm.

- c) Cortes laterais no vão da laje: em casos onde o pilar intermediário não possui apoio para receber a laje, esse tipo de corte é necessário. Sempre que a abertura ultrapassar 200 mm para lajes de altura 200 mm, e 250 mm para lajes de 265 mm, o reforço deverá ser feito.

Um exemplo de projeto de reforço de lajes com altura 200 mm e 265 mm com aberturas centrais é apresentado no Anexo 3 deste trabalho. A máxima abertura transversal permitida é de 410 mm para lajes de 200 mm de altura e 460 mm para lajes de 265 mm de altura.

O valor máximo de uma abertura lateral no sentido longitudinal deve ser de 620 mm.

Em casos onde sejam necessárias aberturas de maiores dimensões, o pilar intermediário deve possuir consolo no qual a laje (que será dividida em duas peças) irá apoiar.

### 2.2.2.2 FIB/FIP

Na Europa existe o manual da FIB/FIP:1992 - *Fédération internationale du béton/International Federation for Structural Concrete*, entidade europeia inaugurada em 1952, que faz observações sobre aberturas e furos em lajes alveolares.

Furos de pequena dimensão, menores que 300/400 mm, devem ser executados na laje durante o seu processo de fabricação com o concreto no estado fresco. A dimensão permitida para os furos depende do diâmetro dos alvéolos e da quantidade de cordoalhas retiradas, de modo a não comprometer a resistência da laje.

As dimensões normalmente são limitadas pelos valores apresentados pela Tabela 2.2.

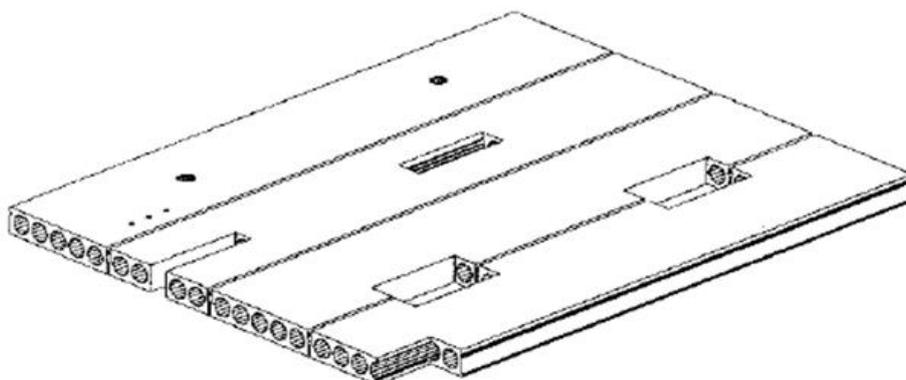
**Tabela 2.2 – Dimensões máximas de furos e aberturas**

Local da abertura/furo	Dimensão do furo: comprimento vs largura	
	Altura da laje [mm] 180 - 300	Altura da laje [mm] 400
Quina	600/400	600/300
Frontal	600/400	600/200
Lateral	1000/400	1000/300
Central (circular)	< 20mm	Φ 135
Central (retangular)	1000/400	1000/200

**Fonte: FIB/FIP (2013).**

Os furos e aberturas descritos acima são mostrados na Figura 2.15.

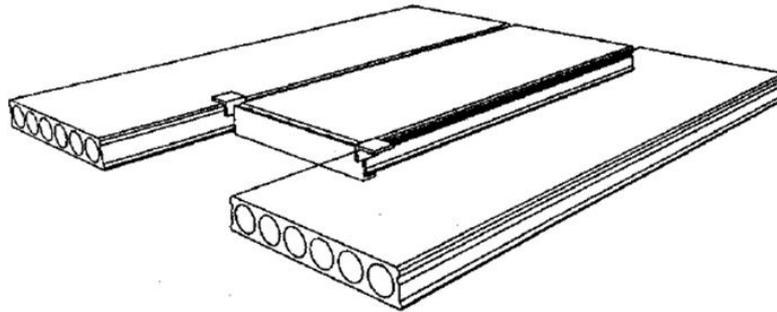
**Figura 2.15: Tipos de furos e aberturas em lajes.**



**Fonte: FIB/FIP (2013).**

Quando a abertura exceder os limites mostrados anteriormente, deve-se fazer uso de apoio metálico que irá transferir para as lajes adjacentes parte do peso próprio e carregamento da laje com a abertura, conforme a Figura 2.16.

**Figura 2.16: Uso de apoios metálicos para grandes aberturas.**



**Fonte: FIB/FIP (2013).**

Outra recomendação feita pela FIB/FIP é de que em locais de clima frio e úmido, durante o processo de montagem das lajes, pode ocorrer a entrada de água nos alvéolos, e caso esta venha a congelar e se expandir pode ocorrer o deslocamento da parte inferior do concreto da laje. Para evitar esse processo aconselha-se a realização de furos de drenagem localizados de 1000 a 1500 mm de distância entre si.

### **2.2.2.3 ASSAP**

A recomendação da ASSAP (*Association of Manufactures of Prestresses Hollow Core Floors*) uma associação italiana fundada em 1982, é de que a execução de cortes e aberturas devem ocorrer imediatamente após a concretagem do elemento, ou seja, com o concreto ainda em seu estado fresco.

O processo de abertura consiste basicamente na remoção do concreto ao redor dos cabos protendidos, permitindo assim o seu corte após a cura do concreto.

Para uma edificação o projeto deve ser compatível com a capacidade de carga da laje, limitada pelas aberturas realizadas, havendo portanto a necessidade de especificação em projeto.

Os cabos cortados na região da abertura, onde o concreto foi removido transferem a protensão para partes da laje que estão muito longe das

extremidades, criando esforços internos que podem conduzir a fissuras longitudinais que comprometem a integridade da laje.

Normalmente as aberturas pequenas nas lajes não geram problemas relevantes, desde que:

- As aberturas nas extremidades da laje não excedam 40 cm de comprimento ou largura;
- As aberturas ao longo do corpo da laje, e que envolvem os cabos de uma ou duas almas da LAP, não excedam 60 cm de comprimento;

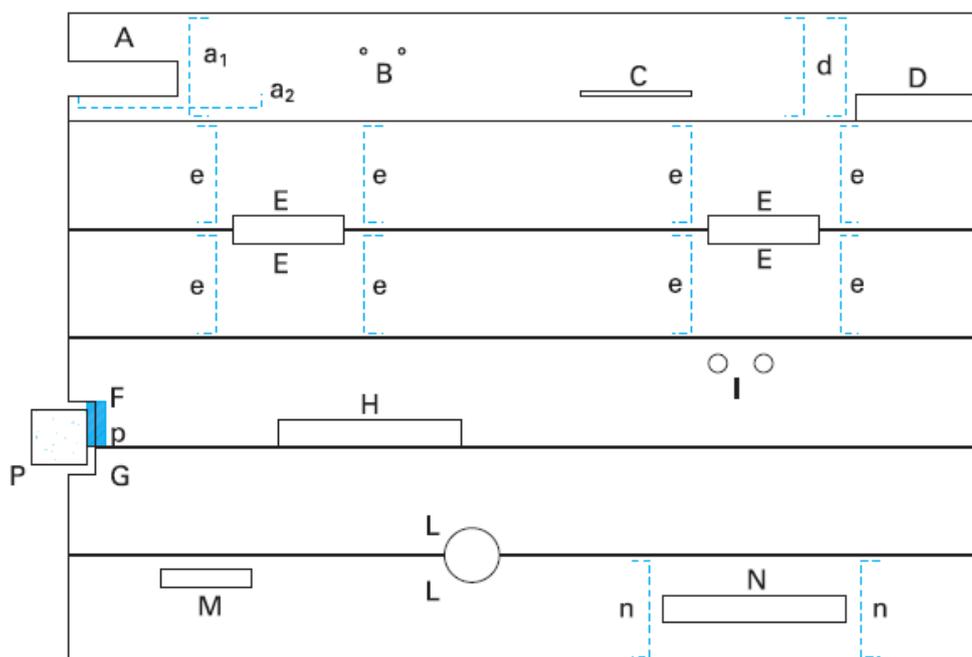
Para ambos os casos é recomendada a realização da verificação da capacidade de carga após a abertura.

Tratando-se de aberturas maiores, quase sempre é necessário armar a laje com armadura transversal, que deve ser introduzida ao elemento com o concreto ainda no estado fresco, Figura 2.17 (e).

Deve-se dar atenção especial às lajes localizadas nas extremidades de um pavimento. Aberturas laterais em lajes de borda devem ser evitadas, a não ser que a rigidez adequada seja aplicada.

Também é necessário prever os pontos de içamento da laje, de modo a fornecer uma garantia de equilíbrio do elemento.

**Figura 2.17: Exemplo de aberturas em lajes alveolares de 120 cm de largura.**



Fonte: ASSAP (2002).

Algumas precauções devem ser tomadas em relação a aberturas em lajes:

- Corte A – pode ter aberturas de até 40 cm de extensão, e deve estar a uma distância de no mínimo 30 cm da lateral da laje.
- Quando seu comprimento for maior que 50 cm, há a necessidade de reforço com armadura transversal em ( $a_1$ ) e longitudinal ( $a_2$ ). É necessário ainda realizar a verificação ao esforço cortante.
- Abertura B - quando sua largura envolver apenas um alvéolo, não há problemas.
- Ranhura C – quando sua largura envolver apenas um alvéolo, não há contra indicações.
- Corte D – não deve ser maior, em largura, do que 40 cm, necessidade de reforço com armadura transversal em (d). A verificação ao esforço cortante é indispensável.
- Abertura E – a abertura de cada metade recortada nunca deve ser maior que 40 cm. Reforço com armadura transversal em (e) e verificação da capacidade de suporte de carga são indispensáveis.
- Corte F – é destinado ao encaixe de pilar pré-fabricado (P). Os cortes grandes (F) devem apoiar-se em suportes metálicos fixados no pilar.
- Corte G – quando a abertura for menor que 40x40 cm, não há verificações, com exceção da verificação ao esforço cortante.
- Corte H – quando a largura for  $\leq 20$  cm, não é necessário verificações especiais, exceto o cálculo da capacidade de carga.
- Abertura I – aberturas executadas *in loco* são muito comuns para a passagem das instalações e é indispensável a verificação devido ao corte de cabos.
- Abertura (metade de abertura) L – o raio não deve ser maior que 40 cm. Necessidade de verificar a capacidade de carga.
- Abertura M e N – a largura não deve ser maior que 30 cm. Necessidade de verificar a capacidade de carga. Se o comprimento for superior a 60 cm, é necessário o reforço com armadura transversal. Estas aberturas também podem ser feitas *in loco*.

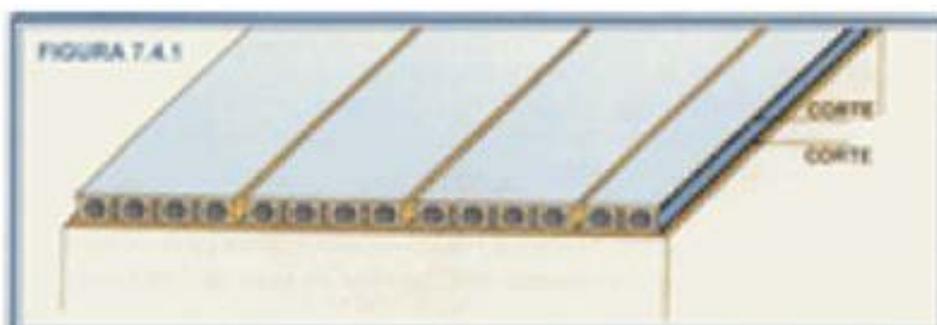
#### 2.2.2.4 AIDEPLA

A recomendação da AIDEPLA (*Asociación para La investigación y desarrollo de las Placas Alveolares*) uma associação espanhola pertencente a ANDECE (*Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón*) responsável pelo desenvolvimento do pré-fabricado no país, é de que a execução de cortes e aberturas ocorram somente quando não houver outra opção, tendo em vista o alto custo de execução. Preferencialmente as aberturas e cortes devem ser feitos no momento da fabricação do elemento.

Os tipos de aberturas e de corte abordados são:

- a) Corte longitudinal paralelo a lateral da laje: são cortes executados com o objetivo de adequar a modulação do pano de laje, conforme exposto na Figura 2.18.

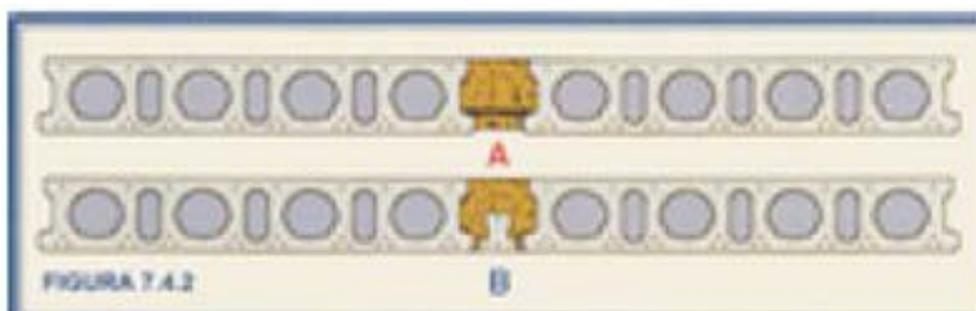
**Figura 2.18: Corte longitudinal.**



Fonte: AIDEPLA (2008).

A Figura 2.19. apresenta o caso onde há perda na precisão da dimensão do elemento cortado.

**Figura 2.19: Ajuste da dimensão por meio da chave de cisalhamento.**



Fonte: AIDEPLA (2008).

Para este caso, o ajuste da modulação do pano de laje pode ser feito por meio da chave de cisalhamento.

- b) Corte oblíquo: corte executado para viabilizar o uso de lajes alveolares em locais que possuam apoios oblíquos, como visto na Figura 2.20.

**Figura 2.20: Corte oblíquo em laje alveolar.**



Fonte: AIDEPLA (2008).

Este tipo de corte deve ser realizado na pista de concretagem com o concreto endurecido e por meio de um serra.

O corte em ângulo pode gerar tensões diferenciais entre as laterais da laje, limitando desse modo o ângulo de corte. Quando possível é recomendado que o apoio possua uma região oblíqua que melhor se adapte uma laje com extremidade cortada em ângulo reto, conforme a Figura 2.21.

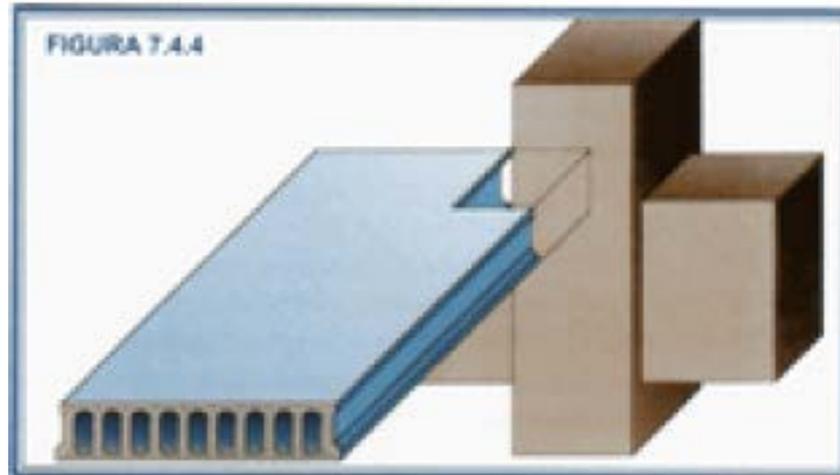
**Figura 2.21: Apoio oblíquo para lajes com ângulo reto.**



Fonte: AIDEPLA (2008).

- c) Encaixes: cortes que possuem o objetivo de encaixar a laje em outras estruturas, como pilares, condutores, instalações, dentre outros, conforme apresentado pela Figura 2.22.

**Figura 2.22: Encaixe.**

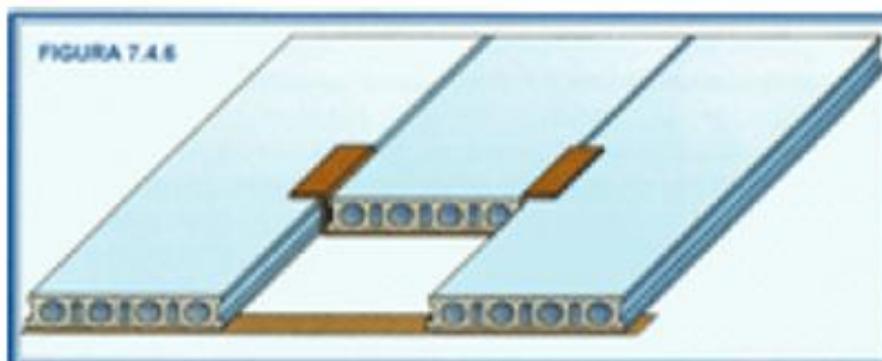


**Fonte: AIDEPLA (2008).**

Podem ser realizados na obra com o corte do concreto no estado endurecido ou na fábrica com o concreto em seu estado fresco. Por extrair nervuras e cordoalhas, deve-se realizar uma análise da resistência da laje após o corte.

- d) Grande abertura: deve-se fazer uso de apoio metálico, conforme a Figura 2.23.

**Figura 2.23: Detalhe de apoio metálico para grandes aberturas.**



**Fonte: AIDEPLA (2008).**

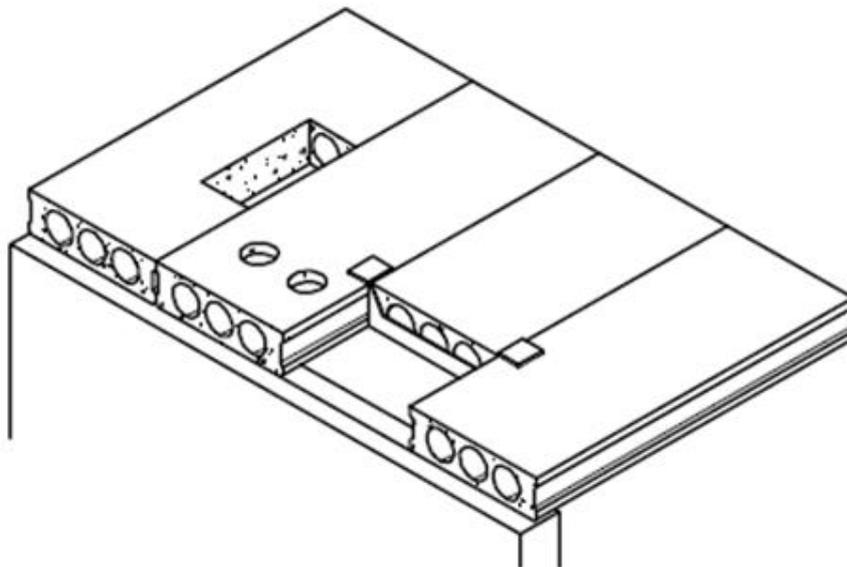
O apoio metálico irá transferir para as lajes adjacentes parte do peso próprio e carregamento da laje com a abertura.

### 2.2.2.5 PCI

A recomendação do PCI (*Precast/Prestressed Concrete Institute*) é de que a execução de aberturas em lajes de piso ou forro sejam feitas na fábrica e que furos de até 8" ( 25,4 mm) sejam executados em obra.

Na Figura 2.24 são apresentados exemplos de furos, aberturas e grandes aberturas em lajes.

**Figura 2.24: Exemplo de aberturas, grandes aberturas e furos em lajes alveolares.**

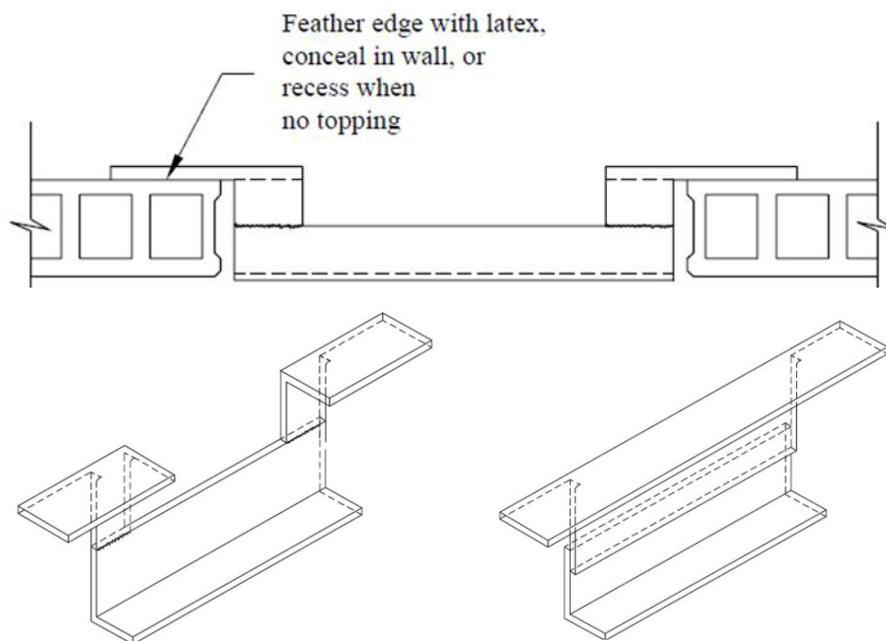


Fonte: PCI (2004).

Ao executar os furos em obra, deve-se evitar o corte das cordoalhas protendidas.

Para grandes aberturas deve-se fazer uso de apoio metálico que irá transferir para as lajes adjacentes parte do peso próprio e carregamento da laje com a abertura, conforme a Figura 2.25.

**Figura 2.25: Detalhe e tipos de apoios metálicos para grandes aberturas.**



**Fonte: PCI (2004).**

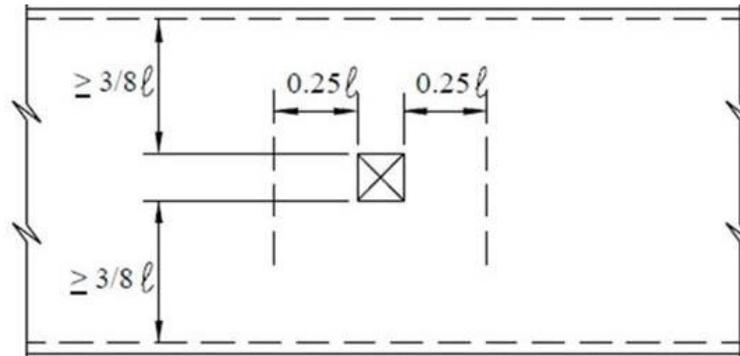
Recomenda-se que a execução das aberturas seja feita de modo que sua maior dimensão esteja paralela à maior dimensão da laje, assim será retirado o menor número possível de nervuras e cordoalhas protendidas.

Quando possível, é recomendado que se execute furos (tantos quantos necessários) que não atinjam as cordoalhas, ao invés de grandes aberturas.

As aberturas causam a concentração de carregamento que pode ser distribuído ao longo de todo o sistema de lajes, tendo em vista que após a execução da chave de cisalhamento e da capa estrutural, o sistema de lajes alveolares pode ser considerado como monolítico, em outras palavras, uma laje é capaz de transferir esforços e carregamentos a outra. Contudo, essas concentrações de carregamento podem gerar o esforço de torção, portanto, para a determinação da resistência ao esforço cortante, deve-se levar em conta a torção na tensão de cisalhamento. Na determinação da resistência a flexão, deve-se levar em conta o comprimento da abertura e o comprimento disponível de ancoragem da cordoalha tomada do final da abertura até o ponto de momento máximo. Algumas recomendações para aberturas, com base em lajes já montadas (com chave de cisalhamento e capa estrutural) e considerando o pano de laje como um todo, são apresentadas a seguir:

- a) Aberturas pequenas localizadas na região central do vão: na flexão o carregamento pode ser resistido pelas lajes desde que a abertura esteja posicionada numa região do vão localizada a pelo menos  $0.25\ell$  das laterais (direção perpendicular aos apoios), e a  $\geq 3/8\ell$  dos apoios, sendo  $\ell$  o vão entre os apoios, como exposto na Figura 2.26.

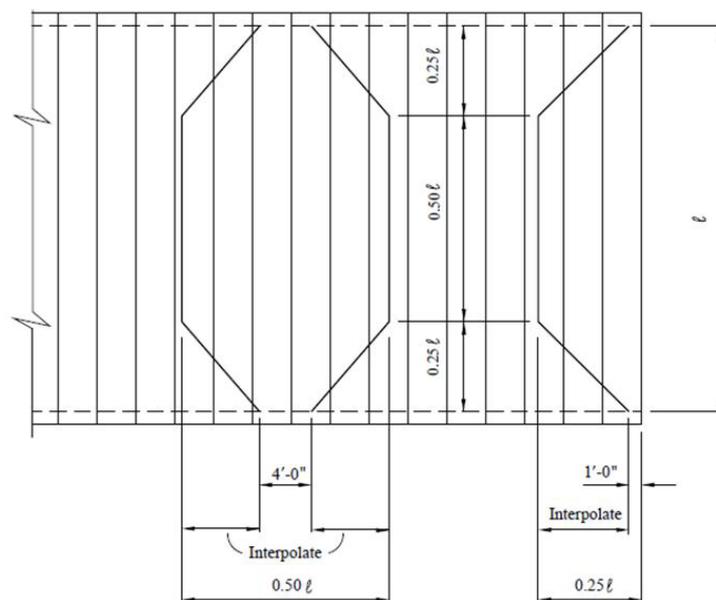
**Figura 2.26: Detalhe de abertura pequena.**



**Fonte: PCI (2004).**

A seção resistente mostrada na Figura 2.27 deverá ser utilizada quando cargas não uniformes ocorrerem perto da abertura,.

**Figura 2.27: Largura efetiva resistente de uma laje para um carregamento em qualquer localização ao longo do vão.**

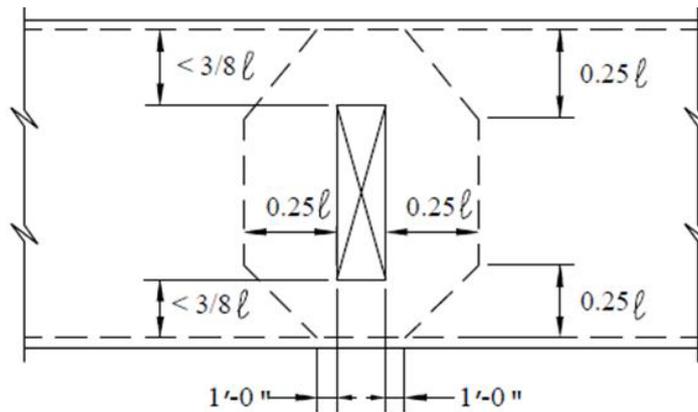


**Fonte: PCI (2004).**

Para estes casos, onde existem apenas carregamentos uniformes, não são necessárias considerações especiais para o cisalhamento quando.

- b) Aberturas localizadas mais próximas ao apoio: para o caso de aberturas posicionadas à uma distancia  $< 3/8\ell$  dos apoios, sendo  $\ell$  o vão entre os apoios, como mostrado na Figura 2.28.

**Figura 2.28: Detalhe de abertura localizada mais próxima ao apoio.**

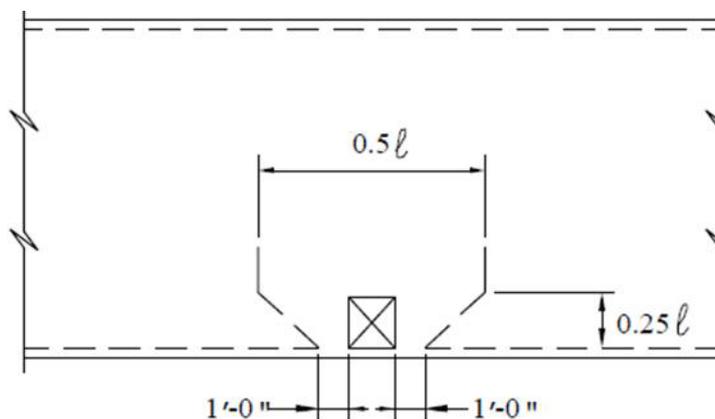


Fonte: PCI (2004).

A capacidade de cisalhamento será reduzida e deverá ser considerado que haverá torção nas lajes adjacentes.

- c) Aberturas localizadas no apoio: para o caso de aberturas localizadas na região do apoio, haverá redução ainda maior da resistência ao esforço cortante, além de causar torção nas lajes adjacente, conforme mostrado na Figura 2.29.

**Figura 2.29: Detalhe de abertura sobre o apoio.**



Fonte: PCI (2004).

Quando a abertura não ultrapassar uma distancia de  $0,125 \ell$  ou 1200mm, do apoio ao centro da laje, seu efeito na resistência à flexão pode ser desconsiderado.

### 2.2.2.6 SESOC/NZCS

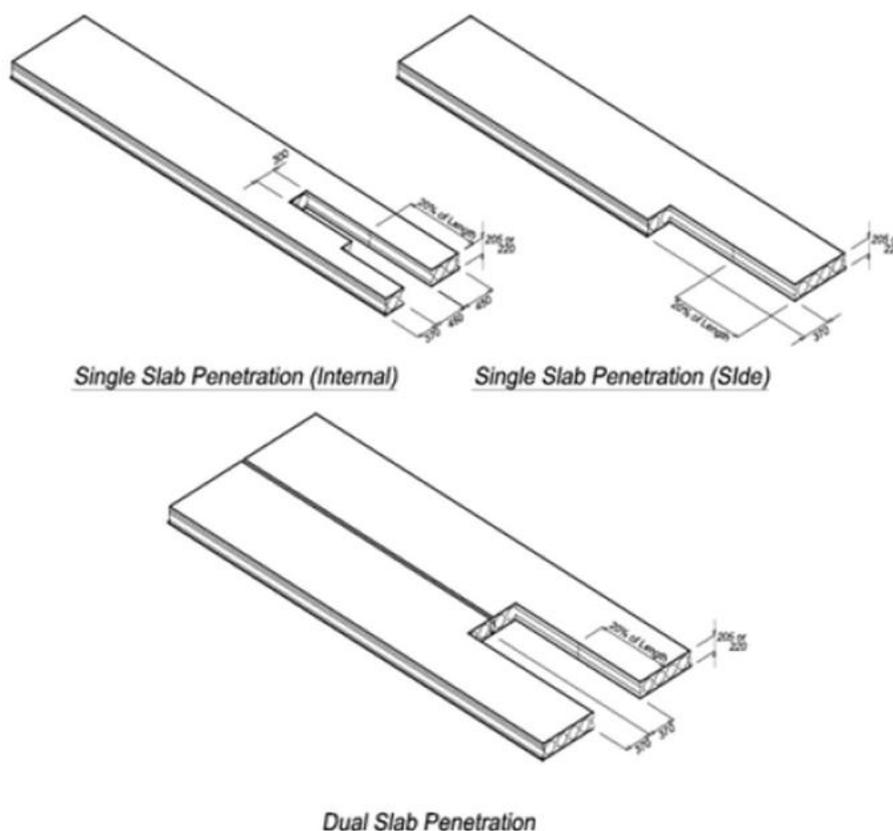
A recomendação do SESOC/NZCS (*Structural Engineering Society of New Zealand/New Zealand Concrete Society*) da Nova Zelândia, em seu manual de desempenho de lajes alveolares em situação sísmica, é de que a execução de aberturas em lajes é permitida para possibilitar a passagem de instalações e evitar o conflito com outras estruturas.

A execução de aberturas deve ser feita somente com o conhecimento do projetista e da empresa de pré-fabricados.

De maneira simplificada, ao efetuar o corte de uma nervura ou grupo de cordoalhas, a capacidade de resistência ao esforço de flexão da laje é proporcionalmente reduzida.

Possíveis aberturas são mostradas na Figura 2.30.

**Figura 2.30: Exemplo de aberturas em lajes alveolares.**



Fonte: SESOC/NZCS (2009).

A capacidade de resistência ao esforço cortante da seção modificada, após se executar a abertura, deverá ser tratada como no caso em que se tem a perda de apoio do elemento. Para esses casos, a força cortante que seria resistida pelas nervuras e cordoalhas (protensão) extraídas, agora deve ser absorvida pelas remanescentes.

### 2.2.3 Recomendações de fabricantes

A seguir são apresentadas as principais recomendações de fabricantes a respeito de cortes e aberturas em LAPs.

#### 2.2.3.1 CONCRETECH

Por meio do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, as especificações para a execução de aberturas em LAPs são abordadas pela indústria norte americana de pré-fabricados CONCRETECH (*Concrete Technology Corporation*), sendo a primeira empresa de protendidos dos EUA e que atua no mercado desde 1951.

Os grandes furos e aberturas devem ser executados em fábrica, mediante especificação em projeto, para aberturas superiores a 8 polegadas (203,2 mm) de diâmetro ou de largura. Aberturas e cortes inferiores a estas dimensões devem ser executados no local da obra.

Aberturas e recortes que envolvam as cordoalhas protendidas devem ser aprovadas pelo responsável técnico antes de sua execução.

O valor máximo para a abertura em uma laje de 4' 0" (1219,2 mm) é de 1' 10" (558,8 mm), conforme a Figura 2.31.

Figura 2.31: Dimensão máxima para abertura em LAP sem uso de apoio metálico.

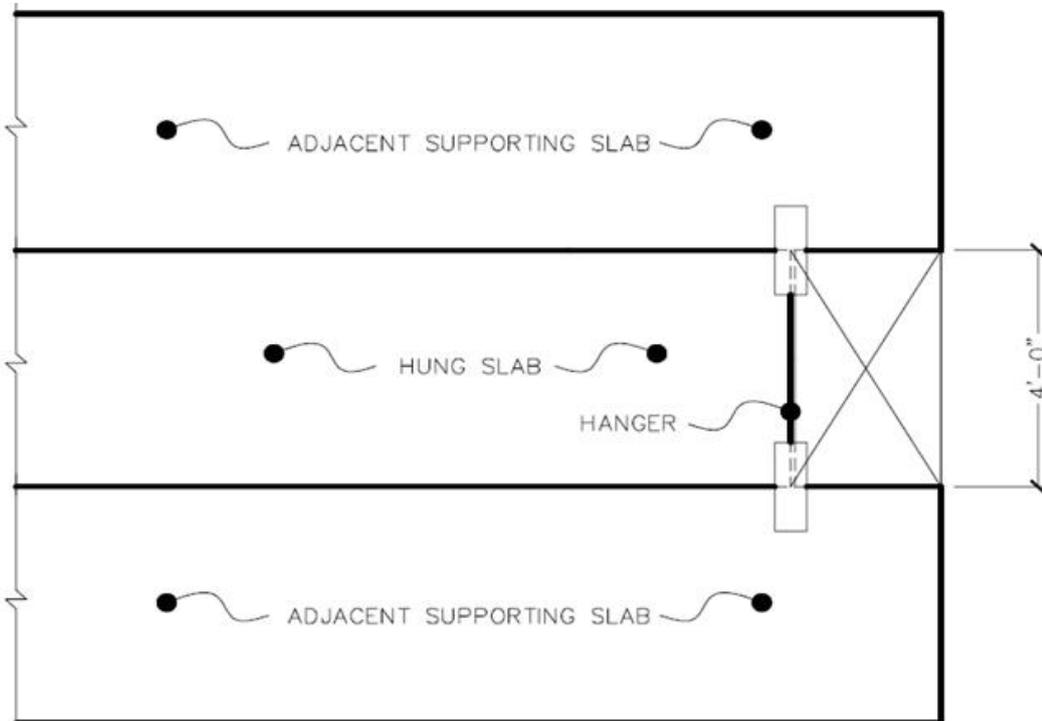


Fonte: CONCRETECH (2007).

Para aberturas superiores a 558,8 mm se faz necessário o uso de uma laje de comprimento menor em relação as demais lajes, formando desse modo uma abertura no pavimento, com a mesma largura de um elemento de laje, apoiada por meio de um suporte metálico que transfere parte do peso próprio e carregamento da laje de menor dimensão às lajes vizinhas.

O valor do peso próprio e carregamento transferido as lajes adjacentes à abertura, devem ser levados em conta no calculo destas lajes, e são admitidos como cargas pontuais na região de contato entre o apoio metálico e as lajes vizinhas à abertura, conforme a Figura 2.32.

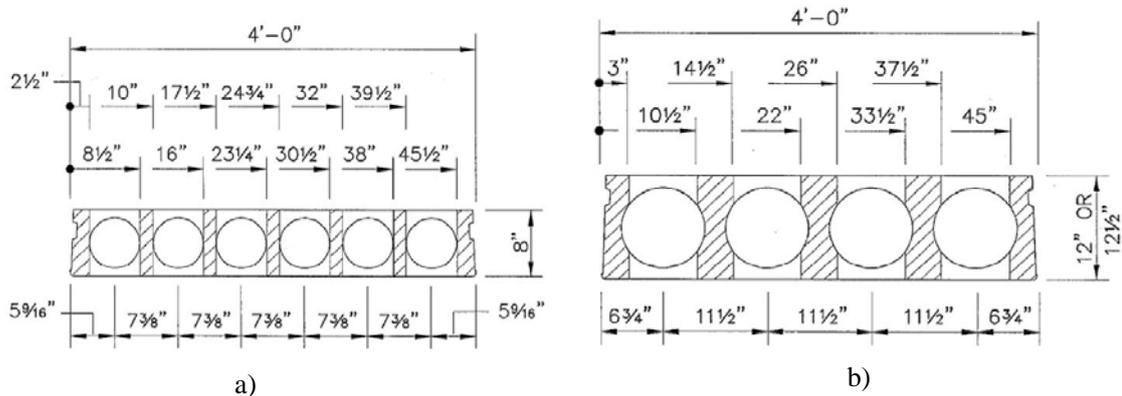
**Figura 2.32: Abertura formada por laje apoiada por meio de suporte metálico.**



**Fonte: CONCRETECH (2007).**

Para os furos nas lajes, são apresentados os locais indicados para a sua execução, conforme Figura 2.33.

**Figura 2.33: Indicação dos locais de realização de furos. a) lajes de altura nominal 200mm; b) lajes de altura nominal 300mm.**



Fonte: CONCRETECH (2007).

A região hachurada indica os locais em que os furos devem ser evitados.

### 2.2.3.2 HOLLOWCORE

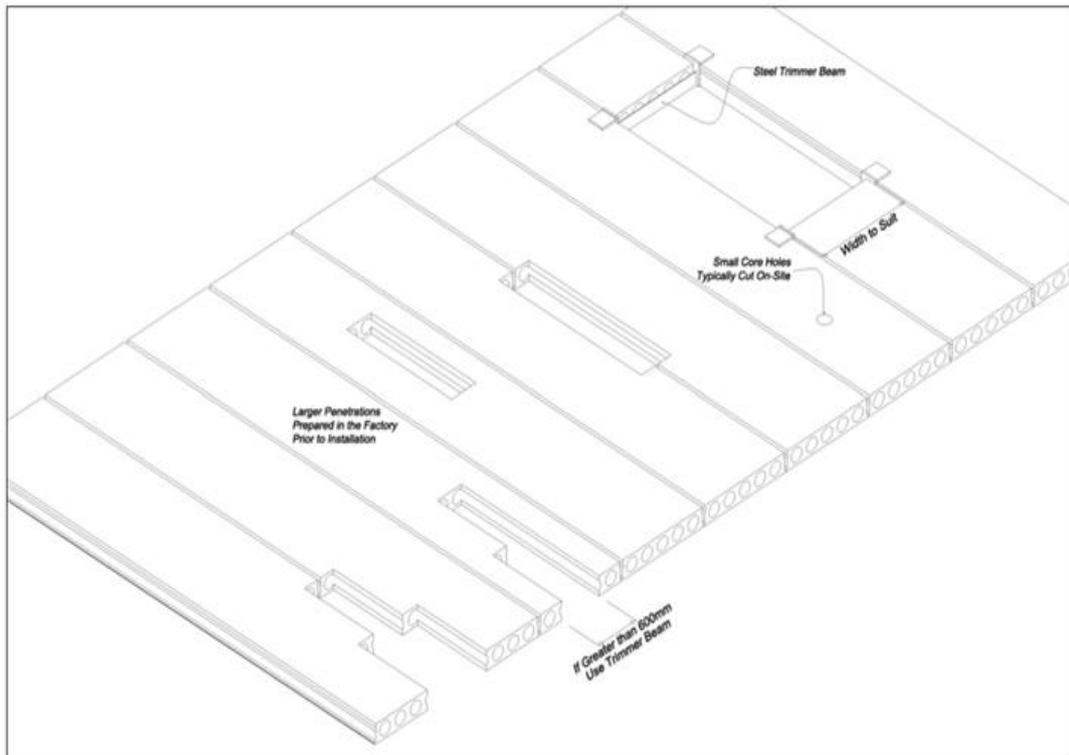
Por meio do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, as especificações para a execução de aberturas em LAP é abordada pela indústria australiana de pré-fabricados HOLLOWCORE (*Hollow Core Concrete Pty. Ltd.*), no mercado desde 1988.

Os modelos mais comuns de aberturas são os furos executados no canteiro de obras, que não devem possuir mais do que 120 mm de diâmetro (para lajes de altura nominal 205 e 220 mm) e 160 mm de diâmetro (para lajes de altura nominal 300 e 400 mm), e são executados por meio de furação na região do alvéolo. De modo geral em torno de 65% da seção da laje pode ser furada sem sofrer nenhum dano estrutural significativo. Caso o furo seja maior do que o estipulado acima, ou a nervura ou cabos sejam cortados, o fabricante deve ser informado.

Para a execução das aberturas, estas devem ser previstas na fase de projeto para que a redução do número de nervuras e cordoalhas da seção sejam levados em consideração.

Em caso de abertura de maior dimensão, deve-se usar um apoio metálico, onde parte do peso próprio da laje com abertura e seu carregamento serão transferidos às lajes adjacentes, conforme a Figura 2.34.

**Figura 2.34: Aberturas, furos e apoios por meio de suporte metálico em LAPs.**

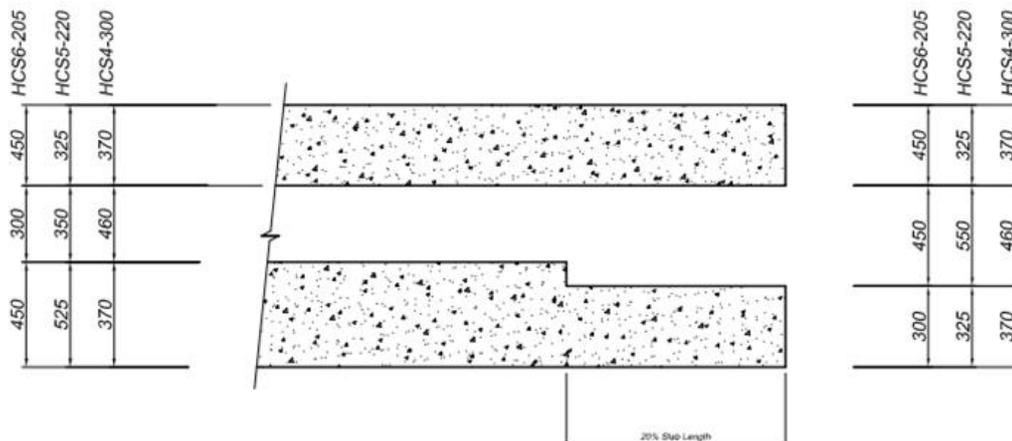


**Fonte: HOLLOWCORE (2016).**

O método de uso de apoios metálicos é o mais eficiente economicamente e possui maior praticidade.

A Figura 2.35 apresenta o valor máximo das dimensões de aberturas em uma laje isolada.

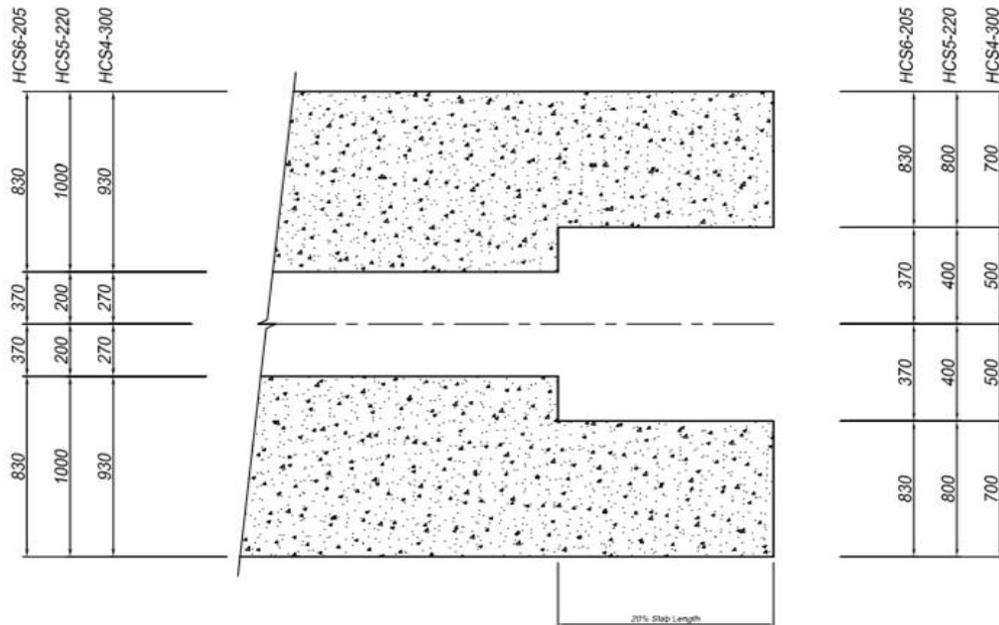
**Figura 2.35: Dimensão de abertura em uma laje.**



**Fonte: HOLLOWCORE (2016).**

A Figura 2.36 apresenta o valor máximo das dimensões de aberturas em duas lajes adjacentes.

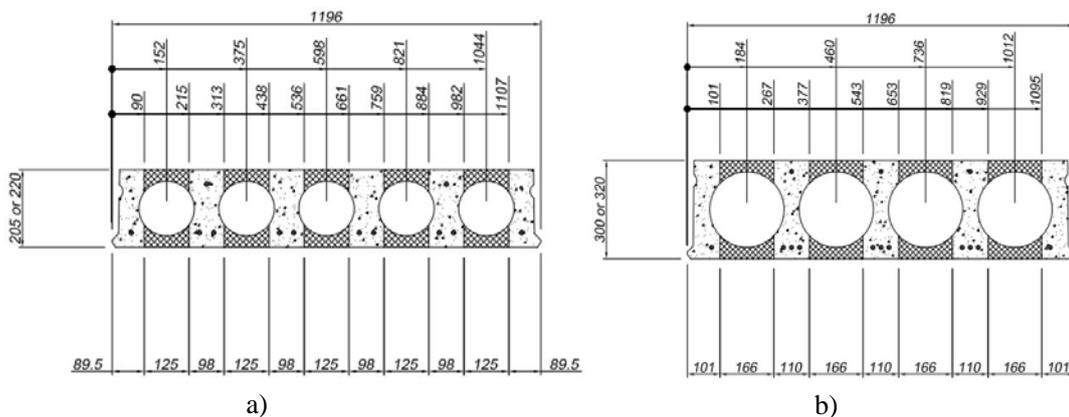
**Figura 2.36: Dimensão de abertura em duas lajes.**



**Fonte: HOLLOWCORE (2016).**

Para os furos nas lajes, são apresentados os locais indicados para a sua execução, conforme Figura 2.37.

**Figura 2.37: Indicação dos locais de realização de furos. a) lajes de altura nominal 200mm; b) lajes de altura nominal 300mm.**



**Fonte: HOLLOWCORE (2016).**

A região hachurada indica os locais em que os furos devem ser executados.

### 2.2.3.3 BISON

Por meio do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, as especificações para a execução de aberturas em LAPs é abordada pela indústria do Reino Unido de pré-fabricados BISON (*Bison Concrete Products Ltd.*), no mercado desde 1919.

As aberturas quando realizadas devem possuir verificação em projeto da capacidade de suporte das lajes, e em caso de grandes aberturas apoios metálicos são indicados, conforme a Figura 2.38.

**Figura 2.38: Apoio metálico para laje.**



**Fonte: BISON (2007).**

Furos com diâmetro inferior a 60mm podem ser executados na obra, evitando atingir a armadura.

### 2.2.3.4 CONSOLIS

Por meio do guia de especificações técnicas da indústria europeia CONSOLIS (*High-performance Precast Concrete Solutions*), que possui mais de 50 fábricas, estando presente em 11 países, são feitas as recomendações para as dimensões de furos e aberturas em lajes alveolares.

As aberturas quando realizadas devem possuir as mesmas dimensões apresentadas pelo manual FIB/FIP (2013), conforme se verifica na Tabela 2.3, normalmente são executadas na fábrica e com o concreto em seu estado fresco.

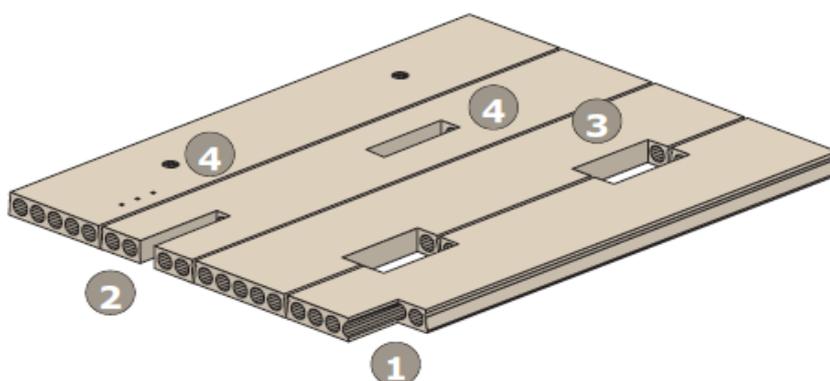
**Tabela 2.3 – Dimensões máximas de furos e aberturas.**

$l / b$	HC 180 - 300	HC 400
■ Corner (1)	600/400	600/300
■ Front (2)	600/400	600/200
■ Edges (3)	1000/400	1000/300
■ Center (4) - round holes - square openings	Core minus 20mm 1000/400	Ø 135 1000/200

Fonte: CONSOLIS/BETONIKA (2016).

Os tipos de furos e aberturas descritos acima são mostrados na Figura 2.39, e também seguem as prescrições da FIB/FIP (2013).

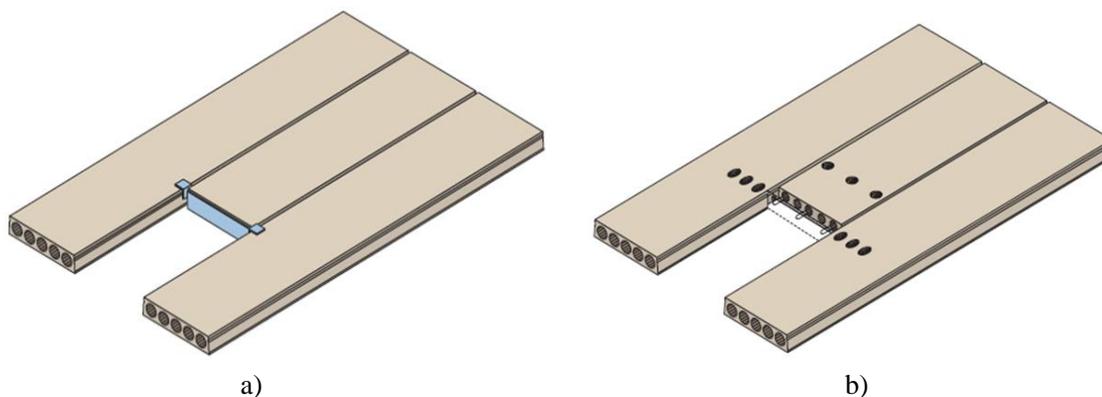
**Figura 2.39: Tipos de aberturas e furos em laje.**



Fonte: CONSOLIS/BETONIKA (2016).

Em caso de grandes aberturas, deve-se usar apoios metálicos ou vigas de concreto, conforme indicados na Figura 2.40.

**Figura 2.40: Grandes aberturas em laje: a) apoio metálico; b) viga de concreto.**



Fonte: CONSOLIS/BETONIKA (2016).

A Figura 2.41 apresenta um exemplo de obra que faz uso de apoios metálicos.

**Figura 2.41: Uso de apoio metálico.**



**Fonte: CONSOLIS/BETONIKA (2016).**

Para estes casos, o carregamento imposto as lajes com abertura é transferido as lajes adjacentes por meio do apoio metálico.

#### **2.2.4 Estudos sobre a execução de aberturas e cortes em LAP**

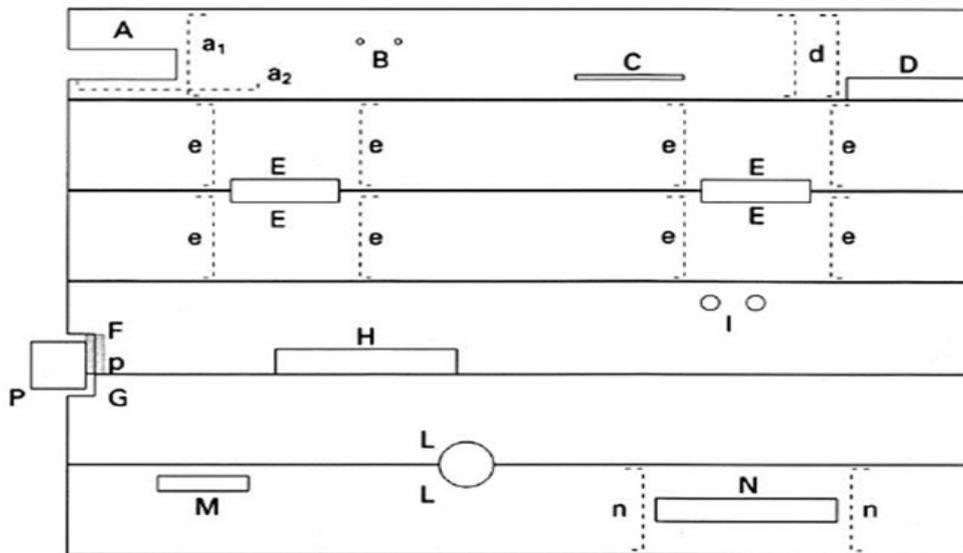
A seguir são apresentados os principais estudos sobre cortes e aberturas em LAP.

##### **2.2.4.1 Estudo numérico sobre o comportamento estrutural de lajes alveolares com pequenas aberturas**

O estudo: *Numerical study on the structural behaviour of hollow core slabs with small openings*, desenvolvido por Bernardi et al (2008), trata da influência de pequenas aberturas no comportamento estrutural de lajes alveolares.

Por meio da análise não linear de elementos finitos, diferentes dimensões e localizações de aberturas (com base nas ocorrências mais comuns do ponto de vista prático, conforme a Figura 2.42) foram estudadas.

**Figura 2.42: Tipos mais comuns de aberturas em LAP.**



**Fonte: BERNARDI *et al* (2008).**

Os pesquisadores fazem recomendações a respeito das dimensões e localização das aberturas, tais como:

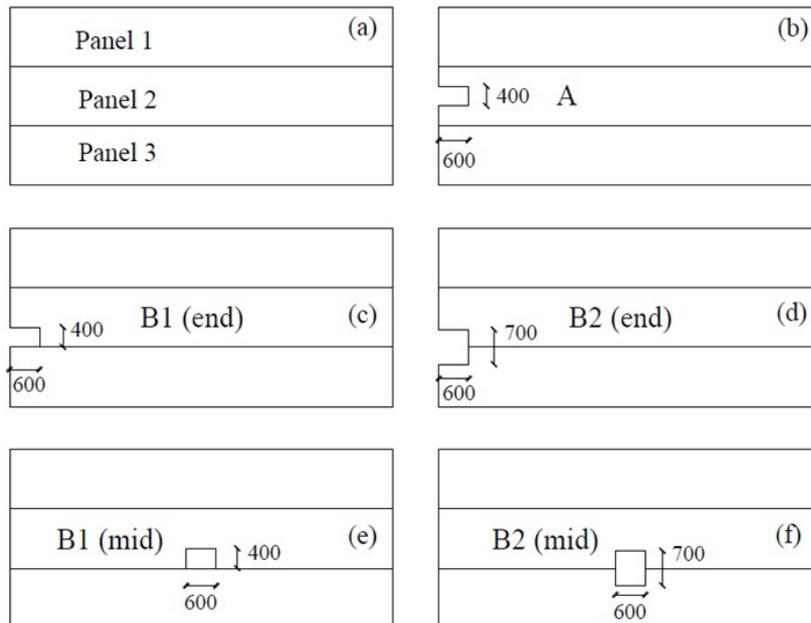
- A presença de pequena abertura, aquela com largura de até 400mm, na região da extremidade da laje, não causará problemas estruturais significantes;
- As aberturas acima descritas, podem ser posicionadas na região central da laje, a uma distância mínima de 300mm das laterais da laje, ou localizada em uma das laterais da laje, conforme apresentado na Figura 2.42 por A e D, respectivamente;
- Para o caso A, o comprimento da abertura deve ser de no máximo 500mm, e caso seja superado, reforços longitudinais e transversais devem ser executados e realizada a verificação a força cortante;
- Aberturas localizadas longe das extremidades, como por exemplo E, H, M e N, devem ter um comprimento máximo de 600mm e não afetar mais do que duas nervuras e cordoalhas da laje, caso contrário, deve-se realizar o reforço transversal próximo a abertura.

Com base na disposição e dimensões de aberturas apresentadas, os autores desenvolveram um estudo por meio da análise de elementos finitos

em um pano de laje, formado por tres lajes bi-apoiadas, e que contém uma abertura.

Ao todo seis panos de laje foram estudados, conforme a Figura 2.43, sendo cinco modelos com diferentes dimensões e localizações de abertura, além de um modelo de referência sem abertura.

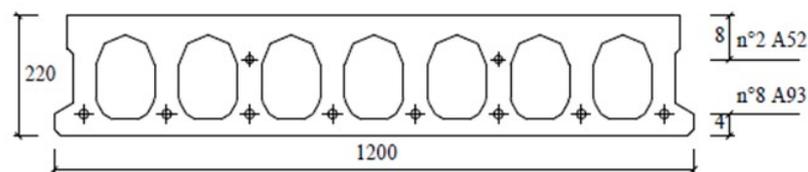
**Figura 2.43: Modelos de estudo.**



**Fonte: BERNARDI *et al* (2008).**

A seção transversal adotada é apresentada pela Figura 2.44, possuindo altura de 220mm.

**Figura 2.44: Seção transversal dos modelos de estudo.**



**Fonte: BERNARDI *et al* (2008).**

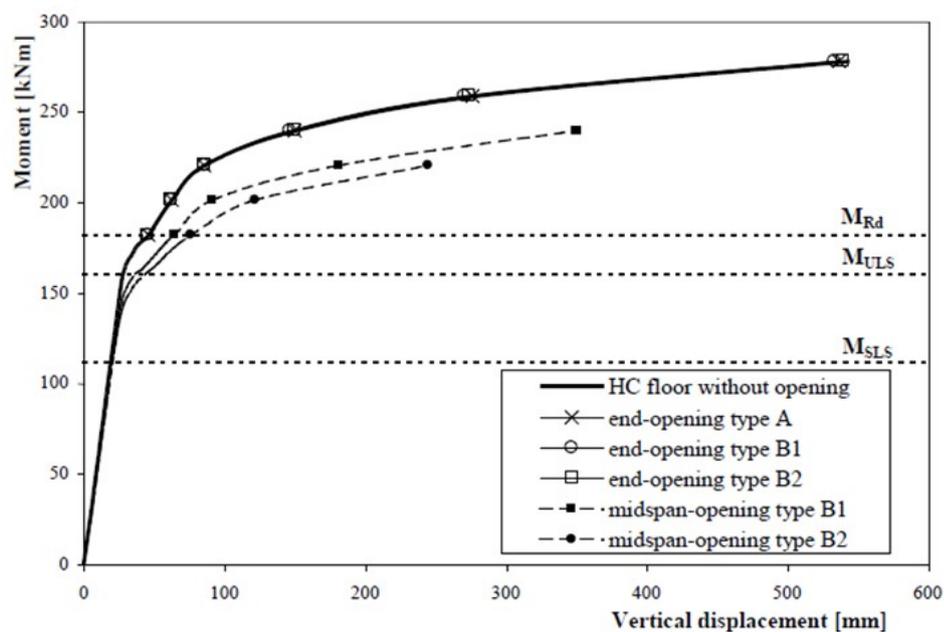
O principal objetivo deste estudo foi o de avaliar a influência da abertura em lajes, pertencentes a um pano de laje, no comportamento estrutural das lajes adjacentes.

Para as lajes ensaiadas, quando analisadas quanto a flexão, e tomados os valores máximos de deslocamento no meio do vão e momento fletor, notou-se que os modelos B1 e B2, com aberturas no meio do vão, apresentaram maior deflexão quando comparados aos demais panos de laje.

O modelo B2, com abertura em duas lajes (no meio do vão), apresentou deflexão superior ao modelo B1, com abertura em uma laje (no meio do vão).

Os modelos B1 e B2, com aberturas nas extremidades, apresentaram a mesma deflexão observada no modelo de referência A (sem aberturas), conforme Figura 2.45.

**Figura 2.45: Curva momento versus deslocamento dos modelos de estudo.**



Fonte: BERNARDI *et al* (2008).

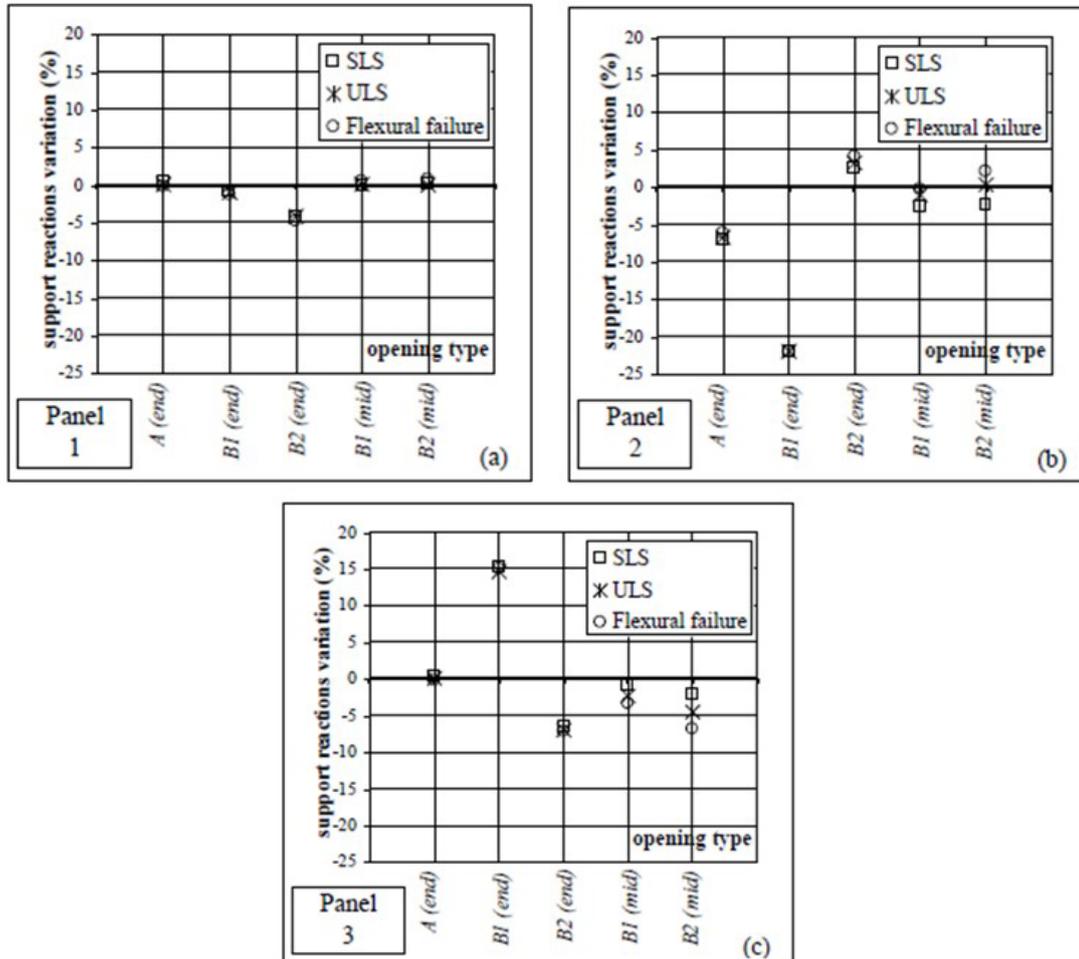
Para os mesmo modelos, quando analisados ao esforço cortante, e tomados os valores percentuais da variação da reação de apoio das lajes 1, 2 e 3 (Figura 2.43 a), notou-se que os modelos B1 e B2, com aberturas nas extremidades, apresentaram maior variação da reação de apoio quando comparados aos demais panos de laje.

A laje 1 (Panel 1) não teve sua reação de apoio significativamente afetada pelos modelos B1 e B2 com abertura no meio do vão.

As demais lajes (Panel 2 e Panel 3), apresentaram influência das aberturas no meio do vão em sua reação de apoio, contudo,

consideravelmente inferior a influência gerada pelos modelos com abertura na extremidade da laje, conforme Figura 2.46.

**Figura 2.46: Variação percentual da reação de apoio dos modelos de estudo.**



Fonte: BERNARDI *et al* (2008).

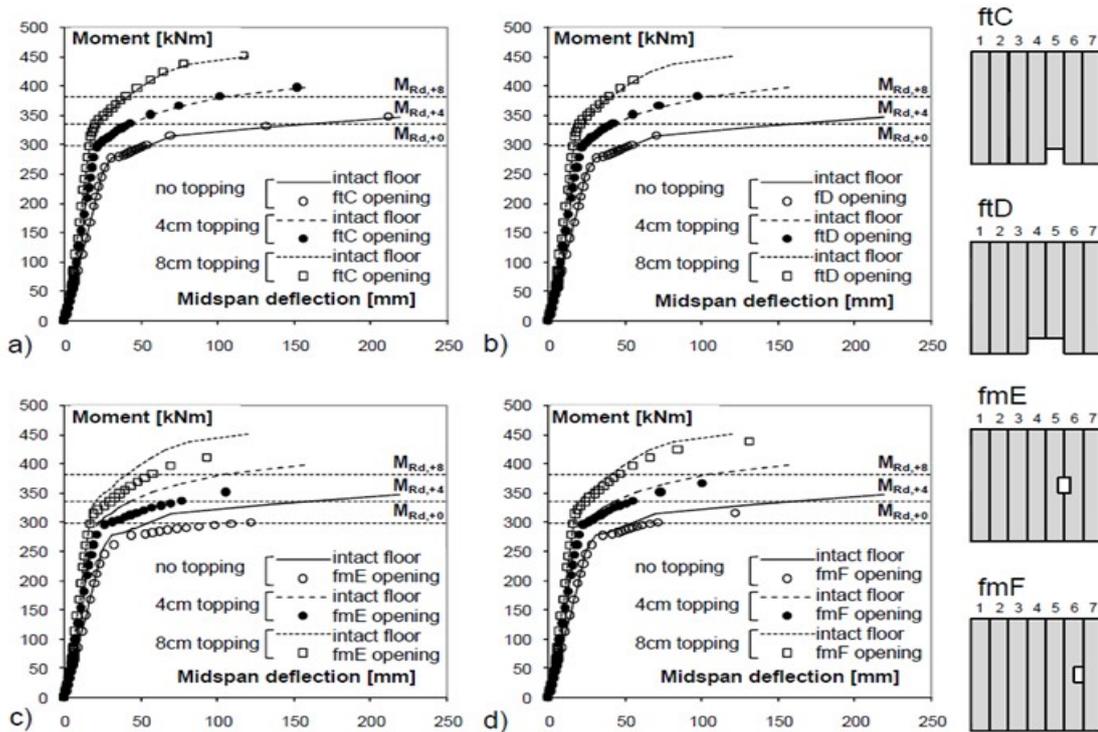
O trabalho apresentado por Bernardi et al (2008) mostra a influência das aberturas em panos de laje submetidos à flexão e ao esforço cortante em seu desempenho estrutural, havendo perda de capacidade resistente.

#### 2.2.4.2 Estudo numérico sobre o comportamento estrutural de lajes alveolares com grandes aberturas

O estudo desenvolvido por Bernardi et al (2012), trata da influência de grandes aberturas no comportamento estrutural de lajes alveolares e é continuação do trabalho desenvolvido pelos pesquisadores em 2008 sobre pequenas aberturas em LAP.

Por meio da análise de elementos finitos, diferentes dimensões e localizações de aberturas foram estudadas em panos de laje constituídos por 7 lajes. Modelos sem capeamento estrutural, com capeamento de 4 e 8 cm foram estudados. A Figura 2.54 apresenta as curvas Momento versus Deflexão para os panos de laje com aberturas.

**Figura 2.47: Curva momento versus deflexão para lajes com abertura, sem capeamento e com capeamento de 4 e 8cm.**



Fonte: BERNARDI *et al* (2012).

Observa-se que os modelos com abertura central apresentaram maiores deflexões (deslocamento vertical no meio vão) quando comparados com modelos que possuem abertura na extremidade.

Os modelos com capeamento estrutural de 4cm apresentaram menores deflexões, sendo a melhora ainda maior para os modelos com capeamento de 8 cm, conforme a Figura 2.54 (c) e (d).

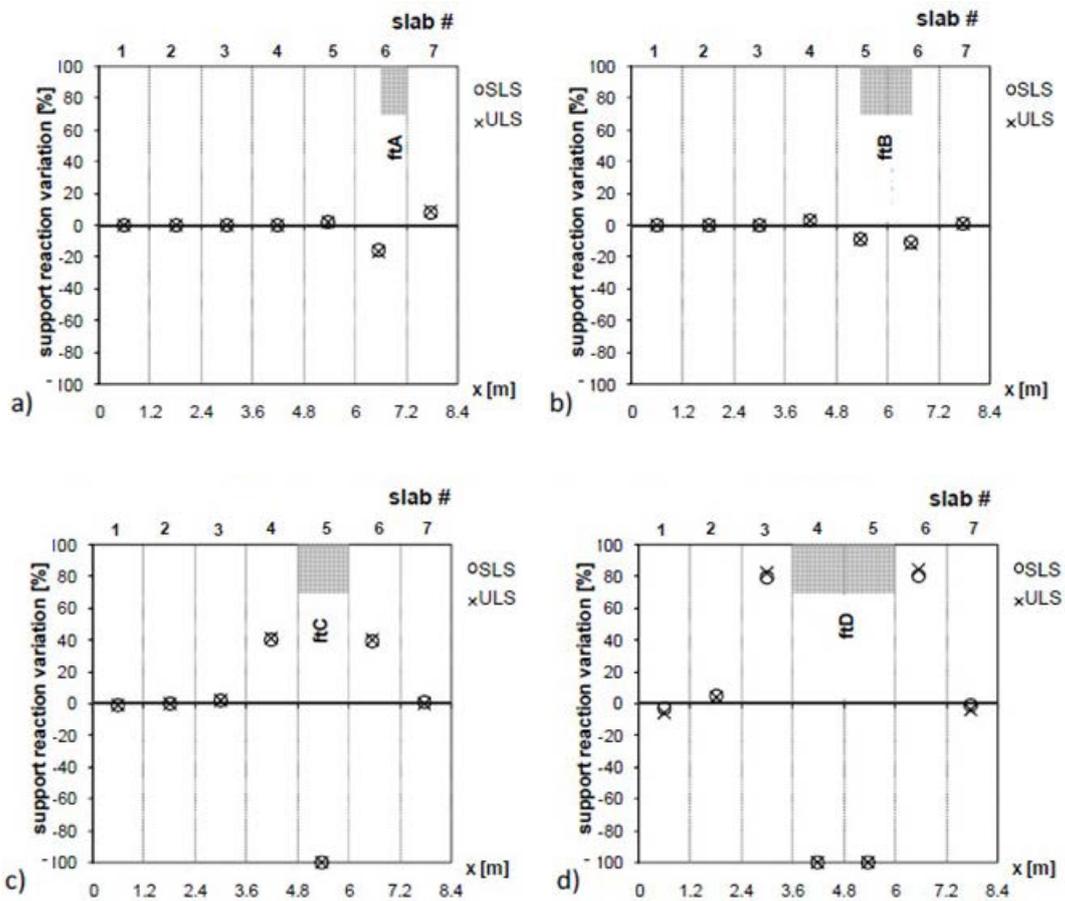
As aberturas nas extremidades das lajes não causaram aumento significativo da deflexão das lajes, conforme a Figura 2.54 (a) e (b).

As curvas mostram portanto a redução da capacidade resistente das lajes com aberturas na região localizada a meio vão.

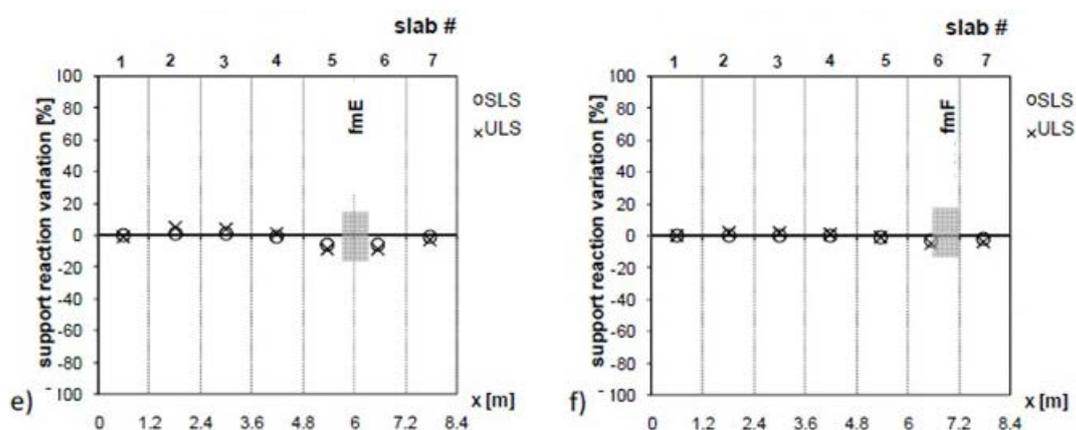
Para os mesmo modelos, quando analisados ao esforço cortante, e tomados os valores percentuais da variação da reação de apoio das lajes de 1 a 7, (Figura 2.48), notou-se que os modelos ftA, ftB, ftC e ftD, com aberturas nas extremidades, apresentaram maior variação da reação de apoio quando comparados aos demais panos de laje.

Os modelos fmE e fmF não tiveram sua reação de apoio significativamente afetada pelos modelos com abertura no meio do vão, conforme Figura 2.48.

**Figura 2.48: Variação percentual da reação de apoio dos modelos de estudo.**



Continuação Figura 2.48...



Fonte: BERNARDI *et al* (2012).

O trabalho apresentado por Bernardi et al (2012) mostra a influência das aberturas em panos de laje submetidos a flexão e a cortante em seu desempenho estrutural, havendo perda de capacidade resistente, assim como a melhora do desempenho do pano de laje ao se executar o capeamento estrutural.

## 2.2.5 Conclusões iniciais sobre a execução de aberturas e cortes em LAPs

Nota-se que mesmo se tratando de um elemento tecnologicamente avançado e com vasto uso no Brasil e no mundo, as LAPs apresentam limitações técnicas e teóricas quanto aos efeitos de aberturas, furos e cortes oblíquos em sua resistência à força cortante, fazendo com que profissionais e pesquisadores se amparem em normas técnicas e trabalhos estrangeiros, muitas vezes incompletos e inconclusivos.

Da revisão bibliográfica levantada, tomando como origem das referências países da América do Norte, Europa, Oceania e Brasil, não foi possível encontrar trabalhos, manuais e normas técnicas que apresentem uma metodologia conclusiva de cálculo para esse tipo de elemento, contudo, observa-se que algumas prescrições são comuns, tais como:

- Abertura retangular (frontal e lateral ) com largura de até 40cm, na extremidade de lajes alveolares de até 30cm de altura, pode ser executada sem a necessidade de reforço estrutural;

- Aberturas acima de 40cm de largura, recomenda-se o uso de apoio metálico, conforme Figura 2.16;
- Aberturas circulares que não cortem as nervuras e/ou cordoalhas, podem ser executadas livremente (não havendo restrição quanto ao número máximo de furos ou localização);
- As aberturas devem ser realizadas com o concreto em seu estado fresco;
- Os furos devem ser realizados com o concreto em seu estado endurecido;
- Com exceção do manual AIDEPLA, os demais trabalhos, normas e manuais técnicos consultados, não abordam os cortes oblíquos em LAP.

Os materiais levantados são sugestões e indicações baseadas na experiência e conhecimento individual de cada empresa, que obteve os dados conforme a necessidade de aplicação a cada projeto.

### **2.3 Modelos de cálculo**

No projeto de lajes alveolares protendidas, a utilização de uma capa de concreto solidarizada sobre a laje pode contribuir para a redução de armadura protendida.

Além do aumento da resistência á flexão, o acréscimo do momento de inércia, gerado pela seção composta, traz dois benefícios principais: aumento da ação de diafragma rígido, com a redução da deslocabilidade lateral do pavimento; e redução da deformabilidade vertical da laje.

A fim de se levar em conta a seção composta no projeto, é importante que a solidarização entre a capa de concreto e a laje alveolar seja verificada por meio de ensaios experimentais de elementos com e sem capa estrutural, onde estes resultados podem ser comparados com os equacionamentos teóricos.

No caso da resistência ao cisalhamento, um procedimento que tem sido utilizado para aumentar a capacidade das lajes é o preenchimento dos alvéolos com concreto não-retrátil (PINHEIRO, 2014). Da mesma forma, é importante verificar experimentalmente a parcela da contribuição do preenchimento dos alvéolos.

Neste item serão apresentados os principais modelos de cálculo da resistência ao cisalhamento de lajes para os casos acima descritos.

### 2.3.1 Modelo segundo a ABNT NBR 6118:2014

A ABNT NBR 6118:2014, apresenta Equação (2.1) para a força cortante resistente de cálculo.

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_d \cdot d \quad (2.1)$$

Sendo:

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} ;$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c ;$$

$$\rho_1 = \frac{A_{S1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 ;$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Sd}}{A_c} ;$$

$k$  é um coeficiente com os seguintes valores:

- i. para elementos onde 50% da armadura inferior não chega até o apoio:  $k = 1$  ;
- ii. para os demais casos:  $k = |1,6 - d|$  , não menor que  $|1|$  , com  $d$  em metros;

$\tau_{Rd}$  tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento;

$A_{S1}$  área da armadura de tração que se estende até não menos que  $d + l_{b,nec}$ ;

$b_w$  largura mínima da seção ao longo da altura útil  $d$ ;

$N_{Sd}$  força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (a compressão é considerada com sinal positivo).

### 2.3.2 Modelo segundo a ABNT NBR 14861:2011

A seguir serão apresentados os mecanismos de ruptura e o método de cálculo da resistência à força cortante segundo a ABNT NBR 14861:2011.

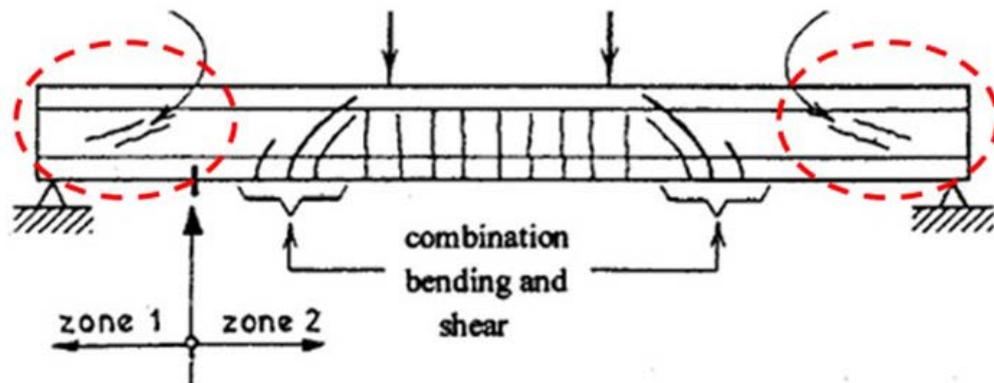
### 2.3.2.1 Mecanismos de ruptura segundo a ABNT NBR 14861:2011

A ABNT NBR 14861:2011 apresenta dois mecanismos de ruptura de uma laje alveolar para a resistência às tensões de cisalhamento:

- i. Tensão de cisalhamento superior à resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo:

Para o caso onde a tensão principal de tração do concreto da nervura se iguala a resistência à tração do concreto, uma fissura inclinada surge na nervura da laje, conforme a Figura 2.49 .

**Figura 2.49: Regiões e padrões de fissuração em elemento de concreto armado ou protendido.**



Fonte: FIB (2011).

A fissura se propaga em ambas as direções causando a ruptura brusca. Esse tipo de mecanismo é consequência da reduzida espessura das nervuras da laje, além da ausência de armadura transversal.

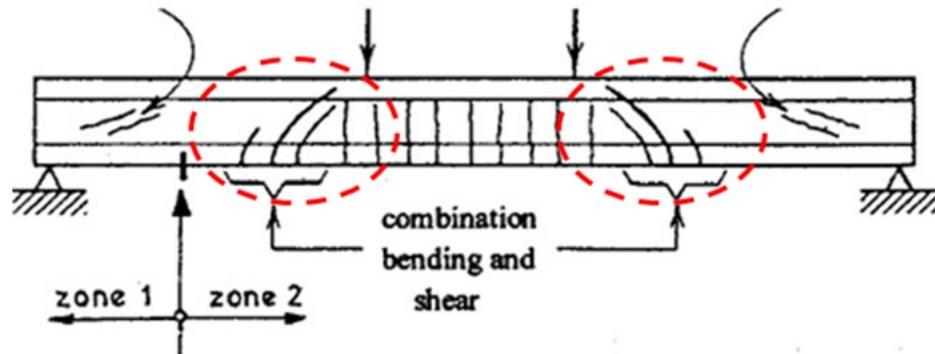
Segundo YANG (1994) o ponto mais crítico de uma fissuração diagonal está em uma região pertencente a uma linha que possui inclinação de  $35^\circ$  em relação ao eixo horizontal da peça.

- ii. Tensão de cisalhamento combinada com as tensões de tração oriundas da protensão ou da flexão da peça:

Esse tipo de falha ocorre por meio da combinação de fissuras inclinadas a partir da borda da laje próxima ao carregamento com

fissuras horizontais na região das cordoalhas em decorrência da sua falha de ancoragem, conforme a Figura 2.50.

**Figura 2.50: Regiões e padrões de fissuração em elemento de concreto armado ou protendido.**



Fonte: FIB (2011).

Quanto maior for a relação entre a altura da laje e a distância de aplicação do carregamento, mais alta será a fissura diagonal, ocasionando o colapso do elemento. Quanto menor for esta relação, a fissura diagonal tenderá a parar em algum ponto antes de atingir a altura total da laje, podendo haver um número aleatório de fissuras verticais de flexão no concreto ao longo da armadura longitudinal.

Outros importantes mecanismos de ruptura de lajes alveolares são apresentados no item 2.1.1 desta pesquisa.

### **2.3.2.2 Cálculo da resistência à força cortante**

A verificação da resistência à força cortante deve ser feita na região da seção transversal mais crítica ao longo da laje, a partir de uma distância de  $0,5 h$  de seu apoio, sendo  $h$  a altura da laje (quando houver capa estrutural, esta deve ser somada a altura da seção).

A resistência à força cortante deve satisfazer simultaneamente as condições apresentadas por (2.2) e (2.3):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (2.2)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{ou} \quad V_{Sd} \leq V_{Rd2capa} \quad (2.3)$$

Sendo:

- $V_{Sd}$  força cortante solicitante de cálculo na seção;  
 $V_{Rd1}$  força cortante resistente de cálculo na seção;  
 $V_{Rd2}$  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;

Os valores de  $V_{Rd2}$  e  $V_{Rd2capa}$  são obtidos pelas Equações (2.4) e (2.5), respectivamente:

$$V_{Rd2} = 1/2 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d \cdot \sum b_{w,1} \quad (2.4)$$

$$V_{Rd2capa} = 1/2 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d_{tot} \cdot \sum b_{w,2} \quad (2.5)$$

Sendo:

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5$$

Sendo:

- $\sum b_{w,1}$  e  $\sum b_{w,2}$  somatório das nervuras (interna e externa) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos, respectivamente;  
 $d$  altura útil da seção transversal da laje alveolar;  
 $d_{tot}$  altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;

$f_{cd}$  resistência de cálculo à compressão do concreto usada no projeto, conforme a ABNT NBR 9062:2006.

Quando necessário, a resistência ao esforço cortante nas lajes alveolares pode ser aumentada com a especificação de capa estrutural e/ou preenchimento de alvéolos.

Em casos onde alvéolos forem preenchidos, o comprimento longitudinal do preenchimento deve ser pelo menos maior que  $L_{pr}$ , dado pela Equação (2.6):

$$L_{pr} = l_{pt2} + l_{fc} \quad (2.6)$$

Sendo:

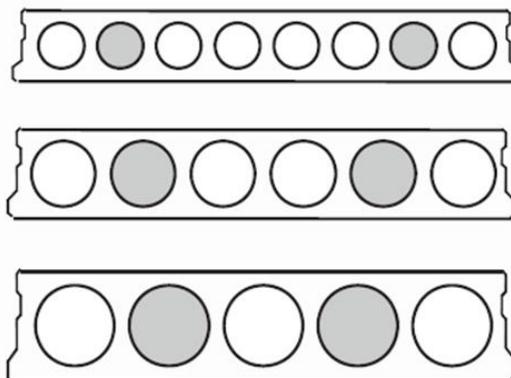
$l_{pt2}$  valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em  $85\phi$ );

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

A ANBT NBR 14861:2011 aborda lajes com ou sem capa estrutural e com alvéolos preenchidos ou não. Considera-se o preenchimento de até dois alvéolos (com contribuição de 50 % da largura do alvéolo), em condições de simetria na seção transversal. A

Figura 2.51 mostra possíveis configurações de preenchimento de alvéolos em uma seção genérica.

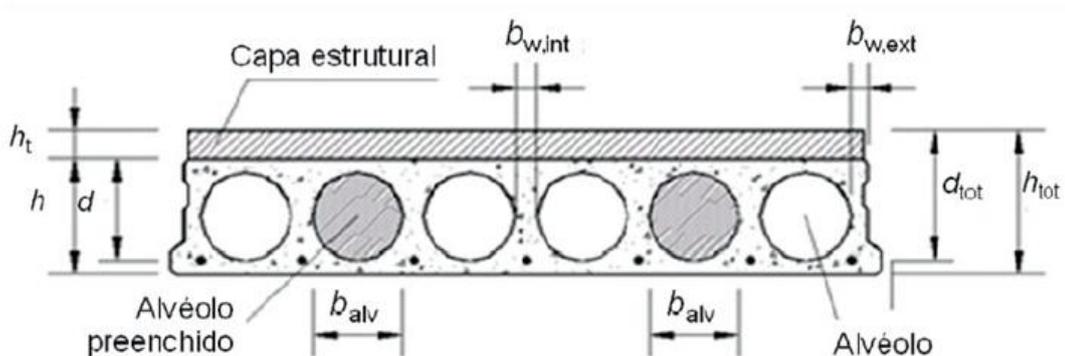
**Figura 2.51: Posicionamento recomendado para o preenchimento de alvéolos.**



**Fonte: ABNT NBR 14961:2011.**

O comportamento monolítico da seção (situação em que a capa estrutural, o preenchimento de alvéolos, e a seção da laje trabalham de forma conjunta) pode ser considerado desde que seja garantida a aderência entre as partes. É necessário garantir o completo preenchimento dos alvéolos, controlando a 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 por norma para execução da capa estrutural. A Figura 2.52 expõe um modelo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e preenchimento de alvéolos.

**Figura 2.52: Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e preenchimento de alvéolos.**



Fonte: ABNT NBR 14961:2011.

Caso seja adotado, 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 – chamado preenchimento em fábrica) quanto posteriormente à liberação da protensão (após a liberação da protensão e corte das lajes - chamado preenchimento em obra, podendo ser realizado ainda na fábrica ou efetivamente no local da obra). O momento da execução do preenchimento dos alvéolos, na fábrica ou na obra, influencia nas considerações de cálculo, conforme exposto a seguir.

- i. Resistência à força cortante de lajes alveolares com ou sem capa estrutural:

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (2.7)$$

Sendo:

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (2.8)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (2.9)$$

$$\sum b_{w,1} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} \quad (2.10)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1} \cdot d} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \cdot \alpha \quad (2.12)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1 \text{ com } d \text{ em metros [m]} \quad (2.13)$$

Sendo:

$V_{Rd1}$	força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado e do moldado no local;
$\sum b_{w,1}$	somatória das nervuras (internas e externas) da laje alveolar;
$A_s$	área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;
$\rho_1$	taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada;
$d$	altura útil total da seção transversal, considerando a altura da laje $d$ alveolar ou da laje alveolar mais a altura da capa na seção composta $d = d_{tot}$ ;

$\sigma_{cp,1}$	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);
$N_p$	força de protensão final, depois de todas as perdas;
$A_c$	área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada;

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (2.14)$$

Sendo:

$l_x$	distância da seção x a partir do final da laje;
$l_{pt2}$	valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em $85\phi$ ).

- ii. Resistência à força cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista (preenchimento na fábrica):

$$V_{Rd1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (2.15)$$

Sendo:

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (2.16)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (2.17)$$

$$\sum b_{w,2} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} + 0,5 \cdot n \cdot b_{alv} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (2.18)$$

$$\rho_2 = \frac{A_s}{\sum b_{w,2} \cdot d} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \cdot \alpha \quad (2.20)$$

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv} \quad (2.21)$$

Sendo:

$V_{Rd1,a1}$	força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;
$\sum b_{w,2}$	somatória das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;
$\rho_2$	taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolo preenchido;
$\sigma_{cp,2}$	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;
$n$	quantidade de alvéolos preenchidos;
$A_{alv}$	área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria, para alvéolo de seção circular, usar a Equação (2.22);

$$A_{alv} = \pi \frac{b_{alv}^2}{4} \quad (2.22)$$

Sendo:

$b_{alv}$	largura horizontal do alvéolo a ser preenchido;
$\frac{E_c}{E_p}$	Relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado ( $E_c$ ) no local e do concreto pré-moldado ( $E_p$ ).

- iii. Resistência à força cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista (preenchimento na obra):

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (2.23)$$

Sendo:

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

O preenchimento de mais do que dois alvéolos pode ser feito, desde que devidamente fundamentado em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental. Quando for adotada comprovação experimental, a ANBT NBR 14861:2011 recomenda a utilização dos métodos de ensaio apresentados pela EN 1168:2005.

### 2.3.3 Modelo segundo o Eurocode 2 EN 1992-1-1:2004

A seguir será apresentado o método de cálculo da resistência à força cortante segundo a norma europeia EN 1992-1-1:2004.

#### 2.3.3.1 Cálculo da resistência à força cortante

Segundo a EN 1992-1-1:2004, em elementos bi-apoiados, protendidos e sem armadura transversal, a resistência de cálculo à força cortante é:

- i. Em zonas não fissuradas, designada *Tension Shear Capacity* (Resistência à tração da biela comprimida de concreto), é dada pela Equação (2.24).

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad (2.24)$$

Sendo:

- $I$  momento de inércia da seção;
- $b_w$  menor largura da seção transversal na área tracionada [mm];
- $S$  momento estático da seção;
- $\alpha_1$   $l_x/l_{pt2} \leq 1$  para armaduras pré-tracionadas,  $l_x/l_{pt2} = 1$  para outros tipos de protensão;
- $l_x$  distância da seção considerada, a partir do ponto inicial do comprimento de transferência;

$l_{pt2}$	limite superior do comprimento de transferência do elemento protendido, equivalente a $1,2 \cdot l_{pt}$ ;
$\sigma_{cp}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto.

- ii. Em zonas fissuradas pela flexão com interação com a força cortante existente, designada *Flexural Shear Capacity*, é dada pela Equação (2.25).

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad (2.25)$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (2.26)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ com } d \text{ em [mm]} \quad (2.27)$$

Sendo:

$\rho_1$	taxa de armadura longitudinal $\rho_1 = \frac{A_{st}}{(b_w \cdot d)} \leq 0,02$ ;
$A_{st}$	área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ além da seção considerada;
$b_w$	menor largura da seção transversal na área tracionada [mm];
$\sigma_{cp}$	Igual a $N_{Ed}/A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$ ;
$N_{Ed}$	força normal na seção devido às ações aplicadas ou à protensão [N];
$A_c$	área da seção transversal de concreto [mm <sup>2</sup> ];
$\sigma_{cp}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$V_{Rd,c}$	força cortante resistente de cálculo [N].

- iii. Para lajes com capa estrutural, em zonas fissuradas pela flexão, o cálculo pode ser feito substituindo  $d$  por  $d'$  (altura útil da seção composta) e  $\rho$  por  $\rho'$ :

$$d' = d + h_c \quad (2.28)$$

$$\rho' = \frac{A_p}{b_w \cdot d'} \quad (2.29)$$

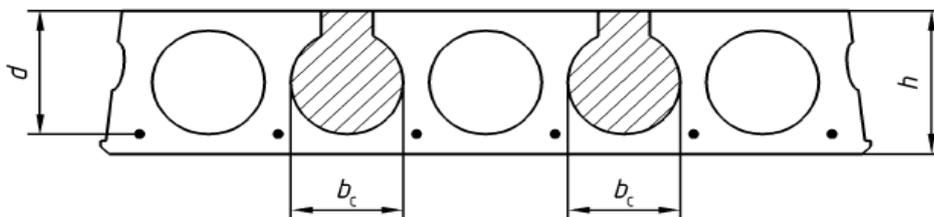
- iv. Para lajes com alvéolos preenchidos, no cálculo da força cortante resistente de cálculo, deve-se considerar a contribuição dos alvéolos preenchidos como sendo  $2/3$ , conforme a EN 1168:2005.

$$V_{Rdt} = \frac{2}{3} \cdot n \cdot b_c \cdot d \cdot f_{ctd} \quad (2.30)$$

Sendo:

- $f_{ctd}$       resistência à tração de projeto do concreto;  
 $n$             número de alvéolos preenchidos;  
 $b_c$           diâmetro do alvéolo, conforme a Figura 2.53.

**Figura 2.53: Exemplo de seção transversal de laje alveolar com preenchimento de alvéolos.**



Fonte: EN 1168:2005.

### 2.3.4 Modelo segundo o ACI 318:2014

A seguir será apresentado o método de cálculo da resistência à força cortante segundo a norma norte americana ACI 318:2014, que abrange o cálculo de lajes unidirecionais, especificamente as lajes alveolares

protendidas pré-fabricadas. O modelo de cálculo de lajes submetidas ao esforço cortante é o mesmo para vigas de concreto.

#### 2.3.4.1 Cálculo da resistência à força cortante

Segundo o ACI 318:2014, em um elemento sem armadura transversal, o esforço cortante deve ser resistido pelo concreto. Em um elemento com armadura transversal, uma parte da resistência ao esforço cortante é resistida pelo concreto e o restante pela armadura transversal, conforme a Equação (2.31).

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.31)$$

Sendo:

- $V_n$  resistência ao esforço cortante [N];
- $V_c$  força cortante, parcela resistida pelo concreto [N];
- $V_s$  força cortante, parcela resistida pela armadura transversal [N];

A resistência ao esforço cortante proveniente do concreto,  $V_c$ , é a mesma, tanto para elementos que possuem armadura transversal quanto para os que não possuem.

Inicialmente a força cortante é a responsável pelas fissuras inclinadas. Após a fissuração do concreto, o esforço cortante é atribuído ao engrenamento dos agregados, efeito pino, e pela força cortante transmitida através da zona de compressão de concreto.

A resistência à força cortante é baseada na tensão média de cisalhamento sobre a seção transversal.

O projeto da seção transversal da laje deve ser executado de modo a respeitar:

$$V_u \leq \varphi \cdot (V_c + 0,066\sqrt{f'_c \cdot b_w \cdot d}) \quad (2.32)$$

Sendo:

$V_u$	força cortante solicitante [N];
$V_c$	força cortante, parcela resistida pelo concreto [N];
$f_c'$	resistência a compressão do concreto [MPa];
$b_w$	largura da nervura [mm];
$d$	altura útil [mm];
$\phi$	coeficiente de ponderação da resistência;

O coeficiente de ponderação referente a redução das propriedades mecânicas dos agregados de concretos leves em relação a concretos normais com uma mesma resistência a compressão,  $\lambda$ , pode ser obtido pela Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação do concreto devido ao tipo de agregado.**

Concrete	Composition of aggregates	$\lambda$
All-lightweight	Fine: ASTM C330M Coarse: ASTM C330M	0.75
Lightweight, fine blend	Fine: Combination of ASTM C330M and C33M Coarse: ASTM C330M	0.75 to 0.85 <sup>[1]</sup>
Sand-lightweight	Fine: ASTM C33M Coarse: ASTM C330M	0.85
Sand-lightweight, coarse blend	Fine: ASTM C33M Coarse: Combination of ASTM C330M and C33M	0.85 to 1 <sup>[2]</sup>
Normalweight	Fine: ASTM C33M Coarse: ASTM C33M	1

<sup>[1]</sup>Linear interpolation from 0.75 to 0.85 is permitted based on the absolute volume of normalweight fine aggregate as a fraction of the total absolute volume of fine aggregate.

<sup>[2]</sup>Linear interpolation from 0.85 to 1 is permitted based on the absolute volume of normalweight coarse aggregate as a fraction of the total absolute volume of coarse aggregate.

**Fonte: ACI 318:2014.**

Segundo o ACI 318:2014, o coeficiente de ponderação  $\lambda$  também pode ser calculado por meio da Equação (2.33).

$$\lambda = \frac{f_{ct}}{0,56 \cdot \sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0 \quad (2.33)$$

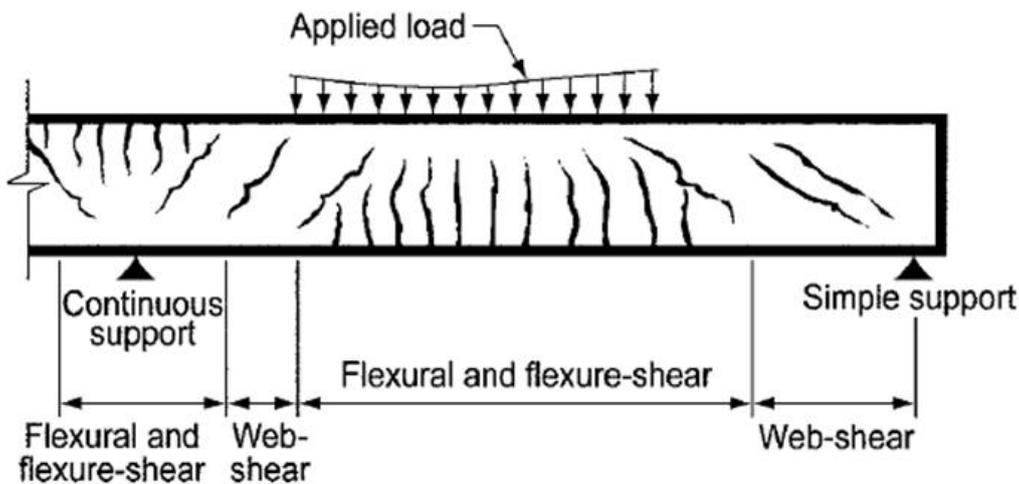
Sendo:

$f_{cm}$                 resistência média a compressão do concreto [MPa];

$f_{ct}$                 resistência a tração do concreto [MPa].

Os tipos básicos de fissuras que podem ocorrer numa viga de concreto, bem como uma laje unidirecional, são: verticais (*flexural*) que são tipicamente de flexão; inclinadas, porém localizadas na região de flexão (*flexure-shear*) tipicamente onde há interação entre a flexão e a força cortante; e inclinadas (*web-shear*) tipicamente de força cortante. Esses padrões são apresentados na Figura 2.54.

Figura 2.54: Tipo de fissuras em vigas de concreto.



Fonte: ACI 318:2014.

A fissura de cisalhamento (*web-shear*) inicia-se em um ponto do interno da laje quando a tensão principal de tração no elemento excede a resistência à tração do concreto.

Já a fissura gerada pela tensão de cisalhamento com interação da flexão, inicia a partir de uma fissura de flexão. Quando uma fissura de flexão ocorre, a tensão de cisalhamento no concreto acima desta fissura aumenta. Esse

tipo de fissura ocorre quando a combinação das tensões de flexão e cisalhamento excede a resistência a tração do concreto.

Para elementos protendidos, o valor da resistência ao esforço cortante  $V_c$ , segundo o ACI 318:2014, deve ser o menor valor entre  $V_{ci}$  e  $V_{cw}$ .

O valor de  $V_{ci}$  é dado pelo maior valor entre (a) e (b), Equações (2.34) e (2.35) respectivamente.

$$(a) V_{ci} = 0,05 \cdot \lambda \sqrt{f'_c \cdot b_w \cdot d_p} + V_d + \frac{V_i \cdot M_{cre}}{M_{max}} \quad (2.34)$$

$$(b) V_{ci} = 0,14 \cdot \lambda \sqrt{f'_c \cdot b_w \cdot d} \quad (2.35)$$

Sendo:

$V_{ci}$	força cortante, parcela resistida pelo concreto onde a diagonal fissurada provém da combinação entre cisalhamento e momento[N];
$V_d$	força cortante da seção devido a carga permanente sem coeficiente de segurança [N];
$V_i$	força cortante de cálculo na seção, devido à forças externas, ocorrendo simultaneamente com $M_{máx}$ [N];
$f'_c$	resistência a compressão do concreto (cilindro) [MPa];
$b_w$	largura da nervura [mm];
$d$	altura útil [mm];
$d_p$	distância da extremidade da fibra mais comprimida até o centro de massa das armaduras protendidas e outras armaduras longitudinais não protendidas existentes, não devendo estar a menos de $0,8 \cdot h$ [mm];
$\lambda$	coeficiente de ponderação da resistência;
$M_{cre}$	momento responsável pela fissuração da seção devido à forças externas [N.mm];
$M_{max}$	momento máximo de cálculo à forças externas [N.mm].

Sendo:

$$M_{cre} = \frac{I}{y_t} \cdot (0,5 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c + f_{pe} - f_d}) \quad (2.36)$$

Com:

- $I$  momento de inércia da seção [mm<sup>4</sup>];
- $y_t$  distância do centro de massa da seção bruta, sem considerar o aço, até a face tracionada [mm];
- $f_{pe}$  tensão de compressão no concreto devido somente às forças de protensão, após descontadas as perdas de protensão, na fibra mais extrema da seção onde a tensão de tração é causada por carregamento externo [MPa];
- $f_d$  tensão devido a carga permanente, sem coeficiente de segurança, na fibra externa, onde a tensão de tração é causada pela aplicação de carregamentos externos [MPa];
- $f'_c$  resistência a compressão do concreto [MPa];

O valor de  $V_{cw}$  é dado pela Equação (2.37).

$$V_{cw} = (0,29 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + 0,3 \cdot f_{pc}) b_w \cdot d_p + V_d \quad (2.37)$$

Sendo:

- $V_{cw}$  força cortante resistida pelo concreto onde a fissura diagonal provém da maior tensão de tração principal [N];
- $V_d$  força cortante na seção devido a carga permanente [N];
- $f'_c$  resistência a compressão do concreto [MPa];
- $f_{pc}$  tensão de compressão resultante no concreto no centro da seção [MPa];
- $b_w$  largura da nervura [mm];
- $d_p$  altura útil [mm];
- $\lambda$  coeficiente de ponderação da resistência;

### 2.3.5 Modelo segundo a FIB(1992)

A seguir será apresentado o método de cálculo da resistência à força cortante segundo o Manual de Projeto para Lajes Alveolares da FIB(1992). Neste manual, são apresentadas equações para a consideração da contribuição da capa de concreto e do preenchimento dos alvéolos para o aumento da resistência à força cortante.

As resistências ao cisalhamento para diferentes situações de lajes: sem e com capa; sem e com preenchimento dos alvéolos.

#### 2.3.5.1 Lajes sem capa estrutural

Segundo a FIP(1992) o cálculo da resistência ao esforço cortante para lajes sem capa estrutural é dado pela Equação (2.38):

$$V_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V_{Rd2} \quad (2.38)$$

Onde:

$V_{Rdf}$	força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;
$b_w$	largura total da nervura da laje alveolar;

Sendo:

$$V_{Rd2} = 1/2 v f_{cd} b_w 0.9d \quad (2.39)$$

$$\rho_1 = A_p / b_w d \quad (2.40)$$

$$v = 0.7 - f_{ck} / 200 \geq 0.5 \quad (2.41)$$

Com:

$f_{ck}$	resistência característica do concreto pré-moldado à compressão;
$\rho_1$	taxa de armadura específica da seção alveolar pré-moldada;

$\sigma_{cpm}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
A	área da seção transversal da laje alveolar pré-moldada;
d	altura efetiva da seção transversal da laje alveolar;

### 2.3.5.2 Lajes com capa estrutural

Segundo a FIP(1992) o cálculo da resistência ao esforço cortante para lajes com capeamento estrutural é dado pela Equação (2.42).

$$\overline{V}_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d' \cdot k' (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (2.42)$$

Sendo:

$\overline{V}_{Rdf}$	força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes com capa estrutural;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;
$b_w$	largura total da nervura da laje alveolar;

Sendo:

$$V'_{Rd2} = 1/2 v f_{cd} b'_w 0.9 d' \quad (2.43)$$

$$\rho'_1 = A_p / b'_w d' \quad (2.44)$$

$$v = 0.7 - f_{ck} / 200 \geq 0.5 \quad (2.45)$$

Com:

$f_{ck}$	resistência característica do concreto pré-moldado à compressão;
$\rho'_1$	taxa de armadura específica da seção alveolar pré-moldada

	composta;
$\sigma_{cpm}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$A_p$	seção transversal do aço protendido;
$d'$	altura efetiva da seção transversal da laje alveolar composta;

### 2.3.5.3 Lajes sem capa estrutural e com preenchimento de alvéolos

Segundo a FIP(1992) o cálculo da resistência ao esforço cortante para lajes sem capeamento estrutural e com alvéolos preenchidos é dado pela Equação (2.46):

$$V'_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V'_{Rd2} \quad (2.46)$$

Sendo:

$V'_{Rdt}$	força cortante de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa estrutural e com preenchimento de alvéolos;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;
$b'_w$	largura total da nervura da laje alveolar composta com alvéolos preenchidos;

Sendo:

$$V_{Rd2} = 1/2 v f_{cd} b_w 0.9d \quad (2.47)$$

$$\rho'_1 = A_p / b'_w d \quad (2.48)$$

$$v = 0.7 - f_{ck} / 200 \geq 0.5 \quad (2.49)$$

Com:

$f_{ck}$	resistência característica do concreto pré-moldado à compressão;
$\rho'_1$	taxa de armadura específica da seção alveolar pré-moldada composta;
$\sigma_{cpm}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$A_p$	área total da seção transversal de aço protendido;
$d$	altura efetiva da seção transversal da laje alveolar;

#### 2.3.5.4 Lajes com capa estrutural e com preenchimento de alvéolos

Segundo a FIP(1992) o cálculo da resistência ao esforço cortante para lajes com capeamento estrutural e com alvéolos preenchidos é dado pela Equação (2.50):

$$\overline{V'_{Rdf}} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (2.50)$$

Onde:

$\overline{V'_{Rdf}}$	força cortante de cálculo em zona de flexão, para lajes com capa estrutural e com preenchimento de alvéolos;
$f_{ctd}$	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;
$b'_w$	largura total da nervura da laje alveolar composta com alvéolos preenchidos;

Sendo:

$$V'_{Rd2} = 1/2 v f_{cd} b'_w 0.9d' \quad (2.51)$$

$$\rho'_1 = A_p / b'_w d \quad (2.52)$$

$$V = 0.7 - f_{ck}/200 \geq 0.5 \quad (2.53)$$

Com:

$f_{ck}$	resistência característica do concreto pré-moldado à compressão;
$\rho'_1$	taxa de armadura específica da seção alveolar pré-moldada composta;
$\sigma_{cpm}$	tensão de compressão do concreto devido à força de protensão;
$A_p$	área total da seção transversal de aço protendido;
$d'$	altura efetiva da seção transversal da laje alveolar composta;

### 2.3.6 Modelo segundo a CSA (2001)

A seguir será apresentado o método de cálculo da resistência à força cortante segundo a norma técnica canadense *Canadian Standards Association (2001)*.

Segundo a CSA (2001) o cálculo da resistência ao esforço cortante é dado pela Equação (2.54).

$$V_c = \phi_c \cdot \lambda \cdot \beta \cdot \sqrt{f'_c \cdot b_w \cdot d_v} \quad (2.54)$$

Sendo:

$V_c$  força cortante solicitante;

$$\beta = \frac{0,4}{(1 + 1500 \cdot \varepsilon_x)} \cdot \frac{1300}{(1000 + S_{ze})} \quad (2.55)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{M_f}{d_v} + V_f - A_p \cdot f_{po}}{2 \cdot (E_p \cdot A_p + E_c \cdot A_{ct})} \quad (2.56)$$

$$S_{ze} = \frac{35 \cdot S_z}{15 + a_g} \quad (2.57)$$

$\varepsilon_x$  deformação longitudinal na metade da altura da seção transversal;

### 2.3.7 Modelo segundo Yang (1994)

Yang (1994) propõe um modelo de cálculo para elementos de laje que possuam uma camada de cabos protendidos. A tensão de cisalhamento é calculada da segunda a Equação (2.58).

$$\tau_{xz} = \frac{1}{b_w} \left[ \left( \frac{A_{cp}}{A} - \frac{S_{cp} \cdot e}{I_y} \right) \cdot \frac{dN_p}{dx} + \frac{S_{cp}}{I_y} \cdot V_z \right] \quad (2.58)$$

Sendo:

$V_z$	força de cisalhamento;
$\frac{dN_p}{dx}$	gradiente das forças nos cabos protendidos;
$e$	excentricidade da força no cabo;
$A$	área da seção transversal da laje;
$A_{cp}$	área da seção transversal do concreto acima do eixo considerado;
$S_{cp}$	primeiro momento da área ou momento estático da seção de concreto acima do eixo considerado;
$I_y$	momento de inércia da seção transversal ;
$b_w$	soma da largura das nervuras.

O primeiro termo da equação (2.58) é referente a tensão de cisalhamento, devido à força de transferência da protensão, dado por:

$$\tau_t = \frac{1}{b_w} \cdot \left( \frac{A_{cp}}{A} - \frac{S_{cp} \cdot e}{I_y} \right) \cdot \frac{dN_p}{dx} \quad (2.59)$$

De modo análogo, a tensão normal de tração é obtida por:

$$\sigma_x = - \frac{N_p}{A} + \frac{N_p}{I_y} \cdot e \cdot z - \frac{V_z}{I_y} \cdot X_{cp} \cdot z \quad (2.60)$$

Sendo:

- z posição da tensão avaliada na seção transversal em relação ao eixo central;
- $x_{cp}$  coordenada do ponto crítico;

O momento fletor no ponto crítico por ser expresso de modo aproximado por:

$$M_y(X_{cp}) \cong V_z \cdot X_{cp} \quad (2.61)$$

A ruptura da nervura (por tração) ocorre se a tensão principal ( $\sigma_1$ ) no ponto crítico alcançar a resistência do concreto à tração ( $f_{ct}$ ):

$$f_{ct} = \sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (2.62)$$

A partir das equações acima é possível obter a expressão para se determinar a força cortante da nervura:

$$V_R = \frac{b \cdot I_y}{S_{cp}} \cdot \left\{ \frac{b}{2 \cdot S_{cp}} \cdot f_{ct} \cdot x_{cp} \cdot z_{cp} + \frac{S_{cp}}{b} \cdot \left( \frac{e}{I_y} - \frac{A_{cp}}{A \cdot S_{cp}} \right) \cdot \frac{dN_p}{dx} \right. \\ + \left[ \left( \frac{b}{2 \cdot S_{cp}} \cdot f_{ct} \cdot x_{cp} \cdot z_{cp} \right)^2 + \left( \frac{e}{I_y} - \frac{A_{cp}}{A \cdot S_{cp}} \right) \cdot f_{ct} \cdot x_{cp} \cdot z_{cp} \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{1}{A} - \frac{z_{cp} \cdot e}{I_y} \right) \cdot N_p \cdot f_{ct} + f_{ct}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.63)$$

Sendo:

- $h_{cp}$  distância entre o ponto crítico e a superfície inferior da laje;
- $x_{cp} \cdot z_{cp}$  coordenadas do ponto crítico, sendo  $x_{cp} = h_{cp} / \tan \beta \cong 35^\circ$ ;
- $f_{ct}$  resistência do concreto à tração;
- $N_p$  força de protensão das cordoalhas no ponto crítico;

### 2.3.8 Modelo segundo Collins *et al.* (2008)

Collins *et al.* (2008) propõe em seu modelo, que para elementos sem armadura transversal, a resistência ao cisalhamento pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{0,4}{(1 + 1500 \cdot \varepsilon_x)} \cdot \frac{1300}{(1000 + S_{xe})} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.64)$$

Sendo:

$f'_c$  resistência cilíndrica do concreto à compressão. Para concretos de elevada resistência o valor de  $\sqrt{f'_c}$  não deve ser superior a 8 MPa;

O parâmetro  $S_{xe}$  leva em conta a influência da dimensão máxima do agregado:

$$S_{xe} = \frac{35}{16 + a_g} \cdot S_x \geq 0,85 \cdot S_x \quad (2.65)$$

Sendo:

$S_x$  espaçamento da fissura que pode ser considerado igual a  $d_v$ , para elementos com armadura longitudinal somente no lado tracionado pela flexão, como em lajes alveolares ( $S_x \cong d_v = 0,9 \cdot d$ );

$a_g$  dimensão máxima do agregado graúdo (para concretos de alta resistência deve ser considerado zero).

Em elementos que possuam armadura de protensão reta em relação ao eixo, é recomendado que a deformação longitudinal,  $\varepsilon_x$ , seja calculada por:

$$\varepsilon_x = \frac{V \cdot (1 + M/V \cdot d_v) + (0,5 \cdot N - A_{ps} \cdot f_{p0})}{2 \cdot (E_s \cdot A_s + E_p \cdot A_{ps})} \quad (2.66)$$

Sendo:

$\varepsilon_x$	deformação do elemento na metade de sua altura;
$M$	momento fletor;
$N$	carga axial;
$V$	força cortante;
$A_s$	área da armadura longitudinal tracionada pela flexão;
$A_{ps}$	área da armadura protendida localizada no lado tracionado pela flexão;
$d_v$	altura de cisalhamento ou braço de alavanca à flexão, sendo adotado igual a $0,9d$ ;
$f_{p0}$	Tensão no aço protendido quando é nula a deformação do concreto ao redor.

Por meio dessas equações observa-se que a resistência ao cisalhamento está relacionada com o comprimento de transferência, tornando um tanto quanto difícil o dimensionamento das lajes alveolares tendo em vista a dificuldade de determinação exata deste comprimento.

### **2.3.9 Conclusões iniciais sobre os modelos de cálculo de LAPs**

No item 2.3 foram apresentados os principais modelos de cálculo (nacionais, europeus e norte americanos) de resistência ao esforço cortante de LAPs. O objetivo do item foi analisar a metodologia de cálculo de lajes alveolares e verificar a abordagem das aberturas e cortes oblíquos.

Após avaliar as formulações das normas nacionais e internacionais, conclui-se que nenhum modelo aborda as aberturas e cortes oblíquos em LAPs, confirmando a necessidade de estudo do tema.

### **3 Programa Experimental**

Esta pesquisa possui dois programas experimentais, sendo o primeiro chamado de Programa Experimental 1, desenvolvido no Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE) da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. O segundo denominado Programa Experimental 2 realizado no Laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Vale destacar que ambos os programas experimentais tiveram o apoio de empresas do setor privado e universidades públicas para a sua realização.

Uma empresa privada do setor de pré-fabricados, a Rotesma Indústria de Pré-Fabricados de Concreto, forneceu as lajes e grande parte dos materiais e equipamentos necessários. A Rotesma iniciou suas atividades em 1977, sendo atualmente especializada na produção de peças para estruturas de grandes obras. A empresa possui duas unidades industriais localizadas em Chapecó-SC e em Marialva-PR, com capacidade produtiva de aproximadamente 5000m<sup>3</sup> de concreto por mês, estando entre os 5 maiores fabricantes do sul do Brasil, e de acordo com a companhia esta já executou mais de 5 milhões de metros quadrados em obras no território nacional. Os dados confirmam a importância da companhia e a representatividade dos elementos estudados no cenário nacional.

Outra empresa que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho foi a Concrepav Concreteira, pertencente ao Grupo GNT, que forneceu o concreto utilizado nos capeamentos dos modelos contidos na segunda etapa experimental. A Concrepav trata-se de uma tradicional concreteira que iniciou suas atividades nesse ramo em 1978, atuando em diversos segmentos em todo o Brasil, assegurando sua importância e credibilidade no cenário da indústria da construção no Brasil, garantindo representatividade aos elementos estudados.

Além das empresas mencionadas, o trabalho contou com o apoio de duas importantes universidades do Brasil, a Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP e a Universidade Federal de São Carlos-UFSCar.

### **3.1 Análise experimental**

O comportamento das lajes alveolares sob esforço cortante está intimamente ligado à resistência a tração do concreto, tendo em vista a ausência de armadura transversal. Outros fatores como a geometria dos alvéolos, tipo de concreto empregado e o processo de fabricação também interferem em seu desempenho.

A ABNT NBR 9062:2006, que trata do projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, em seu item referente ao projeto de estruturas, faz menção a verificação experimental de elementos estruturais, em situações onde o cálculo analítico aproximado não conduz a resultados teóricos satisfatórios ou ainda onde a economia pode resultar de testes provenientes de protótipos.

Em complemento à norma acima referida, existe a ABNT NBR 14861:2011, que aborda lajes alveolares pré-moldadas de concreto estabelece os requisitos e procedimentos a serem atendidos nas etapas de projeto, produção e montagem de LAPs. Contudo, para as situações contempladas parcialmente por esta norma, tais como as apresentadas nesta pesquisa: lajes com aberturas ou cortes oblíquos, é permitido se fazer o uso de procedimentos, normas estrangeiras, ou literatura técnica consagrada.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, foi desenvolvido pela FIP (1992) um ensaio padrão para a determinação da resistência ao cisalhamento das LAPs. Para avaliar a resistência ao esforço cortante das lajes desta pesquisa, realizou-se um programa experimental segundo o método FIP (1992), que é referenciado pela ABNT NBR 14861:2011 como modelo de ensaio.

#### **3.1.1 Tipologia de ensaios**

Segundo COSTA (2009), há basicamente três propósitos para a realização de ensaios de lajes alveolares:

##### **3.1.1.1 Ensaios com o propósito de pesquisa e desenvolvimento**

Comumente denominados *P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)*, são ensaios exploratórios que buscam a melhor compreensão e entendimento de um determinado elemento estrutural. Visam o desenvolvimento do produto e

posteriormente o estudo de seu comportamento quando empregado em uma estrutura. Normalmente, esse tipo de ensaio é realizado em centros de pesquisa, pela necessidade de aquisição de dados, ou seja, é primordial uma adequada instrumentação dos ensaios para melhor caracterizar o comportamento estrutural. Os ensaios de P&D procuram ainda validar ou ajustar os modelos de cálculo já existentes para o projeto de estruturas.

#### **3.1.1.2 Ensaios para a avaliação de desempenho**

São ensaios que visam a certificação do produto por meio de um processo de Certificação da Qualidade. Usualmente o certificado é concedido por um órgão especializado e externo, ou seja, realizado por terceiros. A entidade avaliadora deve ser constituída por pessoas técnicas ou auditores capazes de emitir laudos que atestem a adequação do produto à parâmetros de qualidade previamente estabelecidos por norma.

#### **3.1.1.3 Ensaios para controle da qualidade**

São ensaios realizados durante o processo de produção dos elementos e tem como objetivo avaliar a conformidade do desempenho do produto com a sua certificação de qualidade.

### **3.2 Medidas preliminares**

A ABNT NBR 14861:2011, em seu item 6 – “Requisitos para o produto acabado”, apresenta as tolerâncias de fabricação que as lajes alveolares de concreto protendido devem atender.

Os elementos fora das tolerâncias definidas por esta norma podem ser utilizados em obra, desde que não comprometam o desempenho estrutural ou arquitetônico ou a durabilidade da edificação como um todo, e possuam comprovação e liberação do responsável pelo projeto estrutural, conforme recomendação da ABNT NBR 9062:2006.

As características geométricas de um elemento de laje influenciam diretamente em seu desempenho. As tolerâncias dimensionais devem ser obrigatoriamente respeitadas segundo a norma vigente.

Uma das etapas de produção que pode gerar desvios dimensionais é a de corte das lajes na pista de concretagem. Um elemento de laje que

apresenta um comprimento menor do que previsto em projeto, já levando em consideração as tolerâncias admissíveis, fornecerá uma condição de apoio insuficiente. Caso este possua um comprimento superior ao requerido, acrescido de tolerâncias, não ocorrerá a adequação da laje no vão da estrutura. Portanto, é notável a influência do comprimento das LAPs em suas condições de apoio.

A etapa produtiva de concretagem das lajes, feita por extrusão ou moldagem, pode prover elementos com desvios nas dimensões da seção transversal. Seções que possuem alvéolos com maior diâmetro, irão acarretar perdas de capacidade resistente, devido a uma menor área de concreto. Elementos com alvéolos de menor diâmetro, normalmente decorrente de uma mistura com relação água/cimento mais elevada, irão gerar um maior peso próprio, diminuindo assim sua capacidade final de suporte de carga.

Deve-se atenção a outros fatores como: protensão das cordoalhas e planicidade da pista de concretagem, com o objetivo de evitar que as lajes produzidas possuam as extremidades desniveladas, gerando esforços de torção.

Diante da importância das características geométricas das lajes, antes da realização de qualquer ensaio, é necessário executar uma análise dimensional do elemento ensaiado, conforme apresentado pela Figura 3.1.

**Figura 3.1: Coleta de dados para análise dimensional das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os principais dados coletados são:

- a) altura da seção;
- b) diâmetro dos alvéolos;

- c) largura das almas (nervuras internas e externas);
- d) largura da seção transversal;
- e) comprimento da laje;
- f) contra-flecha;
- g) dimensões dos cortes e aberturas (largura e comprimento);
- h) cobrimento das cordoalhas (posição na seção);
- i) escorregamento inicial das cordoalhas.

Os dados obtidos por meio da análise dimensional das lajes devem ser anotados para posterior utilização nos cálculos.

### **3.3 Ensaio padrão FIP**

Em decorrência do seu processo produtivo, as LAPs não possuem armadura transversal, dependendo da resistência a tração do concreto e da aderência das cordoalhas protendidas para suportar o esforço cortante.

Logo, o produto necessita de um controle de qualidade rigoroso que supra as características requeridas pelo projeto.

A EN 1168:2005, tomada como referência pelos manuais FIP, propõe os ensaios em escala real para: confirmar o modelo de cálculo para resistência ao esforço cortante usado no projeto; garantir o funcionamento adequado do equipamento de produção. A frequência para a execução de ensaios deve ser de no mínimo três elementos, e deve ser realizada quando:

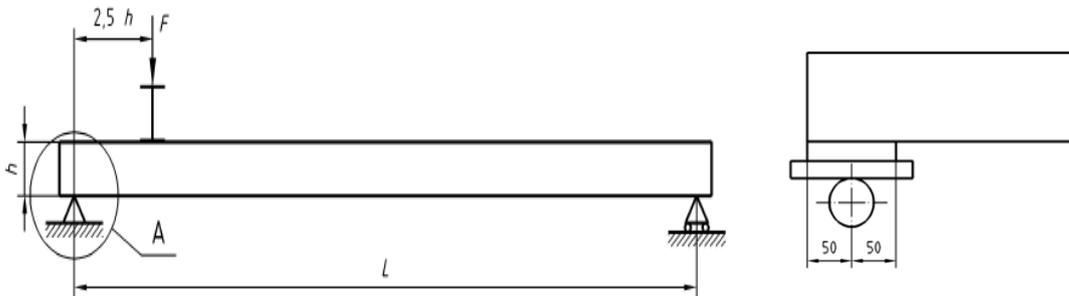
- houver um novo projeto, ou seja, a cada novo tipo de laje a ser produzida;
- existir alteração nas instalações ou equipamentos de produção das lajes;
- ocorrer uma mudança significativa no projeto;
- alterar o tipo de material empregado na produção dos elementos;
- mudar o processo produtivo.

### 3.3.1 Ensaio de resistência ao esforço cortante

Segundo a FIP (1992), as lajes a serem ensaiadas sob força cortante devem ser montadas de modo a possuir um arranjo isostático, ou seja, um vínculo com características de apoio fixo e outro de apoio móvel.

A aplicação de carga deve ocorrer a uma distância de  $2,5h$  do apoio móvel, a fim de garantir que não existam forças axiais oriundas da rotação do elemento ensaiado. O valor de  $h$  é referente à altura total da seção transversal da laje, contudo, não se deve ter uma distancia de aplicação menor que 600mm, com uma tolerância de  $\pm 25$ mm. As condições de apoio devem proporcionar uma distribuição uniforme das reações de apoio no elemento, evitando cargas pontuais ou o esforço de torção. A Figura 3.2 mostra um exemplo de disposição dos apoios e aplicação de carga na laje.

**Figura 3.2: Modelo de ensaio ao cisalhamento.**



**Fonte: EN 1168 (2005).**

Entre os apoios e a laje deve-se utilizar um material que melhore a distribuição do carregamento, tal como um elastômero (neoprene) de espessura 10mm ou um capeamento de argamassa ou gesso.

O carregamento deve ser aplicado por meio de um atuador e distribuído à laje através de uma viga metálica rígida. A rigidez da viga metálica deve obrigatoriamente ser suficiente de modo a garantir a distribuição uniforme do carregamento à laje. A altura da seção transversal da viga deve ser de no mínimo 250mm para o arranjo da Figura 3.2.

O carregamento deve ser aplicado em duas etapas, sendo que no primeiro ciclo deve-se atingir pelo menos 70% do carregamento último, com uma

tolerância de -2% a 7%.No segundo ciclo, o carregamento deve ser aplicado até a ruína.

A velocidade de aplicação do carregamento deve seguir:

A. Para o primeiro ciclo:

- duas etapas de igual amplitude em um minuto cada e subsequente retirada da carga.

B. Para o segundo ciclo:

- primeira etapa até 50% da carga final calculada em um período de um minuto;
- um segundo passo de até 75% da carga final calculada em um período de um minuto;
- subsequente aumento do carregamento com uma velocidade (taxa de carregamento) não superior a 10% da carga máxima calculada por minuto.

A carga máxima correspondente à ruína do elemento ensaiado deve ser registrada bem como seu mecanismo de falha.

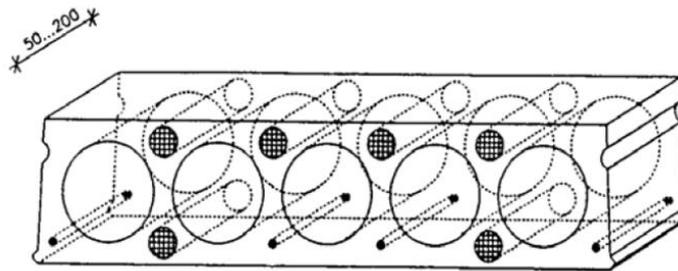
### **3.3.2 Caracterização do concreto**

De acordo com a FIP (1992) as valores característicos de resistência a compressão e tração do concreto podem ser determinados a partir de testemunhos extraídos de um trecho remanescente de laje pertencente a mesma pista de produção dos elementos a serem ensaiados à força cortante.

A amostra de laje de onde serão extraídos os testemunhos deve possuir um comprimento entre 50 e 200 mm.

É recomendada a realização de ensaios de compressão normal e diametral (tração) imediatamente após a extração de três a seis testemunhos cilíndricos, e preferencialmente da parte superior do trecho de laje, conforme a Figura 3.3.

**Figura 3.3: Extração de corpos de prova FIP(1992).**



**Fonte: FIP (1992).**

O controle de qualidade do concreto também pode ser realizado por meio de ensaios de corpos de prova (cúbicos, cilíndricos ou prismáticos), moldados a partir de amostras de concreto pertencentes ao mesmo lote de fabricação das lajes.

No Brasil são utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro da base de 150 mm e altura de 300 mm, ou mais comumente CPs de base 100 mm e altura 200 mm.

A ABNT NBR 6118 estima a resistência à compressão do concreto a partir de ensaios realizados aos 28 dias de idade em uma dada quantidade de corpos de prova cilíndricos moldados segundo a ABNT NBR 5738:2003.

De acordo com a ABNT NBR 5738:2003 a adensamento dos CPs depende do abatimento do concreto, podendo ser feito: manualmente por meio de uma haste de adensamento, com características padronizadas; mecanicamente por vibradores de imersão; ou mecanicamente por vibradores externos. No seu item 7.4.1, esta norma observa que para concretos especiais, o procedimento de moldagem de CPs pode ser modificado de modo a simular o adensamento a ser empregado na obra. Os corpos de prova desta pesquisa foram adensados por meio de haste de adensamento, para o caso do concreto da capa estrutural, e por mesa vibratória para o caso do concreto das lajes.

O abatimento do concreto deve ser determinado pela ABNT NBR NM67:1998, que especifica um método para determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra.

A quantidade de CPs moldados, entendida como amostragem, é abordada pela ABNT NBR NM 33:1998, que estabelece o procedimento para a coleta e a preparação de amostras de concreto fresco para subsequente realização de ensaios para determinação de suas propriedades.

Segundo a FIB (1992) o desvio padrão dos ensaios executados em corpos de prova extraídos (testemunhos) é maior do que o de corpos de prova moldados.

Contudo, em virtude do processo produtivo das lajes, o concreto empregado em sua fabricação possui abatimento (*slump*) zero, ou seja, trata-se de um produto extremamente seco que gera algumas dificuldades para a moldagem de corpos de prova. O procedimento mais comum é o de vibrar o concreto para uma melhor moldagem, com isso, é inevitável que exista uma divergência entre a realizada do concreto do corpo de prova e o da laje, devido à diferente taxa de compactação. Assim, é conveniente fazer uso do mesmo método de ensaio de controle de qualidade, em outras palavras, deve se padronizar o processo de moldagem de corpos de prova.

Procurando reproduzir de maneira mais fiel a realidade das características do concreto da laje, foram desenvolvidos aparelhos para simular com uma precisão considerável a compactação do concreto que passou por um processo de extrusão, porém seu uso não é corriqueiro no Brasil.

Outros dados podem possuir maior sensibilidade às divergências de realidade entre corpos de prova moldados e concreto extrudado, tal como módulo de elasticidade, necessitando assim de uma maior atenção.

A resistência à compressão é a principal característica de interesse do produto concreto e é normalmente determinada por meio de ensaio em corpos de prova.

Os ensaios de resistência à compressão, resistência a tração, módulo de lasticidade e controle estatístico do concreto e argamassa são realizados por meio da ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 7222:2011, ABNT NBR 12142:2010, ABNT NBR 8522:2008, sendo sua metodologia de cálculo descrita no Anexo 1.

### **3.3.3 Caracterização do aço**

Segundo a ABNT NBR 9062:2006, o controle do aço deve ser realizado de acordo com a ABNT NBR 7483:2004 que, no seu item 6.1.1.3, menciona que fica a critério do comprador verificar se as características dimensionais e mecânicas, especificadas pelo certificado de ensaio do material fornecido pelo fabricante, estão de acordo com as exigências normativas, e se serão mantidas

em sua aceitação ou se inspeções e se ensaios serão executados. Neste caso entende-se por comprador a indústria de pré-fabricados responsável pelo uso do aço. Em caso de realização de ensaios, o controle do aço segue a ABNT NBR 6349:1991 e a ABNT NBR 7484:1991.

### **3.4 Produção dos modelos ensaiados**

O processo de projeto, fabricação, transporte e entrega das lajes nos laboratórios foram cuidadosamente acompanhados. As lajes ensaiadas foram produzidas por moldagem e pertencem a mesma pista de concretagem, ou seja, mesmo lote fabricação, apresentando a mesma classe de concreto, tipo de cordoalha, e dimensões (salvo detalhes de aberturas e cortes oblíquos). Ao todo 11 exemplares possuindo 200 mm de altura e de 6000 mm de comprimento foram fabricados conforme os Projetos 01 e 02 do Anexo 2.

A seguir serão apresetadas as etapas do processo de produção das LAPs:

A primeira etapa do processo de produção é a preparação da pista de concretagem. A pista de concretagem é um dispositivo em concreto com sua face superior revestida em aço e com trilhos para a movimentação dos equipamentos de fabricação e corte das lajes. É necessário ainda que seja possível o posicionamento, protensão e desprotensão de armaduras usadas nas lajes, conforme a Figura 3.4.

**Figura 3.4: Pista de concretagem.**



**Fonte: O AUTOR.**

Anteriormente ao início da produção das lajes, a pista de concretagem deve passar pela etapa de limpeza, que visou eliminar qualquer tipo de resíduo sólido ou líquido que pudesse comprometer a qualidade visual e estrutural do

elemento. Esta etapa foi realizada por meio de um equipamento, conforme a Figura 3.5.

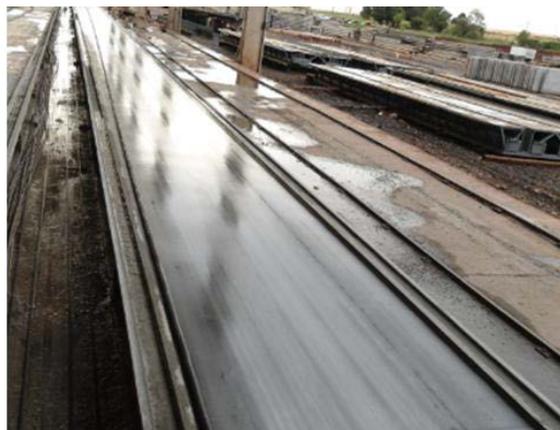
**Figura 3.5: Limpeza da pista de concretagem.**



**Fonte: O AUTOR.**

Realizada a limpeza da pista de concretagem, foi aplicado um agente desmoldante oleoso de origem vegetal em toda a sua extensão. Esta etapa também foi realizada por meio de um equipamento, conforme a Figura 3.6.

**Figura 3.6: Pista de concretagem após aplicação de desmoldante.**



**Fonte: O AUTOR.**

As lajes alveolares em estudo possuem como armadura cordoalhas que foram posicionadas sobre a pista de concretagem com o auxílio de um equipamento elétrico, conforme a Figura 3.7.

**Figura 3.7: Posicionamento das cordoalhas sobre a pista de concretagem.**



**Fonte: O AUTOR.**

Já posicionadas, as cordoalhas utilizadas foram protendidas (tensionadas) por um equipamento hidráulico, constituído por um macaco automático de protensão (MAP) ligado a uma unidade motriz (UM) que possui um indicador de tensão, conforme a Figura 3.8.

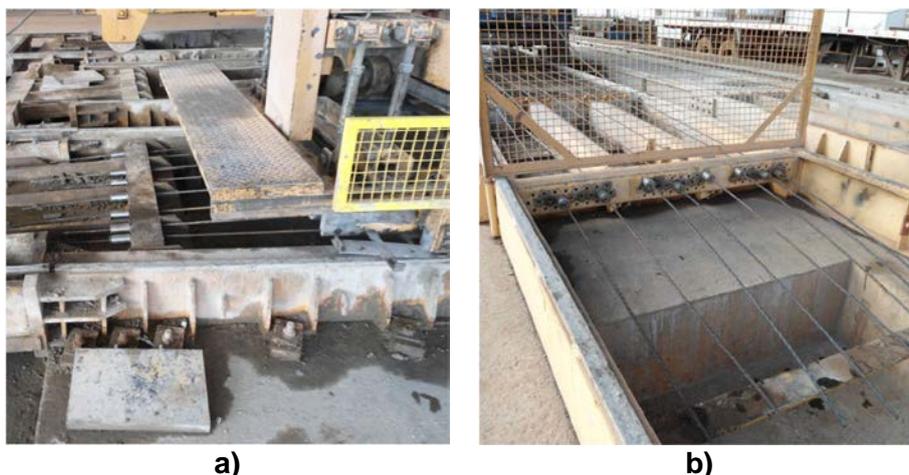
**Figura 3.8: Equipamento para protensão.**



**Fonte: O AUTOR.**

Em seguida foi realizada a ancoragem das cordoalhas por meio de cunhas de ancoragem que são presas a cabeceira da pista (Figura 3.9).

**Figura 3.9: Cabos ancorados por cunhas. a) início da pista; b) final da pista.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.10 mostra a pista de protensão pronta para o início do processo de produção.

**Figura 3.10: Pista de concretagem preparada para o início da produção.**



**Fonte: O AUTOR.**

Encerradas as etapas iniciais de preparação para o início da concretagem, o processo de moldagem foi iniciado. Este processo de produção consistiu na alimentação do equipamento de moldagem, designado moldadeira, com o concreto produzido na central de mistura da própria fábrica.

A moldadeira utilizada é um equipamento de fabricação nacional produzido pela WCH - Weiler-C.Holzberger Industrial Ltda. Ao ser alimentado em fluxo contínuo este equipamento faz a confecção de uma peça única sobre

armadura protendida devidamente posicionada ao longo da pista de concretagem, conforme a Figura 3.11.

**Figura 3.11: Equipamento de produção de lajes alveolares por moldagem.**



**Fonte: O AUTOR.**

Após a mistura do concreto na central dosadora, o material foi lançado na parte superior da máquina, conforme a Figura 3.12 e a Figura 3.13.

**Figura 3.12: Produção do concreto.**



**Fonte: O AUTOR.**

**Figura 3.13: Lançamento do concreto.**



**Fonte: O AUTOR.**

A moldagem foi feita por meio da compactação de um concreto com baixo abatimento sobre a pista de concretagem através de compactadores e vibradores que formaram a seção da laje em camadas distintas, conforme a Figura 3.14.

**Figura 3.14: Compactação e moldagem do concreto.**



**Fonte: O AUTOR.**

Durante a moldagem das lajes, estas tiveram sua superfície escovada a fim de garantir uma ponte de aderência com capa estrutural, conforme a Figura 3.15.

**Figura 3.15: Execução de ranhuras na superfície das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Concluída a etapa de moldagem, as lajes passaram pelo processo de medição com posterior marcação dos locais de corte e abertura, conforme a Figura 3.16.

**Figura 3.16: Marcação dos locais de corte e abertura.**



**Fonte: O AUTOR.**

A execução dos cortes e aberturas consistiu em romper o concreto, em seu estado fresco, da laje utilizando uma régua, trena e colher de pedreiro, de modo a evitar a danificação da estrutura do elemento, conforme a Figura 3.17.

**Figura 3.17: Execução dos cortes e aberturas.**



**Fonte: O AUTOR.**

Terminados os cortes e aberturas, as lajes foram submetidas ao processo de cura por meio do uso de lona, com o objetivo de evitar a perda de umidade e calor ao ambiente e desse modo propiciar a liberação da protensão da pista dentro do tempo previsto (aproximadamente 12 horas), conforme a Figura 3.18.

**Figura 3.18: Processo de cura das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

As lajes foram submetidas a cura por um período de 12 horas, e após receber a liberação do laboratório e desprotender a pista de concretagem, foi executado o corte das lajes por meio de uma serra, conforme a Figura 3.19.

**Figura 3.19: Corte das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Finalizado o corte das lajes, estas foram transportadas e armazenadas até que fossem enviadas para a realização dos ensaios na UFSCar e UNICAMP.

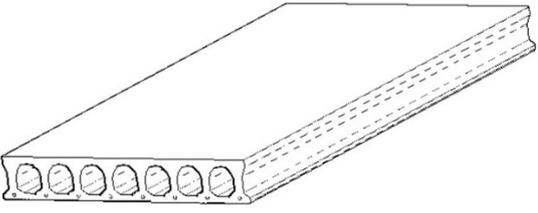
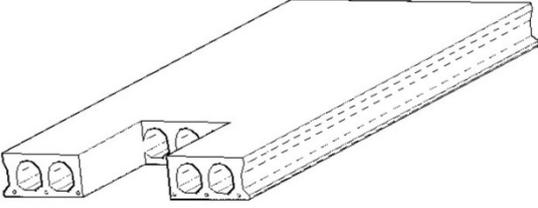
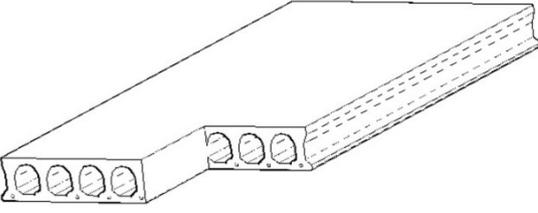
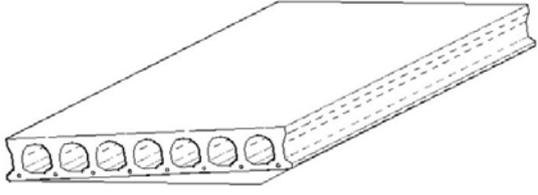
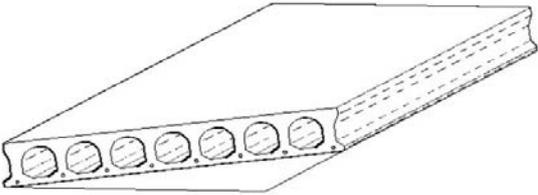
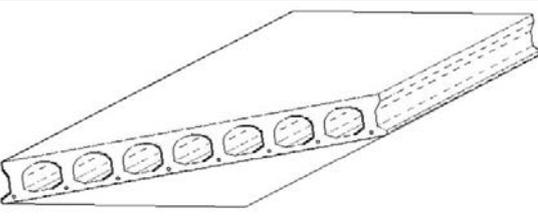
### **3.5 Programa Experimental 1**

O Programa Experimental 1 contou com a realização de ensaios de unidades de laje alveolar com aberturas e cortes oblíquos, além de lajes integras (referência), no Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

#### **3.5.1 Ensaios executados no Programa de Experimental 1**

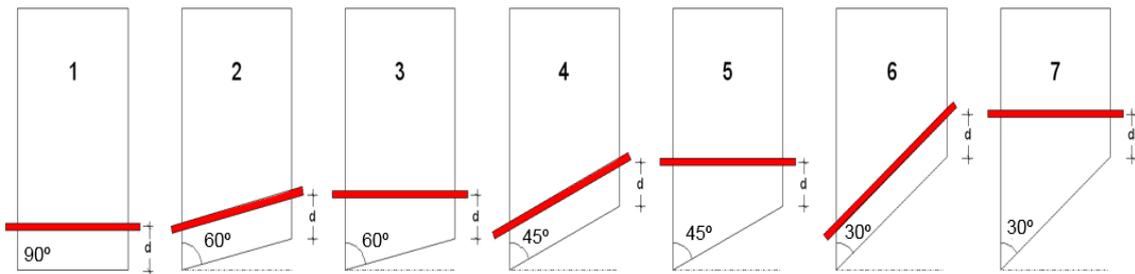
A quantidade e tipologia dos elementos ensaiados na primeira etapa de experimental são apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: Programa de ensaios.**

Tipo de laje	Esquema da LAP	Número de ensaios	Tipo de ensaio
<b>Referência</b>			
Laje 1: 90° <i>Referência</i>		1	Esforço cortante
<b>Abertura (40x40cm em ambos os casos)</b>			
Lajes 2 e 3: <i>Abertura central</i>		2	Esforço cortante
Lajes 4 e 5: <i>Abertura lateral</i>		2	Esforço cortante
<b>Corte oblíquo (ângulo em relação as cordoalhas)</b>			
Laje 6 e 7: <i>Corte 60°</i>		2	Esforço cortante
Laje 8 e 9: <i>Corte 45°</i>		2	Esforço cortante
Laje 10 e 11: <i>Corte 30°</i>		2	Esforço cortante
<b>Total de lajes ensaiadas</b>		<b>11</b>	

Para o estudo dos efeitos de cortes oblíquos na resistência ao esforço cortante, foram realizados ensaios com duas metodologias de aplicação de carregamento: carregamento paralelo ao apoio (viga de transferência paralela a face cortada; carregamento perpendicular ao eixo central da laje (viga de transferência em um ângulo similar aos modelos sem cortes oblíquos), conforme a Figura 3.20.

**Figura 3.20: Método de aplicação do carregamento em lajes com cortes oblíquos.**



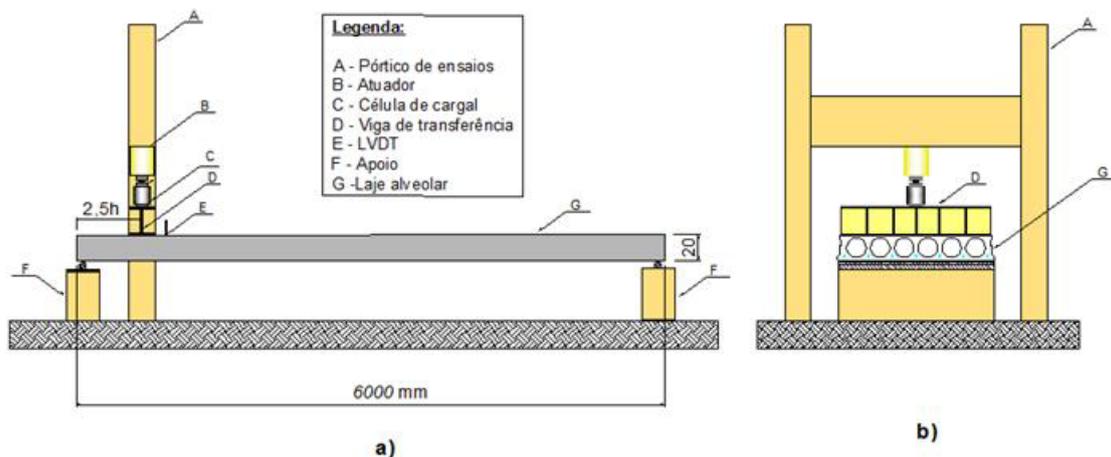
Fonte: O AUTOR.

Todas as lajes foram ensaiadas conforme o modelo FIP (1992) para a determinação da resistência ao esforço cortante.

### 3.5.2 Modelo de ensaio do Programa experimental 1 (*Test set up*)

Para avaliar a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares desta pesquisa, sendo o cisalhamento proveniente exclusivamente do esforço cortante, foi empregado o esquema de ensaio (*test set up*) que segue as recomendações da FIP (1992), conforme a Figura 3.21.

**Figura 3.21: Esquema de ensaio de resistência a força cortante: a) vista lateral, b) vista frontal.**



Fonte: O AUTOR.

### 3.5.3 Equipamentos de ensaio do Programa experimental 1

Os ensaios de resistência ao esforço cortante foram realizados no NETPRE – Núcleo de Estudos e Tecnologia de Pré-moldados de concreto, Figura 3.22. Este laboratório trata-se de um ambiente destinado a estudo, pesquisa e extensão na área de engenharia civil, mais precisamente na área de estruturas pré-fabricadas, possuindo os equipamentos necessários para pesquisas com elementos estruturais de grandes dimensões.

**Figura 3.22: Pórtico de ensaios NETPRE-UFSCar.**



**Fonte: O AUTOR.**

Para a realização dos ensaios, utilizou-se:

- Ponte rolante com capacidade de 50 kN para montagem dos ensaios;
- Atuador hidráulico da marca Enerpac com capacidade de 500kN, alimentado por uma bomba elétrica com controlador manual;
- Pórticos de reação para a realização dos ensaios;
- Ferramentas em geral para montagem/desmontagem do aparato de ensaios;
- Transdutores LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* ou Transformadores Diferenciais Variáveis Linearmente ) da marca

MM (*Micro-Measurements*) para a aferição dos deslocamentos ocorridos nos ensaios;

- Sistema de aquisição de dados *StrainSmart Data Acquisition System* da marca MM (*Micro-Measurements*) para captação dos dados fornecidos pela célula de carga e LVDT's;
- Microcomputador para operação do sistema de aquisição de dados;
- Célula da marca MSI (Micro Sensores Industriais) de carga com capacidade para 600 kN.

A caracterização do concreto das lajes foi realizada no Laboratório de Sistemas Estruturais – LSE da UFSCar, conforme descrito no item 3.5.4.1.

### **3.5.4 Caracterização dos materiais utilizados do Programa experimental**

#### **1**

Neste item serão apresentados os processos de caracterização dos principais materiais utilizados na fabricação das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas desta pesquisa.

#### **3.5.4.1 Concreto**

Para a produção dos elementos ensaiados foi utilizado um concreto de 35 MPa com abatimento de 0 mm, composto pela mistura de: cimento Portland do tipo CPV ARI, agregado miúdo (areia natural e areia artificial), agregado graúdo (brita 1 e brita 0), aditivo químico, adições minerais para correção de traço e melhora de desempenho, produzido em central de concreto própria com dosagem automatizada. O traço de concreto não foi disponibilizado pela empresa por questões de sigilo industrial

Todos os materiais empregados na mistura do concreto foram controlados desde seu recebimento. A amostragem foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 26:2009.

A caracterização foi executada seguindo as normas técnicas nacionais vigentes, conforme disposto na ABNT NBR 14961:2011. Seguiram-se ainda as

prescrições contidas no manual da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC), órgão que regula e controla a qualidade do pré-fabricado nos país.

Os ensaios realizados foram:

- i. Determinação da composição granulométrica dos agregados;
- ii. Determinação da massa específica e massa específica aparente dos agregados;
- iii. Determinação da absorção de água;
- iv. Determinação da porcentagem de material pulverulento;
- v. Determinação de impurezas orgânicas;
- vi. Determinação da resistência a tração do aço;
- vii. Determinação do abatimento do concreto pelo molde de tronco cônico;
- viii. Determinação da resistência a compressão do concreto;
- ix. Determinação do módulo elástico do concreto.

Além dos ensaios realizados nos materiais constituintes da mistura, também foram executados ensaios no concreto.

Corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foram moldados segundo a ABNT NBR 5738:2003, para a realização dos ensaios de:

- i. liberação da pista de concretagem para corte das lajes;
- ii. ensaios aos 28 dias de idade;
- iii. ensaios em idades referentes a realização dos ensaios.

A Figura 3.23 apresenta moldagem dos corpos de prova no momento da fabricação das lajes.

**Figura 3.23: Moldagem de corpos de prova das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

A caracterização do concreto das lajes foi realizada no Laboratório de Sistemas Estruturais – LSE da UFSCar, com uso de uma máquina universal de ensaio DL 60000 com capacidade para 600 KN da marca EMIC, conforme a Figura 3.24.

**Figura 3.24: Ensaio dos corpos de prova das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os corpos de prova foram retificados em uma retífica de corpos de prova da marca Solotest, conforme a Figura 3.25.

**Figura 3.25: Retífica dos corpos de prova das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Todos os ensaios foram executados de acordo com as normas: ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 7222:2011, ABNT NBR 12142:2010, e ABNT NBR 8522:2008.

A Tabela 3.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do concreto das lajes.

**Tabela 3.2: Ensaios de caracterização do concreto das lajes.**

<b>Concreto Laje</b>	<b>Ensaios de Carcterização do concreto</b>							
Slump 0 mm	Idade dos CP's = 59 dias (07/11/15) - No momento do ensaio das lajes							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
<b>Resistência à Compressão</b>	35600	44,42	48,41	N/A	0,12	5,67	39,09	N/A
	44000	54,90						
	36800	45,92						
<b>Tração Diametral</b>	13700	4,27	N/A	3,68	0,05	0,45	N/A	2,94
	12500	3,90						
<b>Módulo de Elasticidade</b>	31,26 GPa 29,98 GPa				<b><math>E_{médio} = 30,62</math> GPa</b>			
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

**Fonte: O AUTOR.**

Para todos os dados coletados foram calculados o coeficiente e variação e o desvio padrão, conforme as normas: ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 7222:2011, ABNT NBR 12142:2010, e ABNT NBR 8522:2008.

### 3.5.4.2 Aço

Para as cordoalhas empregadas na fabricação das lajes foi utilizado o laudo de ensaio de controle de qualidade fornecido pela indústria siderúrgica, Belgo Arcelor Mittal, responsável pela produção do aço e que possui sistema certificado pela ABNT NBR 7483:2005. As cordoalhas são do tipo CP 190 RB 9,5 de 7 fios, e suas principais características são apresentadas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3: Características das cordoalhas.**

Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm <sup>2</sup> )	Área mínima (mm <sup>2</sup> )	Massa aprox. (kg/1000m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
<b>Cordoalhas de 3 fios CP 190</b>							
Cord. CP 190 RB 3 x 3,0	6,5	22	22	171	41	37	3,5
Cord. CP 190 RB 3 x 3,5	7,6	30	30	238	57	51	
Cord. CP 190 RB 3 x 4,0	8,8	38	38	304	71	64	
Cord. CP 190 RB 3 x 4,5	9,6	47	46	366	88	79	
Cord. CP 190 RB 3 x 5,0							
<b>Cordoalhas de 7 fios CP 190</b>							
Cord. CP 190 RB 9,50	9,5	56	55	441	104	94	3,5
Cord. CP 190 RB 12,70	12,7	101	99	792	187	169	
Cord. CP 190 RB 15,20	15,2	143	140	1,126	266	239	
Cord. CP 190 RB 15,70	15,7	150	147	1,172	279	246	

**Fonte: ArcelorMittal – Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido.**

Para o lote de aço adquirido pela Rotesma e usado na fabricação das lajes em estudo, foram coletadas três amostras para a realização dos ensaios de controle de qualidade.

Os ensaios foram realizados pelo fabricante do aço e forneceram valores médios dentro das tolerâncias previstas em norma, conforme a Tabela 3.4.

**Tabela 3.4: Resultado dos ensaios de controle de qualidade do aço.**

Ensaio		Área da cordoalha	Alongamento 600mm	Carga 1%	Carga de Ruptura	Massa	Diâmetro da Cordoalha	Módulo de elasticidade
Limite de norma	Mínimo	54,90	3,50	92,00	102,00	415,00	9,30	191,24
	Máximo	57,30					9,90	
Unidade de medida		[mm <sup>2</sup> ]	[%]	[kN]	[kN]	[kg/1000m]	[mm]	[kN/mm <sup>2</sup> ]
Amostra 1		55,81	5,10	103,00	113,00	437,00	9,62	201,96
Amostra 2		55,71	5,10	101,00	112,00	437,00	9,62	197,39
Amostra 3		55,56	5,00	102,00	114,00	438,00	9,62	198,69

**Fonte: O AUTOR.**

Por tratar-se de um material produzido industrialmente, não foram realizados ensaios adicionais de controle de qualidade.

Os laudos dos ensaios realizados encontram-se no Anexo 3.

### **3.5.5 Medidas preliminares do Programa experimental 1**

As lajes foram identificadas, nomeadas e passaram pela análise dimensional, conforme mostrado na Figura 3.26.

**Figura 3.26: Análise dimensional das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

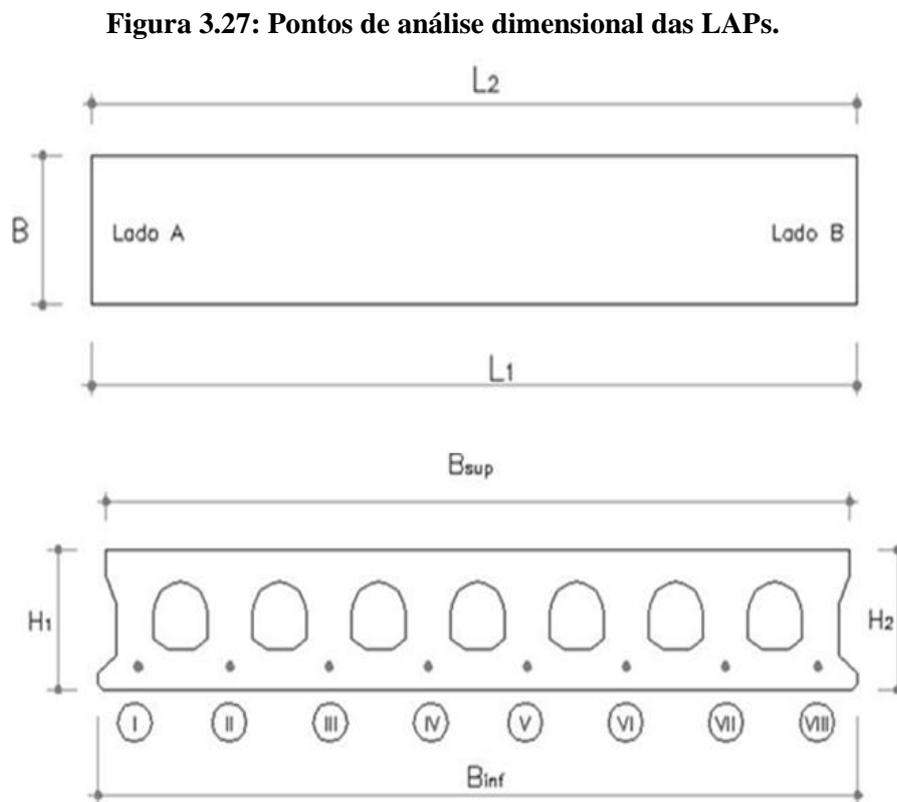
Os equipamentos usados para a realização da análise dimensional foram:

- paquímetro digital 150 mm – leitura 0,01 mm;

- escala metálica de aço de 500 mm – leitura 1 mm;
- trena metálica de 10000 mm – leitura 1 mm;
- esquadro de aço carbono de 300 mm;
- linha lisa de polietileno de espessura 0,8 mm.

Os dados coletados foram transferidos a planilhas para serem usados nos cálculos e análise das lajes estudadas.

A Figura 3.27 apresenta a legenda das dimensões aferidas pela análise dimensional.



**Fonte: O AUTOR.**

Na Tabela 3.5 são apresentadas as dimensões das LAPs ensaiadas nesta pesquisa.

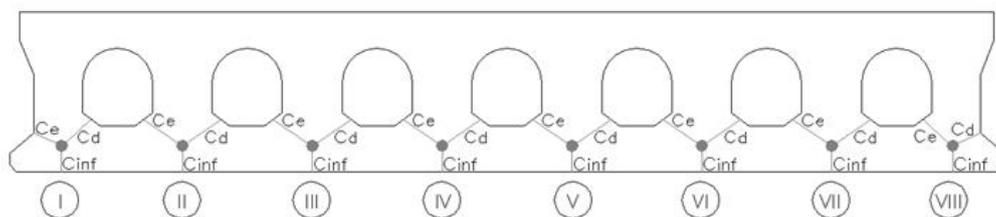
**Tabela 3.5: Dimensões das LAPs.**

Laje	Lado	Altura			Largura			Comprimento		
		H <sub>1</sub> [mm]	H <sub>2</sub> [mm]	H <sub>médio</sub> [mm]	B <sub>inf</sub> [mm]	B <sub>sup</sub> [mm]	B <sub>médio</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	L <sub>médio</sub> [mm]
1	A	208,00	207,00	207,50	1244,00	1224,00	1234,00	5982,00	5984,00	5983,00
	B	204,00	205,00	204,50	1242,00	1227,00	1234,50			
2	A	205,00	200,00	202,50	1245,00	1224,00	1234,50	5989,00	5968,00	5978,50
	B	199,00	205,00	202,00	1246,00	1230,00	1238,00			
3	A	205,00	204,00	204,50	1245,00	1225,00	1235,00	5982,00	5961,00	5971,50
	B	199,00	205,00	202,00	1245,00	1230,00	1237,50			
4	A	210,00	201,00	205,50	1237,00	1226,00	1231,50	5984,00	5985,00	5984,50
	B	204,00	202,00	203,00	1245,00	1216,00	1230,50			
5	A	204,00	202,00	203,00	1238,00	1226,00	1232,00	5989,00	5988,00	5988,50
	B	203,00	203,00	203,00	1241,00	1221,00	1231,00			
6	A	204,00	203,00	203,50	1240,00	1220,00	1230,00	5935,00	5245,00	5590,00
	B	199,00	205,00	202,00	1430,00	1425,00	1427,50			
7	A	200,00	200,00	200,00	1230,00	1245,00	1237,50	5900,00	5250,00	5575,00
	B	201,00	208,00	204,50	1425,00	1410,00	1417,50			
8	A	198,00	203,00	200,50	1225,00	1245,00	1235,00	5925,00	4725,00	5325,00
	B	193,00	201,00	197,00	1735,00	1715,00	1725,00			
9	A	199,00	200,00	199,50	1235,00	1250,00	1242,50	5975,00	4750,00	5362,50
	B	202,00	200,00	201,00	1740,00	1720,00	1730,00			
10	A	205,00	209,00	207,00	1238,00	1235,00	1236,50	5959,00	3845,00	4902,00
	B	205,00	209,00	207,00	2490,00	2445,00	2467,50			
11	A	189,00	210,00	199,50	1230,00	1245,00	1237,50	5965,00	3805,00	4885,00
	B	207,00	207,00	207,00	2500,00	2490,00	2495,00			

Fonte: O AUTOR.

As medidas de cobrimento e posição efetiva das cordoalhas foram efetuadas conforme a Figura 3.28.

**Figura 3.28: Medidas de cobrimento e posição efetiva das cordoalhas.**



Fonte: O AUTOR.

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores do cobrimento e posição efetiva das cordoalhas.

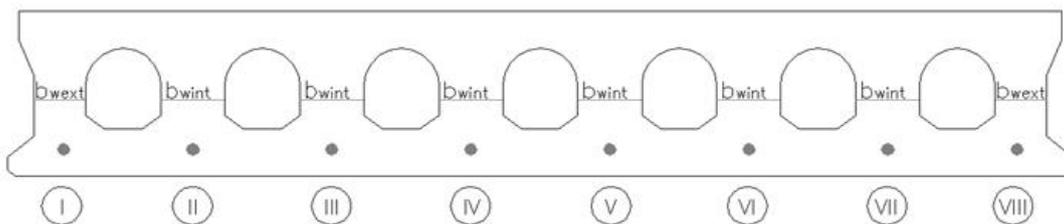
**Tabela 3.6: Valores de cobrimento e posição das cordoalhas.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Ce	27,00	32,00	34,00	33,00	48,00	39,00	36,00	33,00
	Cd	43,00	48,00	45,00	45,00	42,00	42,00	48,00	36,00
	Cinf	32,00	32,00	31,00	30,00	29,00	31,00	31,00	30,00
2	Ce	38,00	50,00	48,00	48,00	50,00	48,00	50,00	45,00
	Cd	38,00	50,00	40,00	38,00	38,00	35,00	33,00	25,00
	Cinf	31,00	30,00	32,00	29,00	28,00	30,00	32,00	33,00
3	Ce	40,00	48,00	45,00	47,00	50,00	50,00	51,00	47,00
	Cd	35,00	39,00	37,00	40,00	30,00	34,00	33,00	27,00
	Cinf	27,00	27,00	28,00	26,00	27,00	29,00	30,00	30,00
4	Ce	35,00	47,00	41,00	45,00	45,00	44,00	46,00	43,00
	Cd	31,00	33,00	35,00	38,00	27,00	31,00	31,00	29,00
	Cinf	31,00	30,00	30,00	30,00	27,00	32,00	30,00	28,00
5	Ce	28,00	33,00	33,00	29,00	40,00	36,00	36,00	30,00
	Cd	42,00	46,00	45,00	44,00	43,00	39,00	46,00	35,00
	Cinf	29,00	29,00	28,00	26,00	26,00	30,00	29,00	29,00
6	Ce	38,00	43,00	39,00	40,00	46,00	44,00	47,00	42,00
	Cd	35,00	37,00	39,00	37,00	34,00	34,00	35,00	31,00
	Cinf	25,00	25,00	25,00	23,00	23,00	25,00	24,00	24,00
7	Ce	34,00	33,00	34,00	34,00	40,00	39,00	38,00	36,00
	Cd	45,00	47,00	46,00	46,00	43,00	42,00	49,00	41,00
	Cinf	25,00	28,00	25,00	24,00	23,00	23,00	23,00	23,00
8	Ce	42,00	49,00	43,00	43,00	45,00	46,00	50,00	45,00
	Cd	37,00	38,00	39,00	40,00	31,00	35,00	34,00	30,00
	Cinf	22,00	24,00	24,00	23,00	23,00	25,00	28,00	27,00
9	Ce	35,00	46,00	44,00	44,00	46,00	45,00	47,00	41,00
	Cd	34,00	36,00	36,00	39,00	31,00	34,00	35,00	29,00
	Cinf	29,00	27,00	30,00	28,00	28,00	30,00	31,00	31,00
10	Ce	31,00	34,00	35,00	34,00	37,00	35,00	37,00	36,00
	Cd	43,00	45,00	45,00	45,00	42,00	38,00	46,00	38,00
	Cinf	24,00	24,00	25,00	22,00	26,00	25,00	25,00	22,00
11	Ce	35,00	48,00	39,00	44,00	42,00	45,00	45,00	43,00
	Cd	32,00	35,00	35,00	39,00	32,00	33,00	34,00	27,00
	Cinf	31,00	29,00	30,00	25,00	27,00	28,00	28,00	29,00

Fonte: O AUTOR.

As medidas da espessura das nervuras foram efetuadas conforme a Figura 3.29.

**Figura 3.29: Medidas da espessura das nervuras da laje.**



Fonte: O AUTOR.

Na Tabela 3.7 são apresentados os valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes.

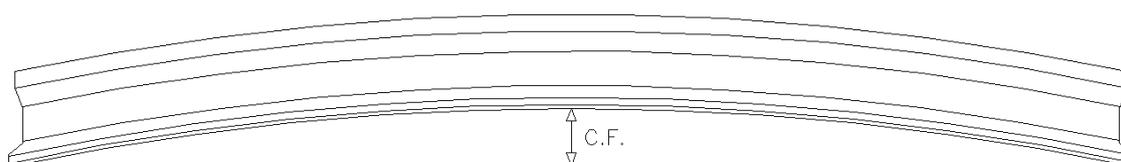
**Tabela 3.7: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Nervura							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	b <sub>ext</sub>	41,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
2	b <sub>ext</sub>	40,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	48,00	43,00	43,00	38,00	45,00	42,00	*
3	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	47,00	43,00	43,00	39,00	44,00	43,00	*
4	b <sub>ext</sub>	36,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	40,00	41,00	38,00	44,00	42,00	*
5	b <sub>ext</sub>	43,00	*	*	*	*	*	*	40,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
6	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
7	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*
8	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	40,00	37,00	42,00	40,00	*
9	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	38,00	43,00	41,00	*
10	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	39,00	42,00	45,00	45,00	*
11	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*

**Fonte: O AUTOR.**

As medidas de contra-flecha das lajes foram realizadas antes do início dos ensaios e efetuadas conforme a Figura 3.30.

**Figura 3.30: Medida da contra-flecha da laje.**



**Fonte: O AUTOR.**

A medida foi tomada sempre em uma das laterais do modelo. Para as lajes com aberturas e cortes oblíquos a contra-flecha foi medida na lateral íntegra. Na Tabela 3.8 são apresentados os valores da contra-flecha das lajes.

**Tabela 3.8: Valores da contra-flecha das lajes.**

Contra-flecha [mm]	Laje										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	25,00	28,00	35,00	18,00	20,00	19,00	19,00	22,00	25,00	17,00	18,00

**Fonte: O AUTOR.**

Para os modelos com aberturas e para o de referência, foram medidos os escorregamentos iniciais das cordoalhas, para serem comparados com os valores obtidos após os ensaios.

Na Tabela 3.9 são apresentados os valores dos escorregamentos iniciais ( $A_i$ ) das cordoalhas das lajes medidos antes dos ensaios por meio de um paquímetro.

**Tabela 3.9: Valores do escorregamento inicial das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	$A_i$	0,53	0,40	0,77	0,67	0,73	0,42	0,62	0,87
2	$A_i$	0,47	0,42	0,81	*	*	0,27	0,62	0,96
3	$A_i$	0,40	0,50	0,21	*	*	0,51	0,15	0,68
4	$A_i$	0,68	0,25	1,61	0,96	0,19	*	*	*
5	$A_i$	0,99	0,92	0,34	1,12	0,93	*	*	*

**Fonte: O AUTOR.**

Após a coleta dos dados da análise dimensional, as lajes foram preparadas para serem posicionadas no local definitivo de ensaio.

### 3.5.6 Preparação dos modelos do Programa experimental 1

Todas as lajes foram pintadas com tinta látex branca, para ajudar na visualização e identificação das aberturas de fissuras, além de sinalizar o escorregamento das cordoalhas, conforme a Figura 3.31.

**Figura 3.31: a) Processo de pintura das lajes; b) Pintura executada.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os elementos ensaiados foram posicionados sobre dois apoios, sendo estes concebidos de modo a atuarem como: apoio fixo (metálico, rígido, e com elemento de contato em madeira e neoprene), e apoio móvel (metálico, rígido, com elemento de contato em madeira e neoprene de largura 50mm e espessura 5mm, e película de graxa) conforme a Figura 3.32.

**Figura 3.32: Aparelho de apoio fixo.**



**Fonte: O AUTOR.**

Uma película de graxa é aplicada entre a madeira e a viga metálica do apoio móvel afim de minimizar forças axiais oriundas da rotação do elemento ensaiado, conforme a Figura 3.33.

**Figura 3.33: Aplicação de graxa entre o apoio de madeira e a viga metálica.**



**Fonte: O AUTOR.**

Com as lajes próximas aos apoios foi feita a marcação para o correto posicionamento, garantindo o apoio mínimo e o ponto exato de aplicação do carregamento, segundo recomendação da FIP (1992), conforme a Figura 3.34.

**Figura 3.34: Posicionamento das lajes para ensaio.**

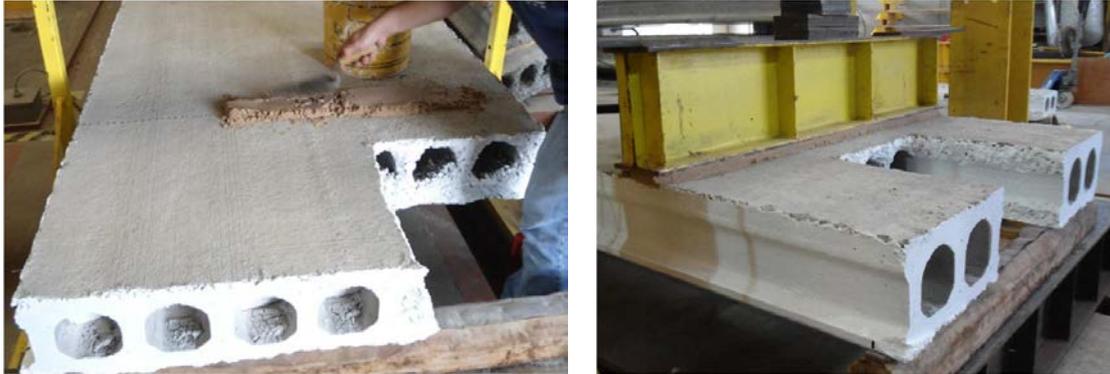


**Fonte: O AUTOR.**

Após o posicionamento, aplicou-se uma fina camada de areia úmida sobre a laje na região de contato com a viga de transferência, conforme a Figura

3.35. O objetivo da camada de regularização com areia é a de promover uma melhor e mais uniforme distribuição do carregamento na laje.

**Figura 3.35 : Execução da regularização com areia sobre a laje.**



**Fonte: O AUTOR.**

Com a viga de transferência posicionada, instalou-se a célula de carga e os transdutores para aquisição de dados, conforme a Figura 3.36.

**Figura 3.36: Montagem do esquema de ensaio.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os procedimentos acima descritos foram utilizados em todos os ensaios desta pesquisa.

### 3.5.7 Execução dos ensaios do Programa experimental 1

Neste item serão apresentados os ensaios de resistência ao esforço cortante nas LAPs desta pesquisa.

Para cada um dos ensaios realizados serão apresentados os valores de:

- Quantidade, tipo e diâmetro das cordoalhas utilizadas;
- $f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto de fabricação da laje;
- $f_{ctk}$  = resistência característica à tração do concreto de fabricação da laje;
- $E_c$  = módulo de elasticidade do concreto de fabricação da laje;
- $f_{t, aço}$  = resistência à tração da cordoalha de fabricação da laje;
- $H$  = altura da seção transversal da laje;
- $L$  = comprimento da laje;
- $B$  = largura;
- $\sum b_w$  = somatório das nervuras internas e externas da laje;
- $A_c$  = área de concreto da seção transversal da laje;
- $P$  = força de protensão após perdas aplicada em cada uma das 8 cordoalhas.

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições.

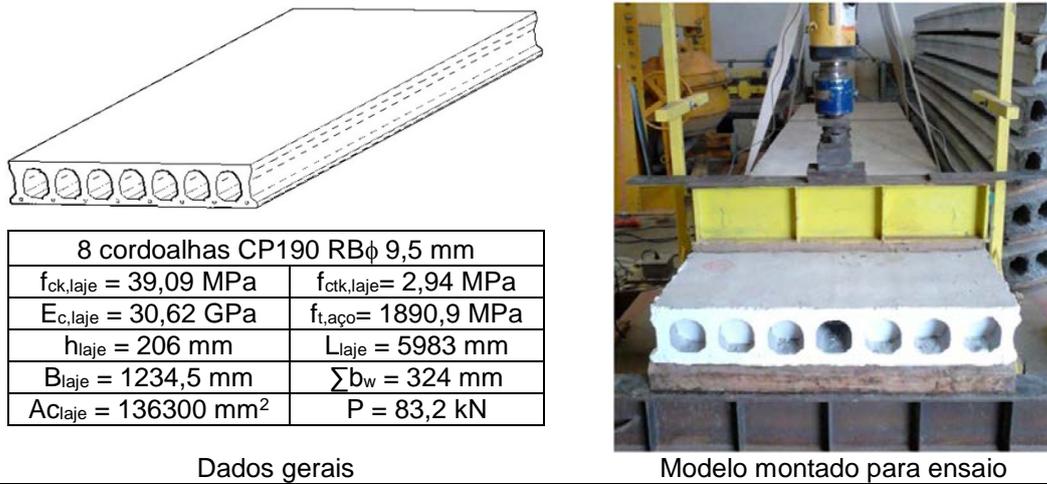
Os valores de carregamento e deslocamento dos ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento.

#### 3.5.7.1 Ensaio da Laje 1

A Laje 1, sem abertura ou corte oblíquo, foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. Este modelo foi usado como referência para as comparações dos resultados das demais lajes do programa experimental 1.

A Figura 3.37 mostra os dados gerais do ensaio.

**Figura 3.37: Ensaio Laje 1.**

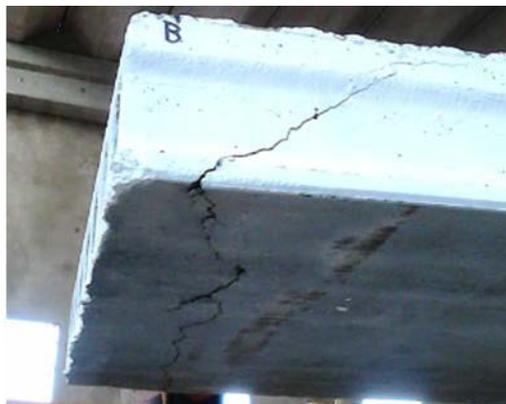


**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 1, a ruptura do modelo em ambas as faces, direita e esquerda, se deu tipicamente por força cortante.

Observa-se aparentemente as fissuras na parte inferior do modelo não mostram padrões de ruptura ou fissuração de torção, conforme a Figura 3.38.

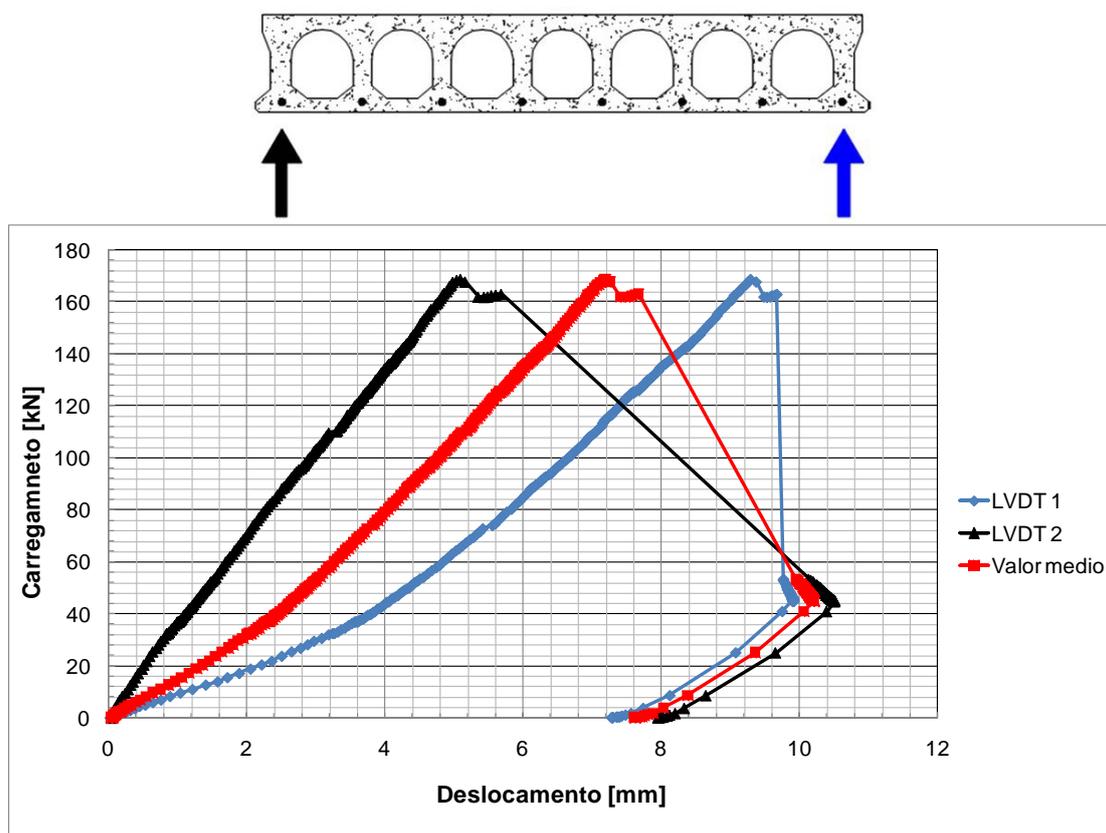
**Figura 3.38: Fissuras na região inferior da Laje 1.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.39 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no ensaio da Laje 1 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.39: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 1.**



**Fonte: O AUTOR.**

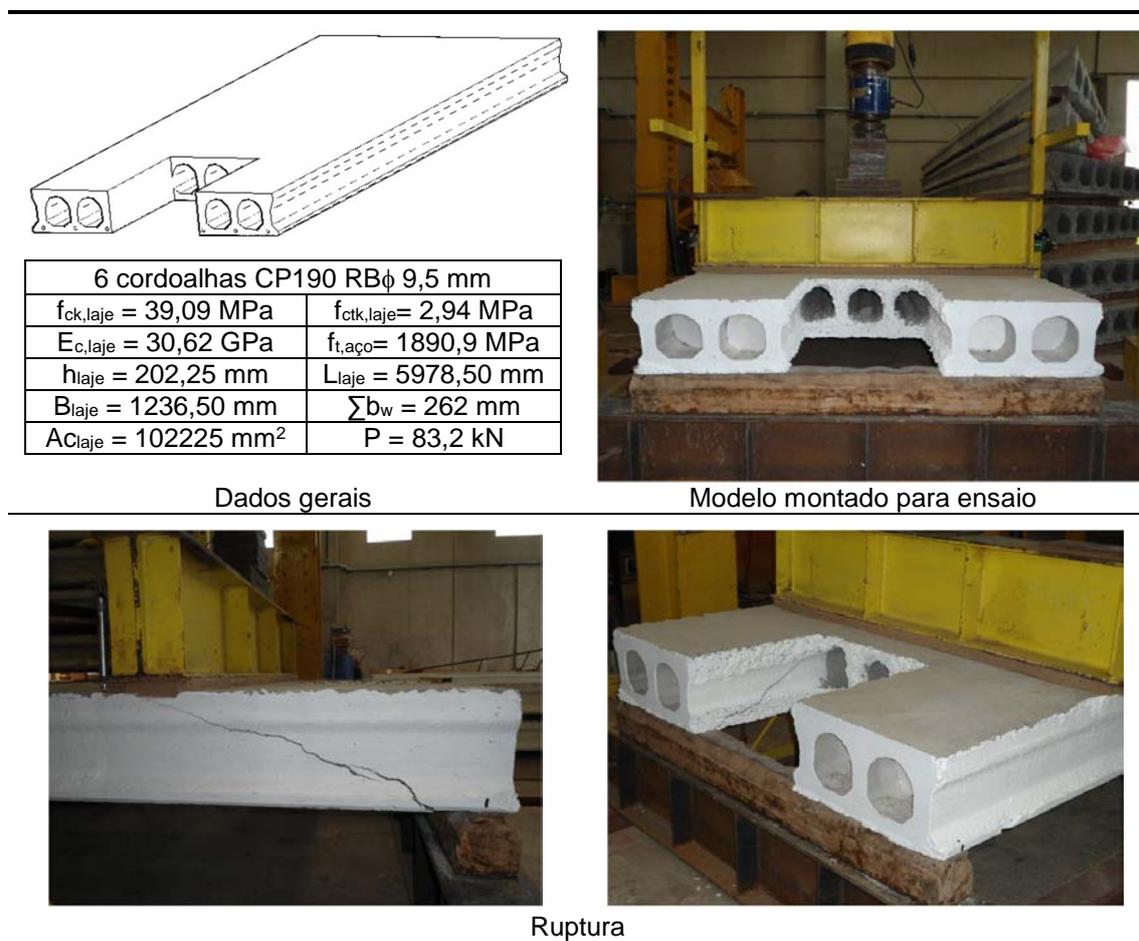
De acordo com os resultados descritos para a Laje 1, observa-se que houve desvio no valor final dos deslocamentos aferidos pelos LVDT's. Tal fato pode ter sido causado por uma acomodação do neoprene dos apoios ou do capeamento utilizado entre a laje e a viga de transferência de carregamento. Entretanto, conforme a análise do escorregamento das cordoalhas, descritas mais adiante no item 3.5.9.5, a dispersão dos valores pode ter origem na diferença de tensão existente nas cordoalhas, em decorrência do processo de fabricação das lajes onde a protensão das cordoalhas é executada individualmente, conforme descrito no item 3.4.

### 3.5.7.2 Ensaio da Laje 2

A Laje 2, com uma abertura central de aproximadamente 400 x 400 mm em uma de suas extremidades, foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3.

A Figura 3.40 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita e esquerda da laje, respectivamente.

Figura 3.40: Ensaio da Laje 2.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 2, a ruptura do modelo apresentou fissuras apenas na face direita, se deu tipicamente por força cortante. Não houve sinais visíveis de fissuração na face esquerda.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior da Laje 2 mostram o padrão de ruptura apenas na face direita, conforme a Figura 3.41.

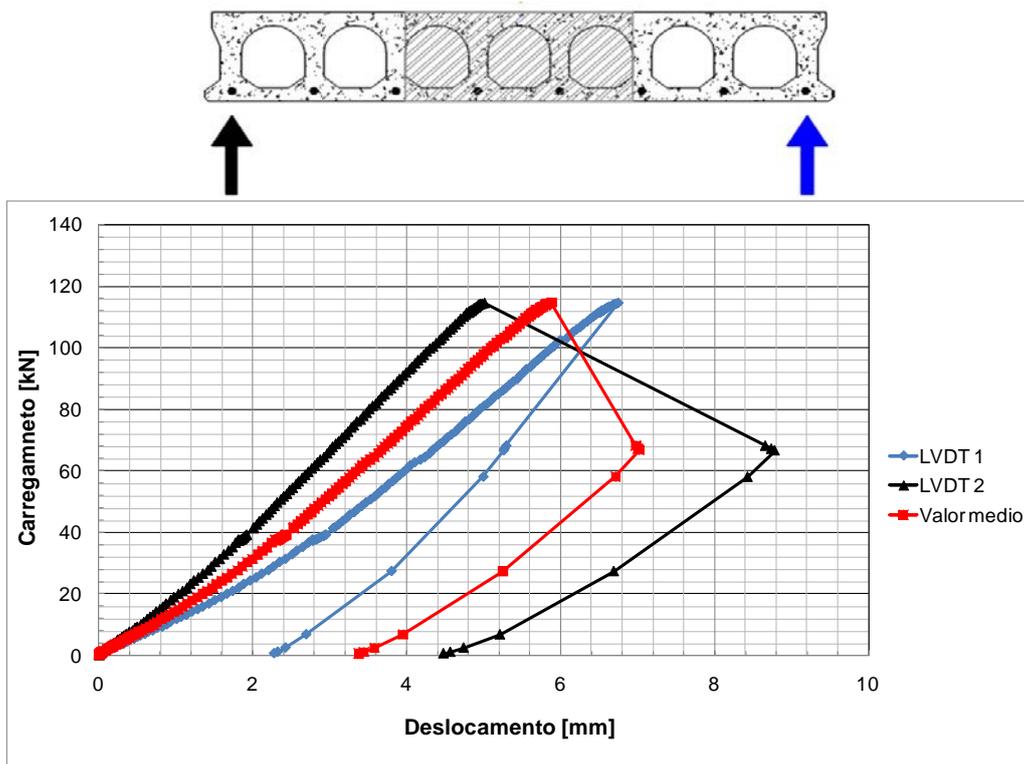
**Figura 3.41: Fissuras na região inferior da Laje 2.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.42 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 2 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.42: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da laje 2.**



**Fonte: O AUTOR.**

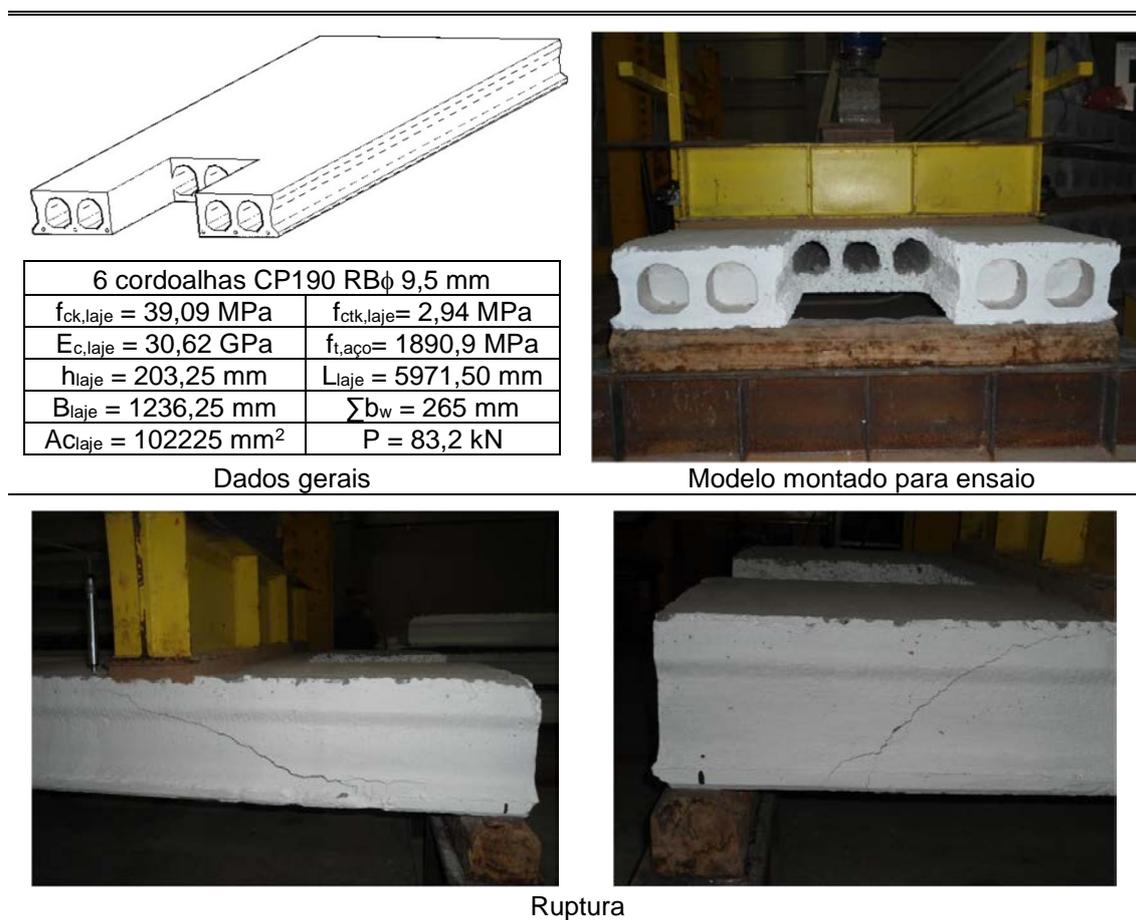
De acordo com os resultados descritos para o Ensaio da Laje 2, observa-se que os LVDT's apresentaram diferentes deslocamentos. Tal fato pode ter sido causado por uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento, ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pela abertura. Contudo, conforme a análise do escorregamento das

cordoalhas, descritas mais adiante no item 3.5.9.5, a dispersão dos valores pode ter origem na diferença de tensão existente nas cordoalhas devido ao processo produtivo onde a protensão das cordoalhas é executada individualmente, conforme, descrito no item 3.4.

### 3.5.7.3 Ensaio da Laje 3

A Laje 3, com uma abertura central de aproximadamente 400 x 400 mm, foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4, e o ensaio foi realizado conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.43 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.43: Ensaio da Laje 3.**



Fonte: O AUTOR.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior da Laje 3 não mostram padrões de ruptura com influência de torção, conforme a Figura 3.44.

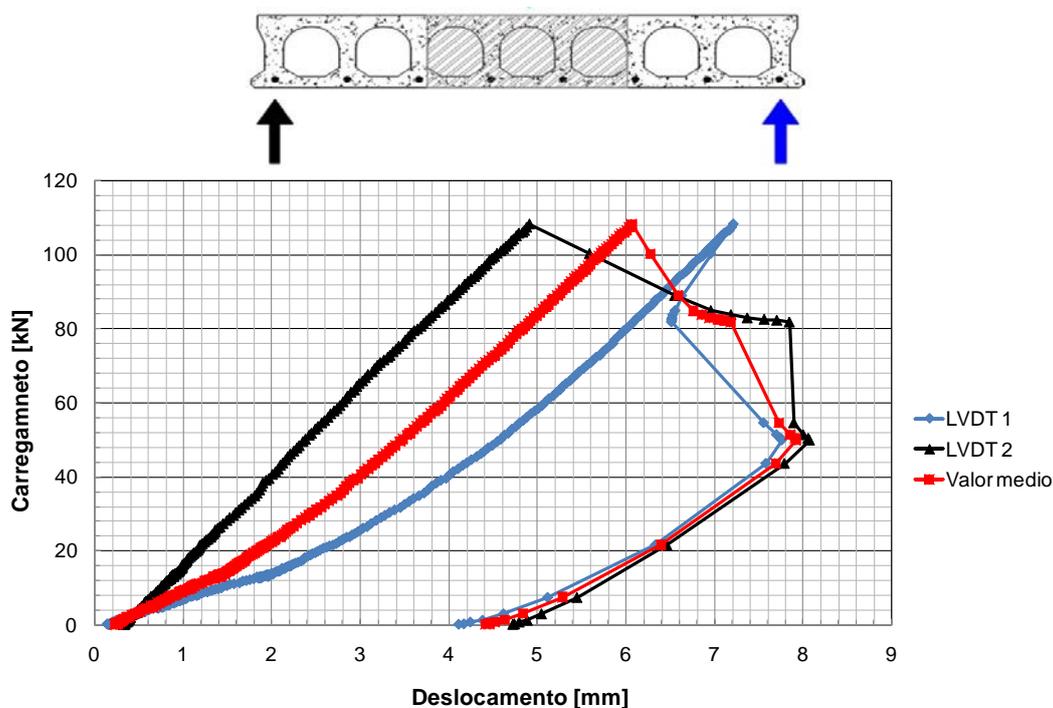
**Figura 3.44: Fissuras na região inferior da Laje 3: a) lado direito; b) lado esquerdo.**



**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 3, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento e apresentou fissuras em ambas as faces. Na face direita observou-se fissuras tipicamente de ruptura por força cortante, enquanto a face esquerda notou-se fissuras de cisalhamento com interação de flexão e escorregamento de cordoalha. A Figura 3.45 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 3 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.45: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da laje 3.**



**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com os resultados descritos para o Ensaio da Laje 3, observa-se que os LVDT's apresentaram diferentes deslocamentos. Tal fato pode ter sido

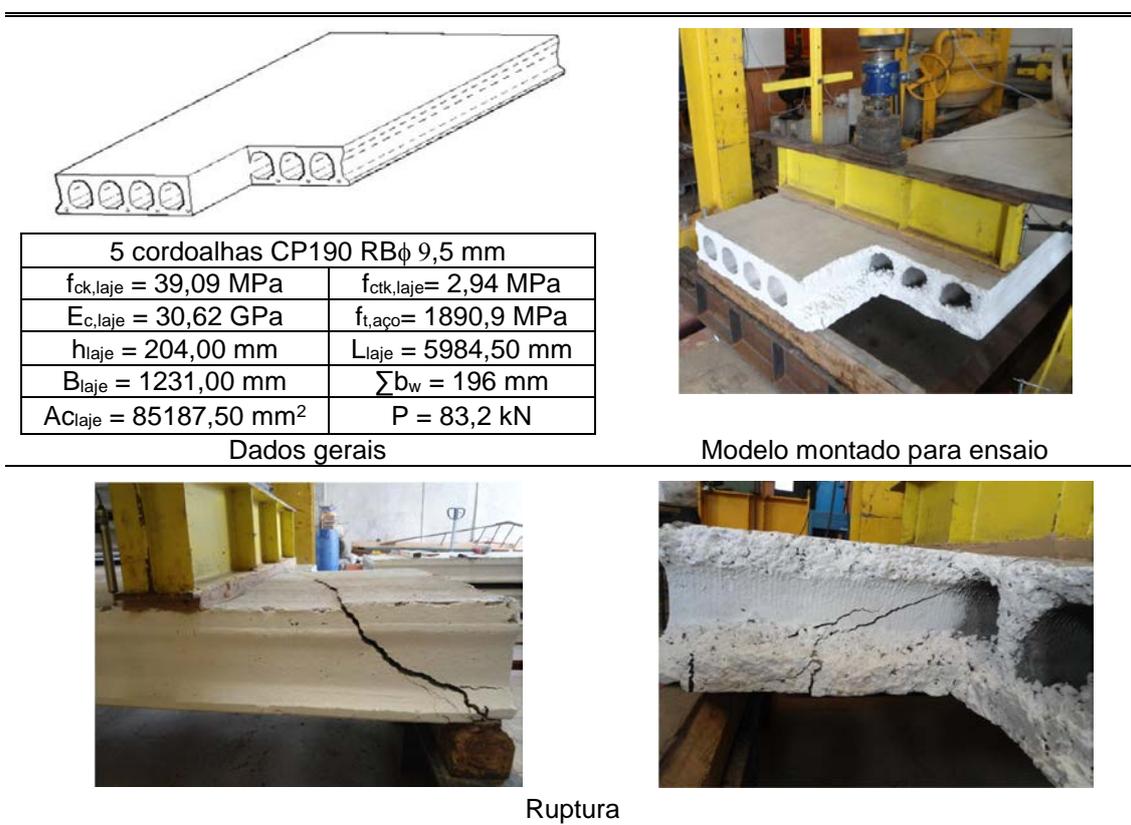
causado por uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento, ou pelo desequilíbrio gerado pela abertura, que pode ter comprometido a rigidez local da laje no instante da liberação da protensão. Entretanto, conforme a análise do escorregamento das cordoalhas, descritas mais adiante no item 3.5.9.5, a dispersão dos valores pode ter origem na diferença de tensão existente nas cordoalhas, em decorrência do processo de fabricação das lajes, onde a protensão das cordoalhas é executada individualmente, conforme descrito no item 3.4.

### 3.5.7.4 Ensaio da Laje 4

A Laje 4, com uma abertura lateral de aproximadamente 400 x 400 mm, foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3.

A Figura 3.46 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.46: Ensaio da Laje 4.**



Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 4, a ruptura do modelo em ambas as faces, direita e esquerda, se deu por força cortante.

Na parte superior da laje observa-se uma aparente tendência de ruptura por torção partindo do lado direito da laje (lado da abertura), conforme a Figura 3.47.

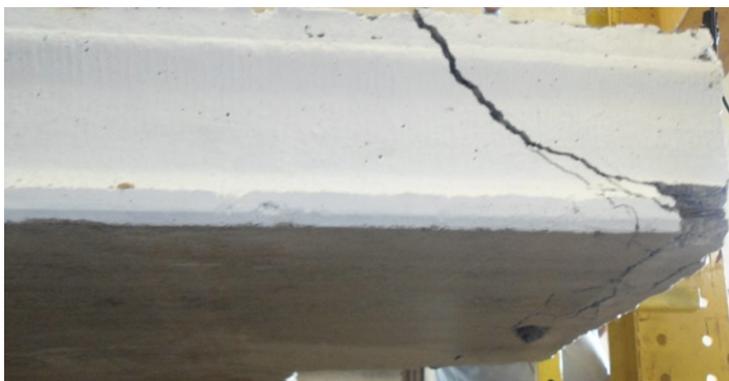
**Figura 3.47: Fissuras na região superior da Laje 4.**



**Fonte: O AUTOR.**

Diferentemente da parte superior, a face inferior não apresentou padrões de torção, conforme a Figura 3.48.

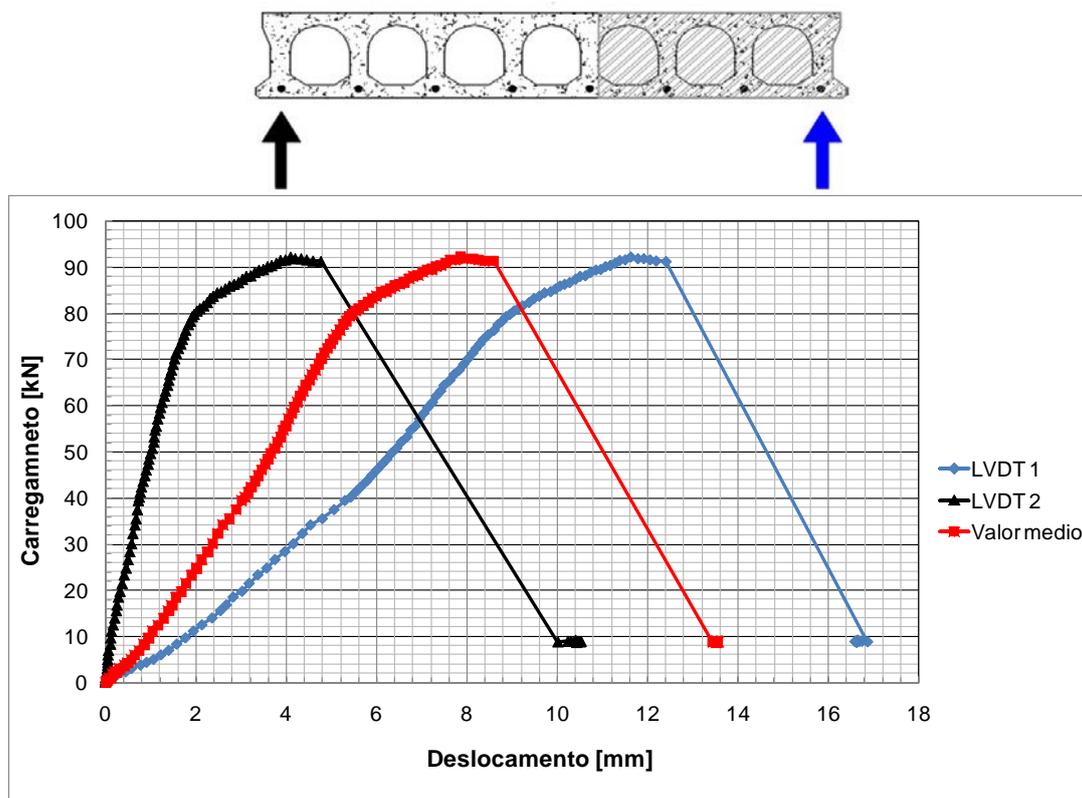
**Figura 3.48: Fissuras na região inferior da Laje 4.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.49 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 4 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

Figura 3.49: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 4.



Fonte: O AUTOR.

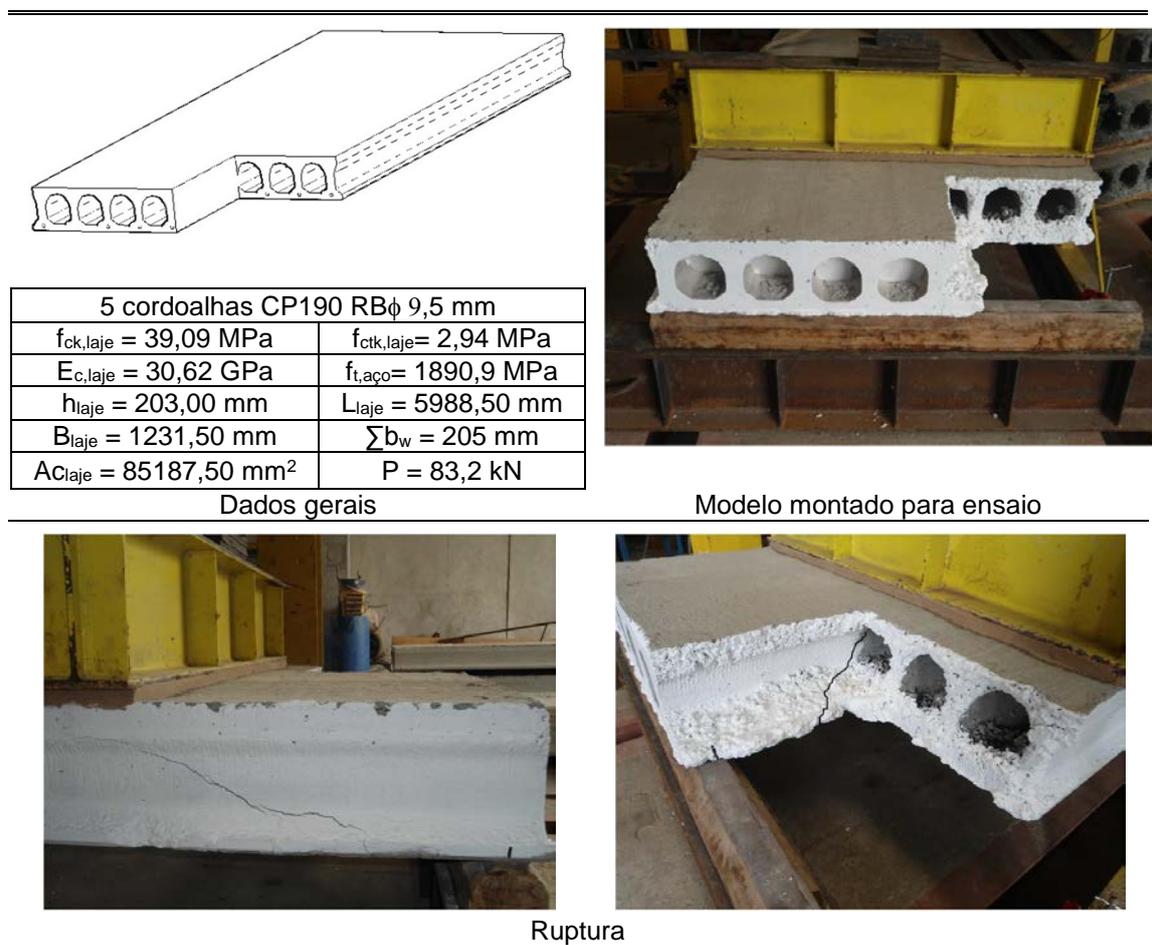
De acordo com os resultados descritos para o Ensaio da Laje 4, pode-se observar que os LVDT's apresentaram diferentes deslocamentos. Tal fato pode ter sido causado por uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento, ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pela abertura, que pode ter comprometido a rigidez local da laje no instante da liberação da protensão. Além disso, o fato de que o modelo não é simétrico no seu apoio, faz com que essa diferença seja esperada. Entretanto, conforme a análise do escorregamento das cordoalhas, descritas mais adiante no item 3.5.9.5, a dispersão dos valores pode ter origem na diferença de tensão existente nas cordoalhas, em decorrência do processo de fabricação das lajes, onde a protensão das cordoalhas é executada individualmente, conforme descrito no item 3.4.

### 3.5.7.5 Ensaio da Laje 5

A Laje 5, com uma abertura lateral de aproximadamente 400 x 400 mm em uma de suas extremidades, foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3.

A Figura 3.50 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita e esquerda da laje, respectivamente.

Figura 3.50: Ensaio da Laje 5.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 5, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento e apresentou fissuras em ambas as faces. Na face direita observou-se fissuras tipicamente de ruptura por força cortante, enquanto a face esquerda notou-se fissuras de cisalhamento com interação de flexão e escorregamento de cordoalha. Observa-se ainda uma discreta tendência a torção por parte do lado direito da laje (lado da abertura), conforme a Figura 3.51.

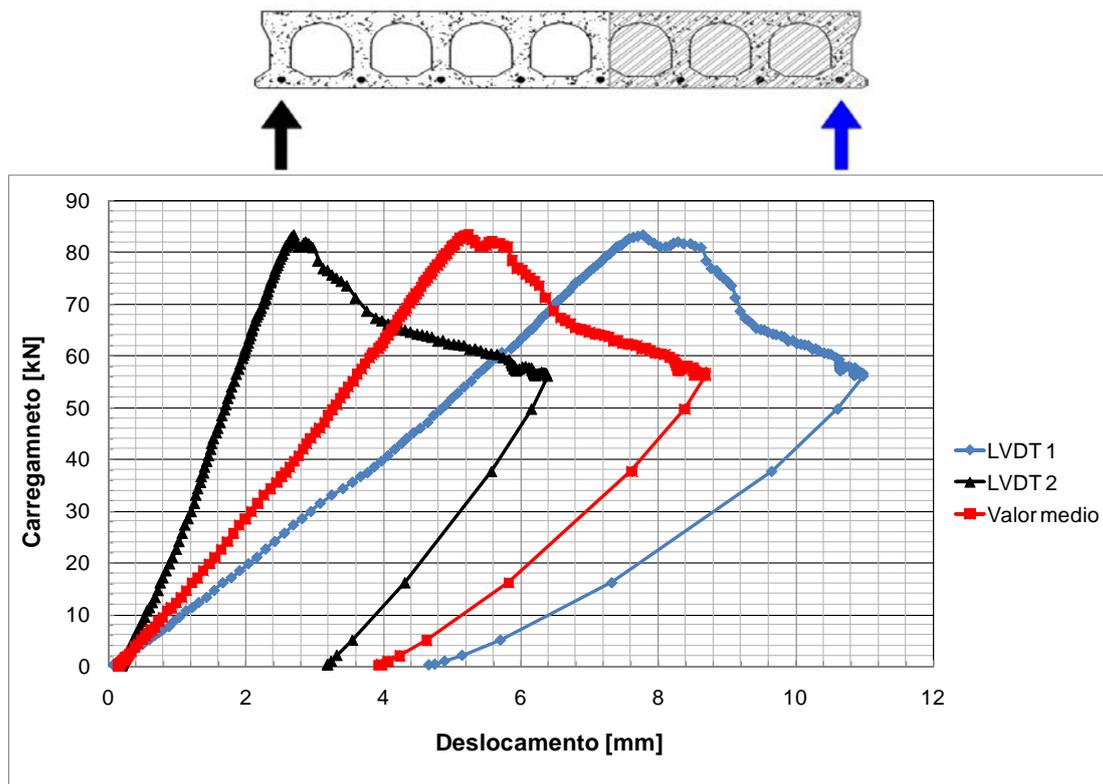
**Figura 3.51: Fissuras na região inferior da Laje 5.**



Fonte: O AUTOR.

A Figura 3.52 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 5 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.52: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 5.**



Fonte: O AUTOR.

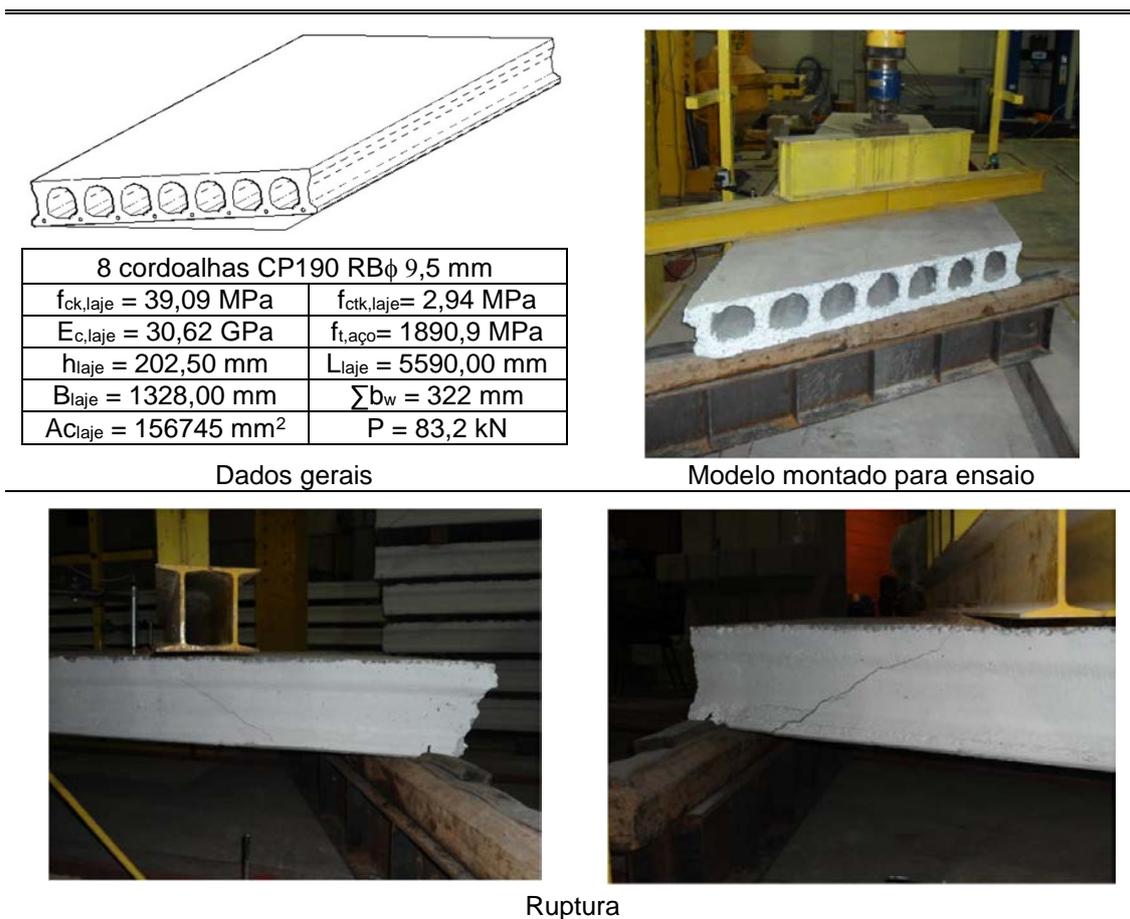
De acordo com os resultados descritos para o Ensaio da Laje 5, pode-se observar que os LVDT's apresentaram diferentes deslocamentos. Tal fato pode ter sido causado por uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento, ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pela abertura, que pode ter comprometido a rigidez local da

laje no instante da liberação da protensão. Além disso, o fato de o modelo não ser simétrico no seu apoio, faz com que seja esperada essa diferença. Entretanto, conforme a análise do escorregamento das cordoalhas, descritas mais adiante no item 3.5.9.5, a dispersão dos valores pode ter origem na diferença de tensão existente nas cordoalhas, em decorrência do processo de fabricação das lajes, onde a protensão das cordoalhas é executada individualmente, conforme descrito no item 3.4.

### 3.5.7.6 Ensaio da Laje 6

A Laje 6, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 60° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.53 mostra os dados gerais do ensaio.

**Figura 3.53: Ensaio da Laje 6.**



Dados gerais

Modelo montado para ensaio

Ruptura

**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 6 a ruptura do modelo apresentou fissuras típicas de força cortante em ambas as faces.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior do modelo mostram padrões de torção, conforme a Figura 3.54.

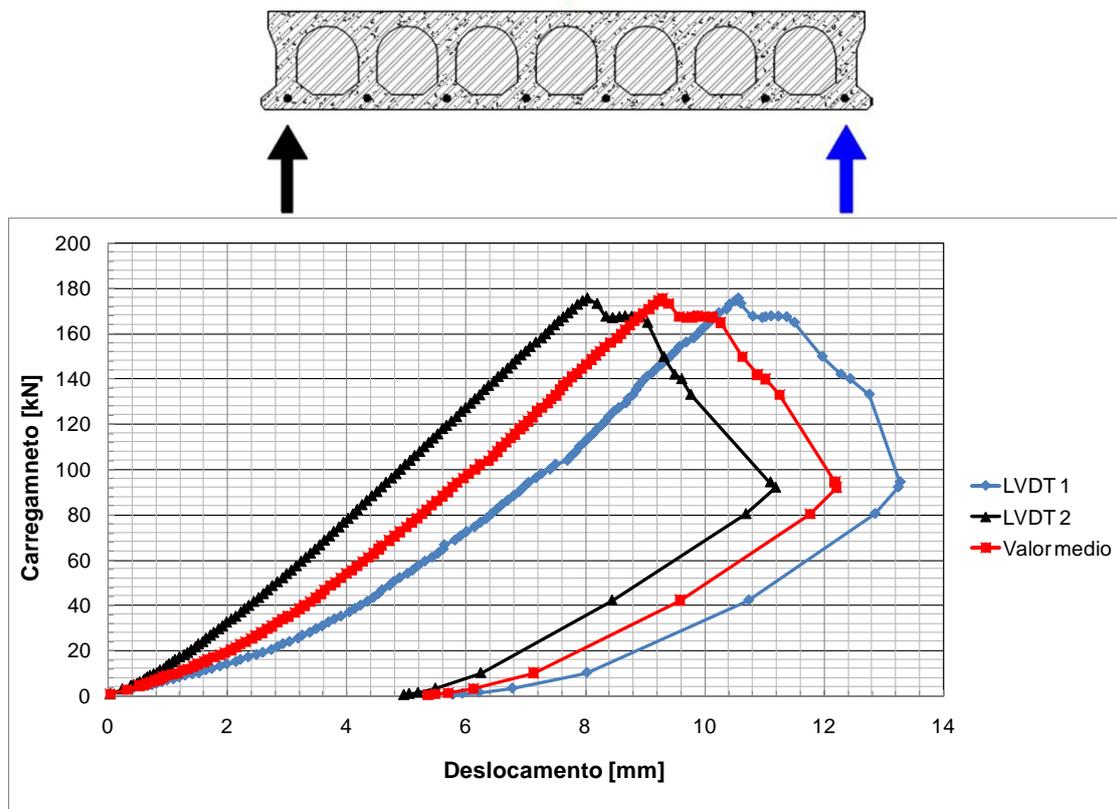
**Figura 3.54: Fissuras na região inferior a aplicação do carregamento da Laje 6.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.55 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 6 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje.

**Figura 3.55: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 6.**



**Fonte: O AUTOR.**

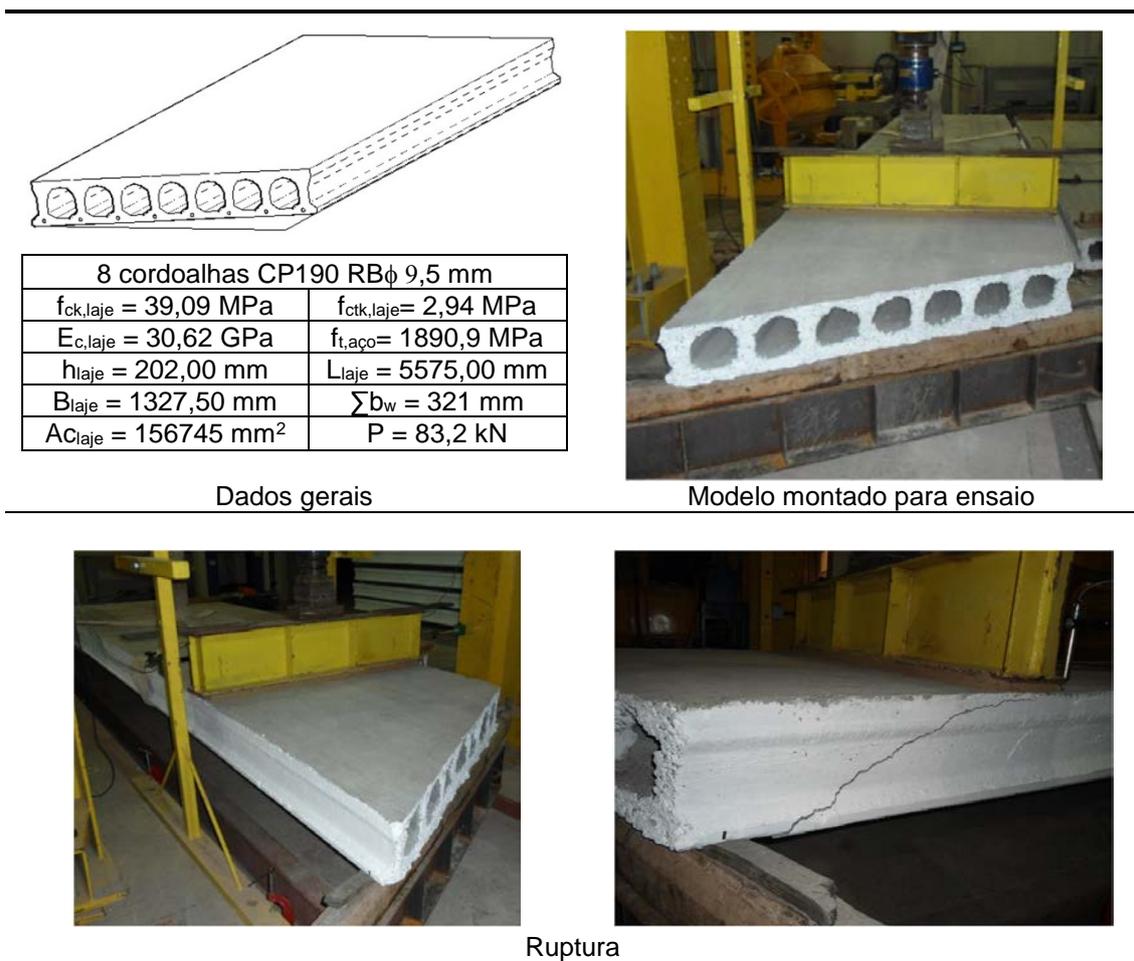
De acordo com os resultados descritos para a Laje 6 pode-se observar que a face esquerda, LVDT 1, apresentou um maior deslocamento em relação a

face direita. O fato se dá principalmente pela diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje. Somado a isso, como nos exemplos anteriores, pode existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### 3.5.7.7 Ensaio da Laje 7

A Laje 7, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 60° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.56 mostra os dados gerais do ensaio.

Figura 3.56: Ensaio da Laje 7.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 7 a ruptura do modelo apresentou fissura apenas face esquerda, com padrão típico de força cortante.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior do modelo mostram padrões de torção, conforme a Figura 3.57.

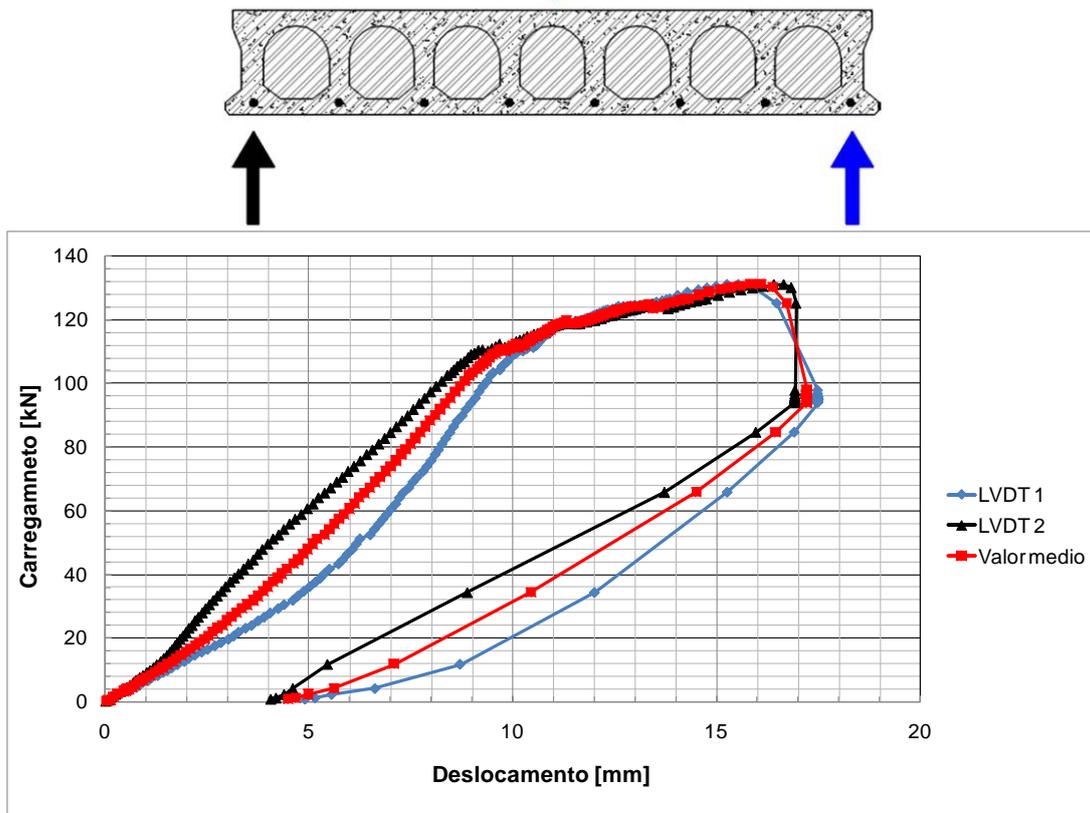
**Figura 3.57: Fissuras na região da ruptura da Laje 7.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.58 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 7 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.58: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 7.**



**Fonte: O AUTOR.**

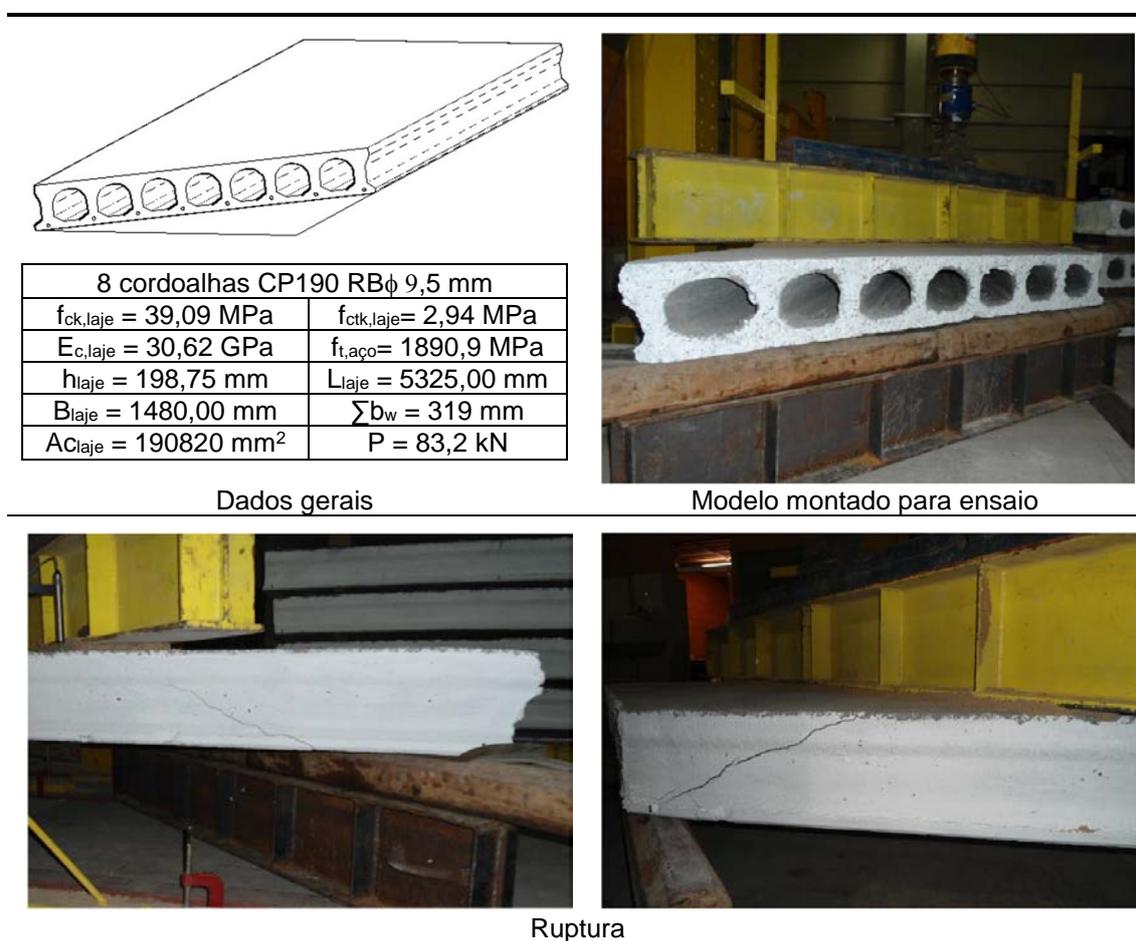
De acordo com os resultados descritos para Laje 7 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's, mesmo existindo

uma diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje, e como nos exemplos anteriores, mesmo sendo possível existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### 3.5.7.8 Ensaio da Laje 08

A Laje 08, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 45° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.59 mostra os dados gerais do ensaio.

Figura 3.59: Ensaio da Laje 08.



Dados gerais

Modelo montado para ensaio

Ruptura

Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 08 a ruptura do modelo apresentou fissuras em ambas as faces com padrões de força cortante.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior do modelo mostram aparentemente padrões de torção, conforme a Figura 3.60.

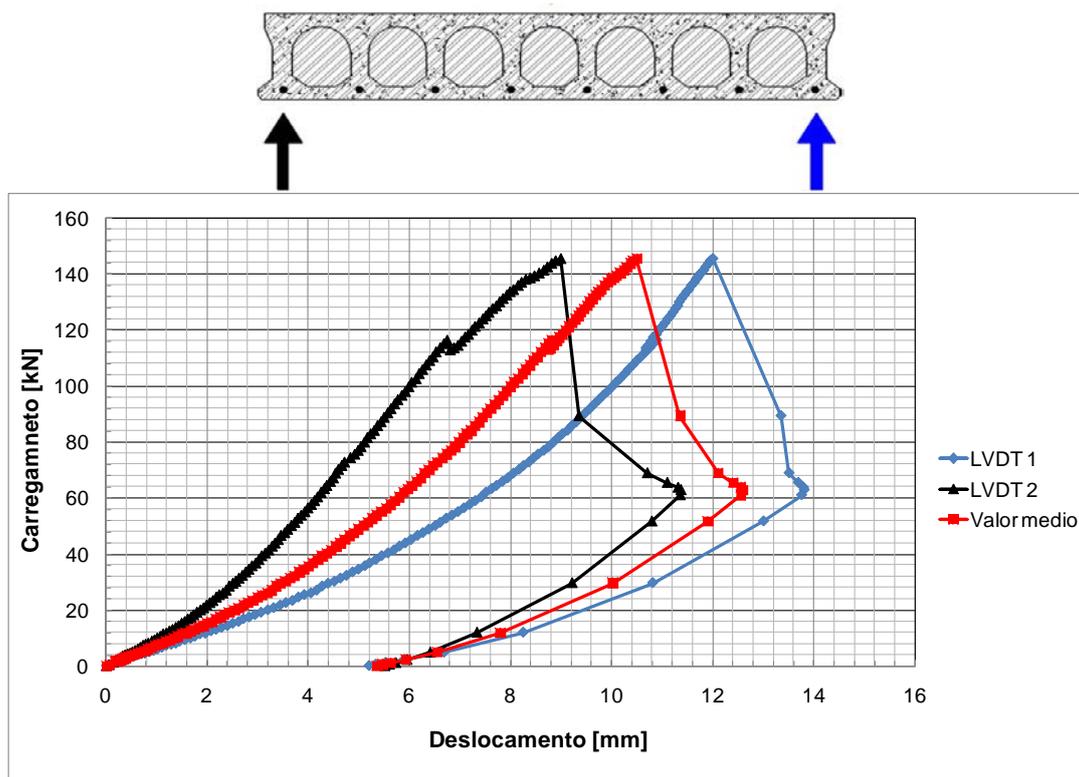
**Figura 3.60: Fissuras na região inferior da Laje 08.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.61 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da laje 08 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.61: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 08.**



**Fonte: O AUTOR.**

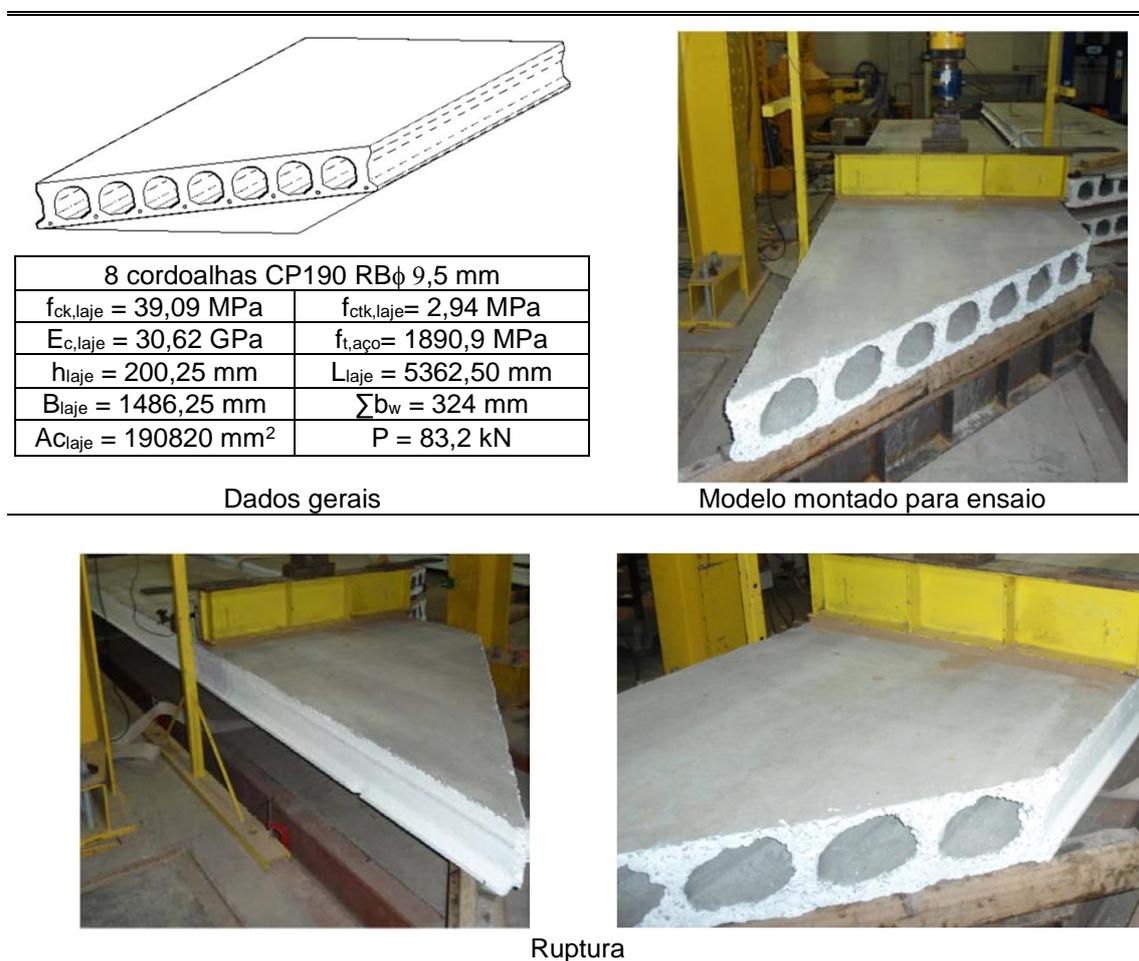
De acordo com os resultados descritos para a Laje 08 pode-se que o deslocamento na face esquerda, LVDT 1, foi superior que da direita. O fato se da principalmente pela diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje.

Somado a isso, como nos exemplos anteriores, pode existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### 3.5.7.9 Ensaio da Laje 09

A Laje 09, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 45° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.62 mostra os dados gerais do ensaio.

**Figura 3.62: Ensaio da Laje 09.**



Dados gerais

Modelo montado para ensaio

Ruptura

**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 09 a ruptura do modelo não apresentou fissuras nas faces próximas à aplicação do carregamento.

Observou-se ainda que a fissura de cortante, no momento da ruptura, surgiu na parte oposta a aplicação do carregamento, ou seja, próxima ao apoio fixo, e foi notada apenas na face direita, conforme a Figura 3.63.

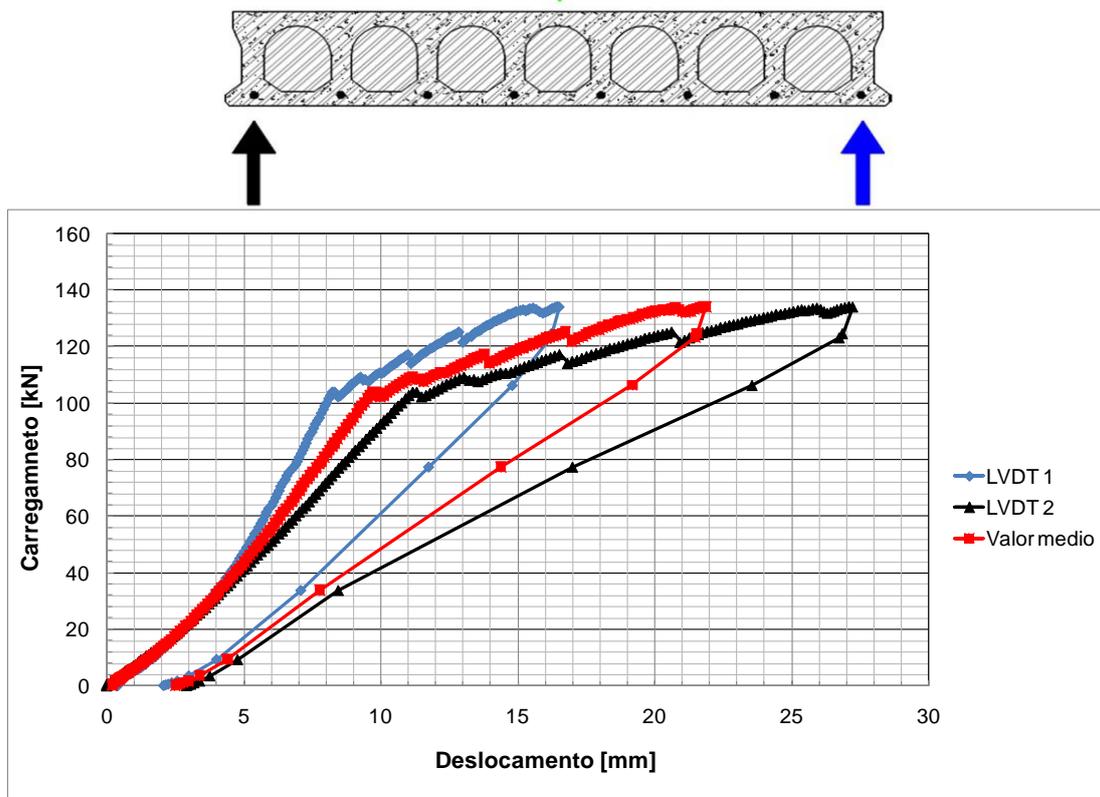
**Figura 3.63: Fissuras na região oposta a aplicação do carregamento da Laje 09.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.64 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 09 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.64: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 09.**



**Fonte: O AUTOR.**

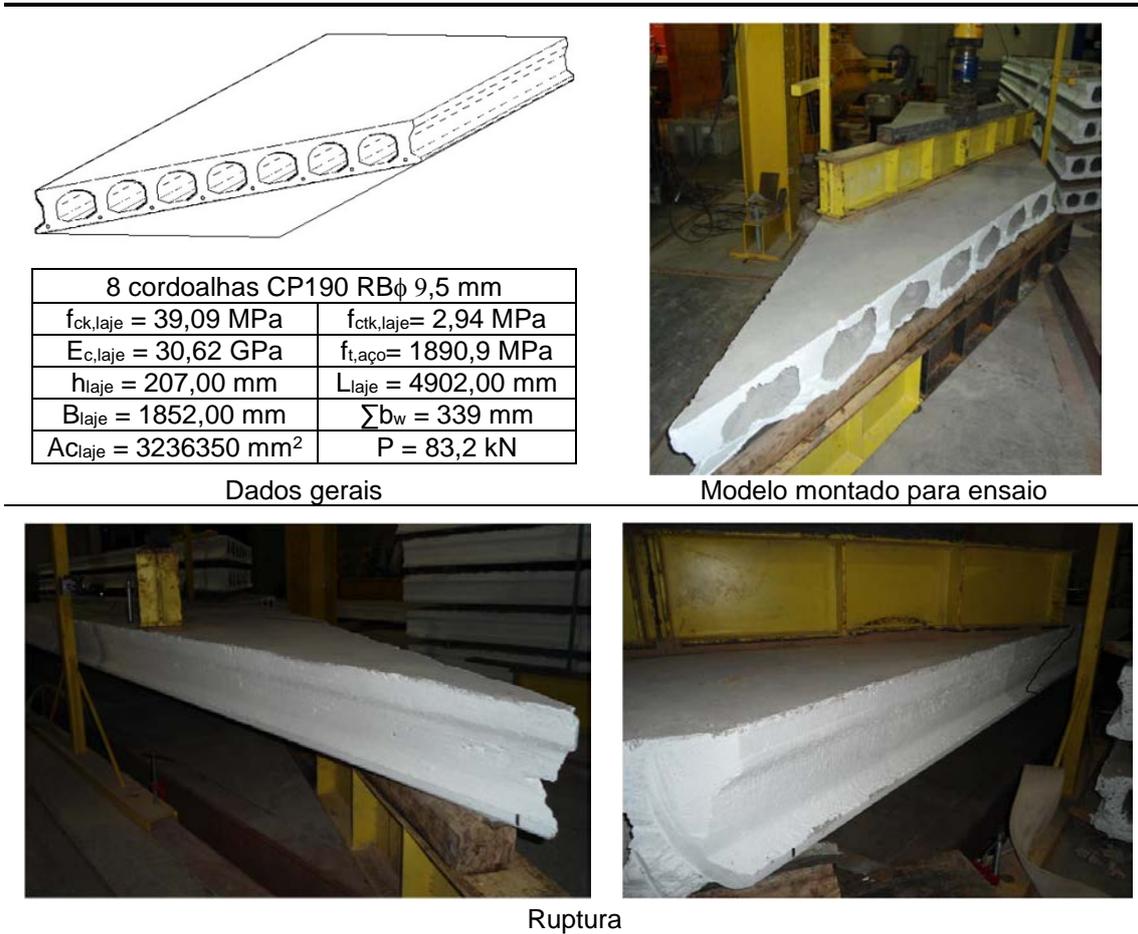
De acordo com os resultados descritos para o modelo 9, pode-se observar que o deslocamento na face direita, LVDT 2, foi superior que da esquerda. O fato

se da principalmente pela diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje. Somado a isso, como nos exemplos anteriores, pode existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### 3.5.7.10 Ensaio da Laje 10

A Laje 10, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 30° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.65 mostra os dados gerais do ensaio.

Figura 3.65: Ensaio da Laje 10.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 10 a ruptura do modelo apresentou fissuras apenas na face esquerda, na região de transição entre as fissuras de cisalhamento e flexão, conforme a Figura 3.66.

**Figura 3.66: Fissuras na região superior da Laje 10.**



**Fonte: O AUTOR.**

Observou-se ainda que as fissuras na parte superior do modelo mostram padrões típicos de torção, conforme a Figura 3.67.

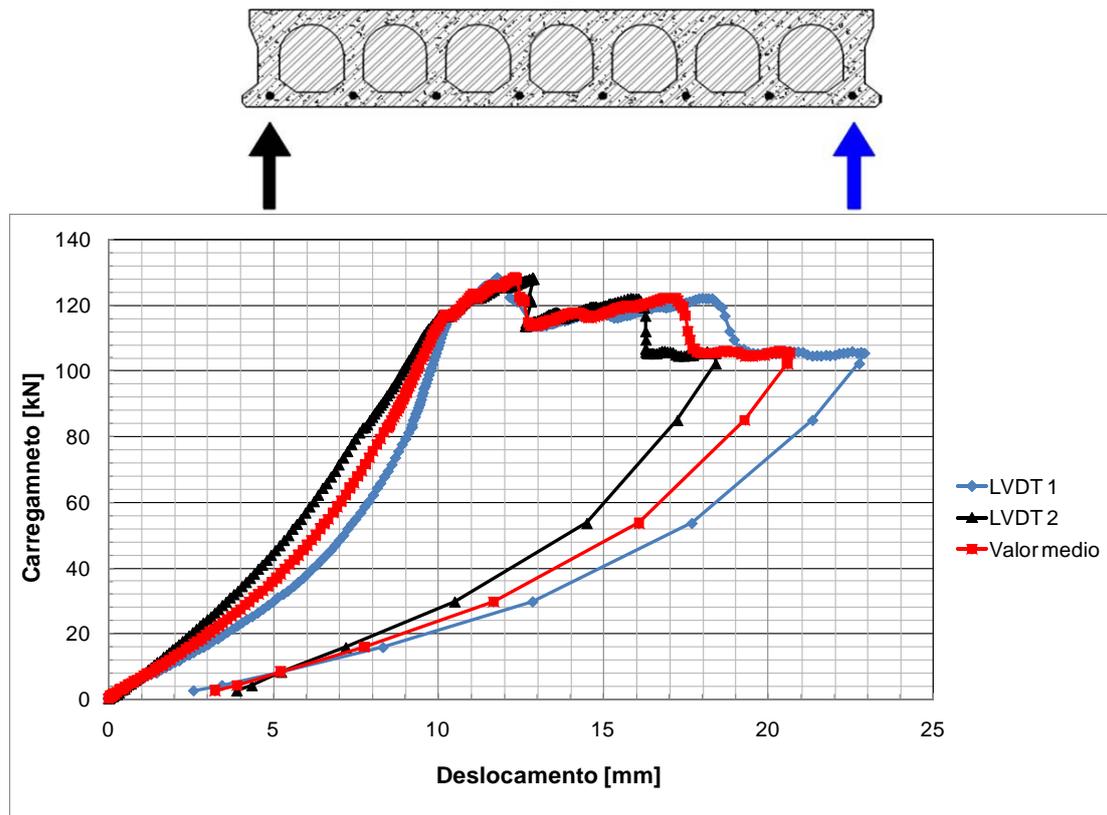
**Figura 3.67: Fissuras na região superior da Laje 10.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Figura 3.68 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 10 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

**Figura 3.68: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 10.**



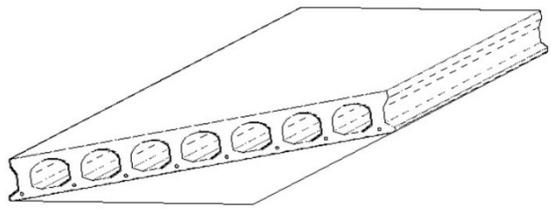
**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com os resultados descritos para a Laje 10 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's, mesmo existindo uma diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje, e como nos exemplos anteriores, sendo possível existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### **3.5.7.11 Ensaio da Laje 11**

A Laje 11, com uma das extremidades possuindo um corte oblíquo de 30° (em relação ao seu eixo longitudinal), foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.3. A Figura 3.69 mostra os dados gerais do ensaio.

**Figura 3.69: Ensaio da Laje 11.**



8 cordoalhas CP190 RB $\phi$ 9,5 mm	
$f_{ck,laje} = 39,09$ MPa	$f_{ctk,laje} = 2,94$ MPa
$E_{c,laje} = 30,62$ GPa	$f_{t,aço} = 1890,9$ MPa
$h_{laje} = 203,25$ mm	$L_{laje} = 4885,00$ mm
$B_{laje} = 1866,25$ mm	$\sum b_w = 322$ mm
$AC_{laje} = 3236350$ mm <sup>2</sup>	$P = 83,2$ kN

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR.

De acordo com o Ensaio da Laje 06 a ruptura do modelo apresentou fissuras apenas na face esquerda, e se deu tipicamente por força cortante.

Observou-se ainda que as fissuras na parte superior do modelo mostram padrões típicos de torção, conforme a Figura 3.70.

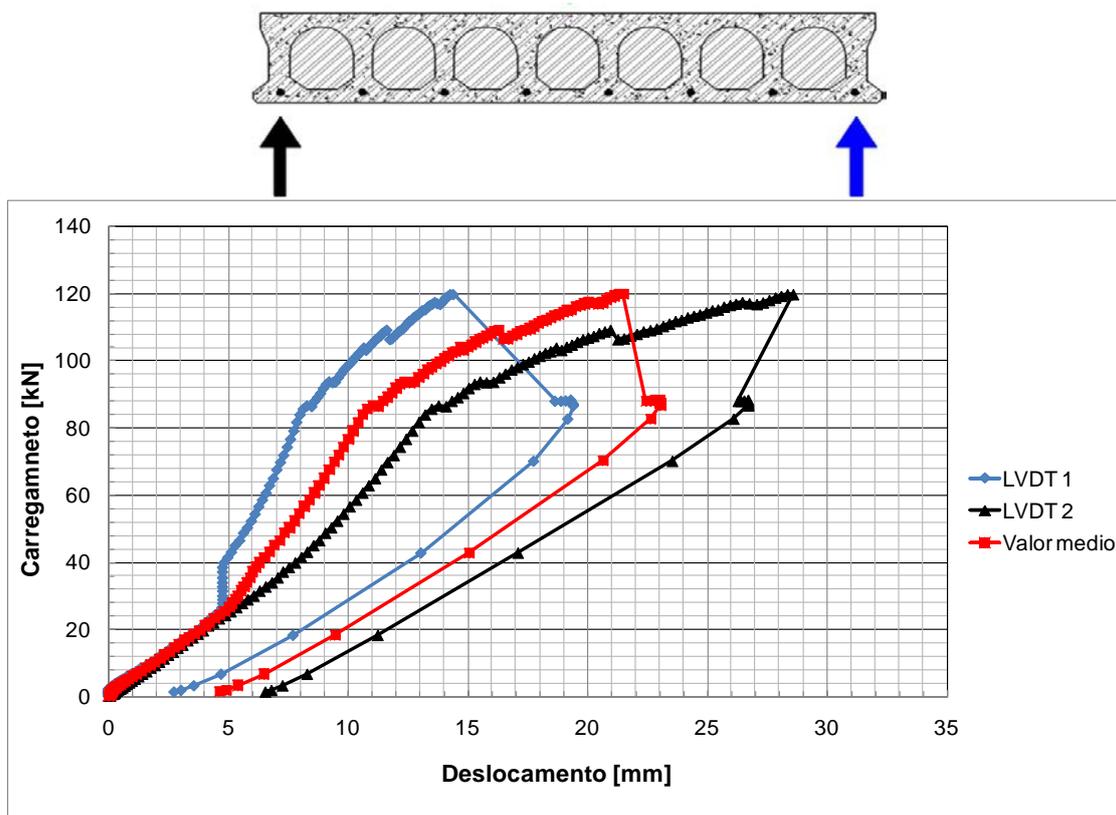
**Figura 3.70: Fissuras na região superior da Laje 11.**



Fonte: O AUTOR.

A Figura 3.71 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento obtidas no Ensaio da Laje 11 através dos dados coletados pela célula de carga e pelos LVDT's da face direita e esquerda da laje, respectivamente.

Figura 3.71: Posicionamento dos LVDT's e curva do Ensaio da Laje 11.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com os resultados descritos para o Ensaio da Laje 11, pode-se observar que o deslocamento da face esquerda, computado LVDT 1, foi notavelmente superior ao da face direita. O fato se dá principalmente pela diferença de comprimento, e respectivamente diferença de comprimentos de transferência da protensão das cordoalhas para a laje. Somado a isso, como nos exemplos anteriores, pode existir uma acomodação dos apoios ou do capeamento entre a laje e a viga de transferência de carregamento.

### 3.5.8 Escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa experimental 1

A verificação do escorregamento de cordoalhas foi feita por meio da identificação visual dos afundamentos, seguida de medição com paquímetro.

Conforme apresentado no item 3.5.5, pela Tabela 3.9, anteriormente ao início dos ensaios foram coletados os valores do escorregamento inicial das cordoalhas.

Após a realização dos ensaios, os valores de escorregamento final (Af) das cordoalhas foram aferidos, conforme a Tabela 3.10.

**Tabela 3.10: Valores do escorregamento final das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Af	3,48	3,18	2,97	2,94	2,75	2,45	2,66	3,17
2	Af	2,92	1,74	2,26	*	*	1,18	1,82	1,87
3	Af	2,42	2,51	2,50	*	*	0,51	0,15	0,68
4	Af	6,44	6,79	6,99	6,60	6,19	*	*	*
5	Af	2,17	1,42	2,42	2,31	1,69	*	*	*

**Fonte: O AUTOR.**

### **3.5.9 Análise preliminar dos dados do Programa experimental 1**

Neste item são analisados os resultados dos ensaios executado nas lajes estudadas.

#### **3.5.9.1 Dimensões das lajes**

A análise dimensional das lajes foi desenvolvida com base nas recomendações da ABNT NBR 14861:2011, que apresenta tolerâncias de fabricação de lajes alveolares, conforme a Tabela v do Anexo 6.

De acordo com a Tabela v, a variação admitida para a altura das lajes é de -10 mm e +12,5 mm. O comprimento pode ter um desvio de  $\pm 15$  mm, e nenhuma recomendação é feita quanto a largura da laje.

A Tabela 3.11 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.11: Desvios nas dimensões das lajes.**

Laje	Lado	Altura			Largura			Comprimento		
		H <sub>1</sub> [mm]	H <sub>2</sub> [mm]	H <sub>médio</sub> [mm]	B <sub>inf</sub> [mm]	B <sub>sup</sub> [mm]	B <sub>médio</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	L <sub>médio</sub> [mm]
1	A	208,00	207,00	207,50	1244,00	1224,00	1234,00	5982,00	5984,00	5983,00
	B	204,00	205,00	204,50	1242,00	1227,00	1234,50			
2	A	205,00	200,00	202,50	1245,00	1224,00	1234,50	5989,00	5968,00	5978,50
	B	199,00	205,00	202,00	1246,00	1230,00	1238,00			
3	A	205,00	204,00	204,50	1245,00	1225,00	1235,00	5982,00	5961,00	5971,50
	B	199,00	205,00	202,00	1245,00	1230,00	1237,50			
4	A	210,00	201,00	205,50	1237,00	1226,00	1231,50	5984,00	5985,00	5984,50
	B	204,00	202,00	203,00	1245,00	1216,00	1230,50			
5	A	204,00	202,00	203,00	1238,00	1226,00	1232,00	5989,00	5988,00	5988,50
	B	203,00	203,00	203,00	1241,00	1221,00	1231,00			
6	A	204,00	203,00	203,50	1240,00	1220,00	1230,00	5935,00	5245,00	5590,00
	B	199,00	205,00	202,00	1430,00	1425,00	1427,50			
7	A	200,00	200,00	200,00	1230,00	1245,00	1237,50	5900,00	5250,00	5575,00
	B	201,00	208,00	204,50	1425,00	1410,00	1417,50			
8	A	198,00	203,00	200,50	1225,00	1245,00	1235,00	5925,00	4725,00	5325,00
	B	193,00	201,00	197,00	1735,00	1715,00	1725,00			
9	A	199,00	200,00	199,50	1235,00	1250,00	1242,50	5975,00	4750,00	5362,50
	B	202,00	200,00	201,00	1740,00	1720,00	1730,00			
10	A	205,00	209,00	207,00	1238,00	1235,00	1236,50	5959,00	3845,00	4902,00
	B	205,00	209,00	207,00	2490,00	2445,00	2467,50			
11	A	189,00	210,00	199,50	1230,00	1245,00	1237,50	5965,00	3805,00	4885,00
	B	207,00	207,00	207,00	2500,00	2490,00	2495,00			

**Fonte: O AUTOR.**

Apenas uma medição apresentou desvio superior aos limites estabelecidos, porém dos 4 valores coletados de altura para cada modelo, apenas um valor de altura, referente ao modelo 11, apresentou desvio.

Em relação ao comprimento das lajes, apenas o modelo 5 não apresentou nenhum desvio superior aos limites, os demais todos apresentaram pelo menos uma das duas medidas coletadas com valor superior aos limites previstos.

### 3.5.9.2 Cobrimento das cordoalhas

O cobrimento das cordoalhas foi analisado por meio das recomendações contidas na ANBT NBR 6118:2014. Para lajes de concreto protendido a norma sugere um cobrimento de 25 a 50 mm, dependendo da classe de agressividade do ambiente, conforme a Tabela vii do Anexo 7.

Para este trabalho será analisado o cobrimento segundo a classe de agressividade II, por se tratar do caso mais comum. Para essa situação o

cobrimento recomendado é de 30 mm com uma variação de até 10 mm, portanto de no mínimo 20 mm.

A Tabela 3.12 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.12: Desvios nos cobrimentos das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Ce	27,00	32,00	34,00	33,00	48,00	39,00	36,00	33,00
	Cd	43,00	48,00	45,00	45,00	42,00	42,00	48,00	36,00
	Cinf	32,00	32,00	31,00	30,00	29,00	31,00	31,00	30,00
2	Ce	38,00	50,00	48,00	48,00	50,00	48,00	50,00	45,00
	Cd	38,00	50,00	40,00	38,00	38,00	35,00	33,00	25,00
	Cinf	31,00	30,00	32,00	29,00	28,00	30,00	32,00	33,00
3	Ce	40,00	48,00	45,00	47,00	50,00	50,00	51,00	47,00
	Cd	35,00	39,00	37,00	40,00	30,00	34,00	33,00	27,00
	Cinf	27,00	27,00	28,00	26,00	27,00	29,00	30,00	30,00
4	Ce	35,00	47,00	41,00	45,00	45,00	44,00	46,00	43,00
	Cd	31,00	33,00	35,00	38,00	27,00	31,00	31,00	29,00
	Cinf	31,00	30,00	30,00	30,00	27,00	32,00	30,00	28,00
5	Ce	28,00	33,00	33,00	29,00	40,00	36,00	36,00	30,00
	Cd	42,00	46,00	45,00	44,00	43,00	39,00	46,00	35,00
	Cinf	29,00	29,00	28,00	26,00	26,00	30,00	29,00	29,00
6	Ce	38,00	43,00	39,00	40,00	46,00	44,00	47,00	42,00
	Cd	35,00	37,00	39,00	37,00	34,00	34,00	35,00	31,00
	Cinf	25,00	25,00	25,00	23,00	23,00	25,00	24,00	24,00
7	Ce	34,00	33,00	34,00	34,00	40,00	39,00	38,00	36,00
	Cd	45,00	47,00	46,00	46,00	43,00	42,00	49,00	41,00
	Cinf	25,00	28,00	25,00	24,00	23,00	23,00	23,00	23,00
8	Ce	42,00	49,00	43,00	43,00	45,00	46,00	50,00	45,00
	Cd	37,00	38,00	39,00	40,00	31,00	35,00	34,00	30,00
	Cinf	22,00	24,00	24,00	23,00	23,00	25,00	28,00	27,00
9	Ce	35,00	46,00	44,00	44,00	46,00	45,00	47,00	41,00
	Cd	34,00	36,00	36,00	39,00	31,00	34,00	35,00	29,00
	Cinf	29,00	27,00	30,00	28,00	28,00	30,00	31,00	31,00
10	Ce	31,00	34,00	35,00	34,00	37,00	35,00	37,00	36,00
	Cd	43,00	45,00	45,00	45,00	42,00	38,00	46,00	38,00
	Cinf	24,00	24,00	25,00	22,00	26,00	25,00	25,00	22,00
11	Ce	35,00	48,00	39,00	44,00	42,00	45,00	45,00	43,00
	Cd	32,00	35,00	35,00	39,00	32,00	33,00	34,00	27,00
	Cinf	31,00	29,00	30,00	25,00	27,00	28,00	28,00	29,00

Fonte: O AUTOR.

Nota-se que nenhuma laje apresentou desvio superior aos limites estabelecidos por norma.

### 3.5.9.3 Espessura das nervuras

A espessura das nervuras foi analisada por meio das recomendações contidas na ABNT NBR 14861:2011. A norma sugere um limite de -10 mm e 15 mm, conforme a Tabela V do Anexo 6.

Segundo o projeto de fabricação das lajes, as nervuras internas devem ter espessura de 37,5 mm e as externas de 42,5 mm.

A Tabela 3.13 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.13: Desvios nas espessuras das nervuras das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Nervura							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	b <sub>ext</sub>	41,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
2	b <sub>ext</sub>	40,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	48,00	43,00	43,00	38,00	45,00	42,00	*
3	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	47,00	43,00	43,00	39,00	44,00	43,00	*
4	b <sub>ext</sub>	36,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	40,00	41,00	38,00	44,00	42,00	*
5	b <sub>ext</sub>	43,00	*	*	*	*	*	*	40,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
6	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
7	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*
8	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	40,00	37,00	42,00	40,00	*
9	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	38,00	43,00	41,00	*
10	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	39,00	42,00	45,00	45,00	*
11	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*

**Fonte: O AUTOR.**

Nota-se que nenhuma laje apresentou desvio superior aos limites estabelecidos por norma.

#### 3.5.9.4 Contra flecha

A contra flecha foi analisada por meio das recomendações contidas na ABNT NBR 6118:2014. A norma sugere um valor máximo de contra flecha de  $\pm L/350$ , conforme a Tabela viii do Anexo 8.

Para os elementos ensaiados, com 6000 mm de comprimento, a contra flecha deve possuir uma variação de  $\pm 17,14$  mm.

A Tabela 3.14 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.14: Desvios nas contra flechas das lajes.**

Contra-flecha [mm]	Laje											
	LA 01-9,5	LA 01-12,7	LA 02	LA 03	LA 04	LA 05	LA 06	LA 07	LA 08	LA 09	LA 10	LA 11
	25,00	35,00	28,00	35,00	18,00	20,00	19,00	19,00	22,00	25,00	17,00	18,00

**Fonte: O AUTOR.**

Nota-se que apenas a laje 10 apresentou contra flecha dentro dos limites estabelecidos por norma.

#### 3.5.9.5 Análise do escorregamento das cordoalhas das lajes

O valor do escorregamento deve respeitar um limite recomendado pela ABNT NBR 14861:2011. A norma menciona que o valor do escorregamento médio das cordoalhas nas extremidades das lajes, a ser considerado no cálculo das perdas de protensão, é calculado segundo a Equação (3.1).

$$\Delta l_0 = 0,40 \times l_{pt2} \times \frac{\sigma_{cp0}}{E_p} \quad (3.1)$$

Sendo:

$\Delta l_0$  – escorregamento da cordoalha;

$\sigma_{cp0}$  – tensão de protensão no instante da liberação da protensão;

$E_p$  – módulo de elasticidade da armadura ativa;

$l_{pt2}$  – valor superior de projeto para o comprimento de transmissão (fixado em  $85\Phi$ ).

A mesma norma cita que o valor do escorregamento limite das cordoalhas em cada extremidades das lajes deve ser calculado segundo a Equação (3.2).

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \times \Delta l_o \quad (3.2)$$

Por meio das Equações (3.1) e (3.2), calculou-se os valores do escorregamento médio e limite, expostos na Tabela 3.15.

**Tabela 3.15: Valores do escorregamento médio e escorregamento limite das cordoalhas.**

Escorregamento [mm]	$\phi$ [mm]	$l_{pt2}$ [mm]	$A_\phi$ [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{cp0}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$E_p$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
	9,50	807,50	55,69	1,62	199,35
$\Delta l_o$	2,63				
$\Delta l_{lim}$	3,42				

Fonte: O AUTOR.

A Tabela 3.16 apresenta os valores dos escorregamentos inicial (Ai) e final (Af) das cordoalhas para cada laje ensaiada e destaca os dados que apresentaram desvio em relação aos limites estabelecidos por norma.

**Tabela 3.16: Valores do escorregamento das cordoalhas das lajes.**

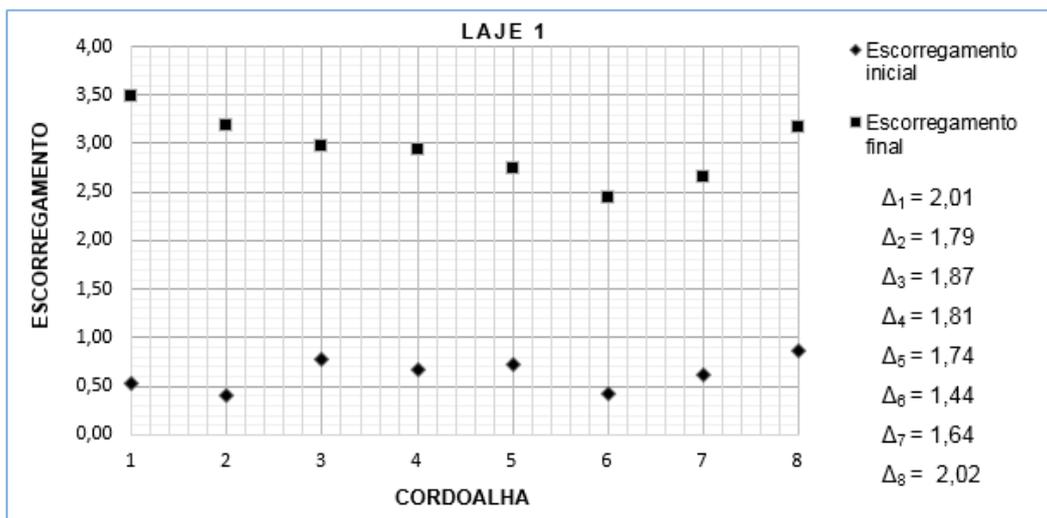
Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Ai	0,53	0,40	0,77	0,67	0,73	0,42	0,62	0,87
	Af	3,48	3,18	2,97	2,94	2,75	2,45	2,66	3,17
2	Ai	0,47	0,42	0,81	*	*	0,27	0,62	0,96
	Af	2,92	1,74	2,26	*	*	1,18	1,82	1,87
3	Ai	0,40	0,50	0,21	*	*	0,51	0,15	0,68
	Af	2,42	2,51	2,50	*	*	0,51	0,15	0,68
4	Ai	0,68	0,25	1,61	0,96	0,19	*	*	*
	Af	6,44	6,79	6,99	6,60	6,19	*	*	*
5	Ai	0,99	0,92	0,34	1,12	0,93	*	*	*
	Af	2,17	1,42	2,42	2,31	1,69	*	*	*

Fonte: O AUTOR.

Nota-se que apenas o molde 4 apresentou escorregamento final superior ao limite estabelecido por norma.

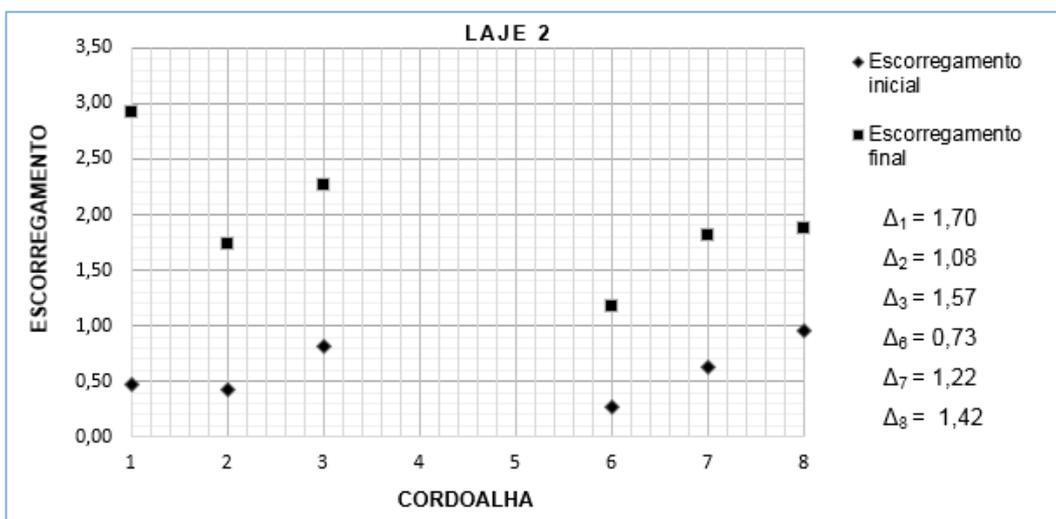
Para as lajes 1, 2, 3, 4 e 5, que tiveram os escorregamentos analisados, foram plotados os gráficos representando as cordoalhas e seus respectivos escorregamentos inicial e final, além de sua amplitude denominada  $\Delta$ , conforme observado da Figura 3.72 a Figura 3.76.

**Figura 3.72: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 1.**



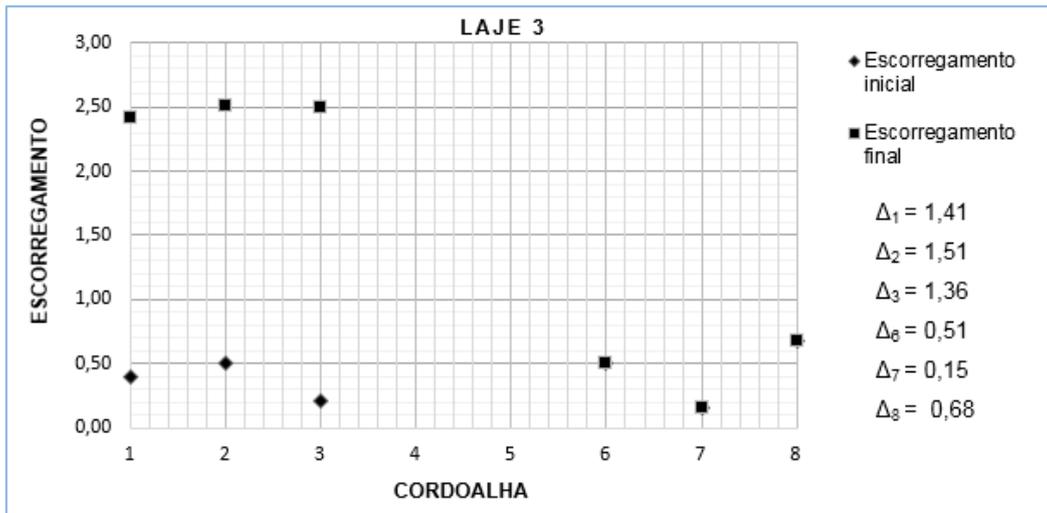
Fonte: O AUTOR.

**Figura 3.73: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 2.**



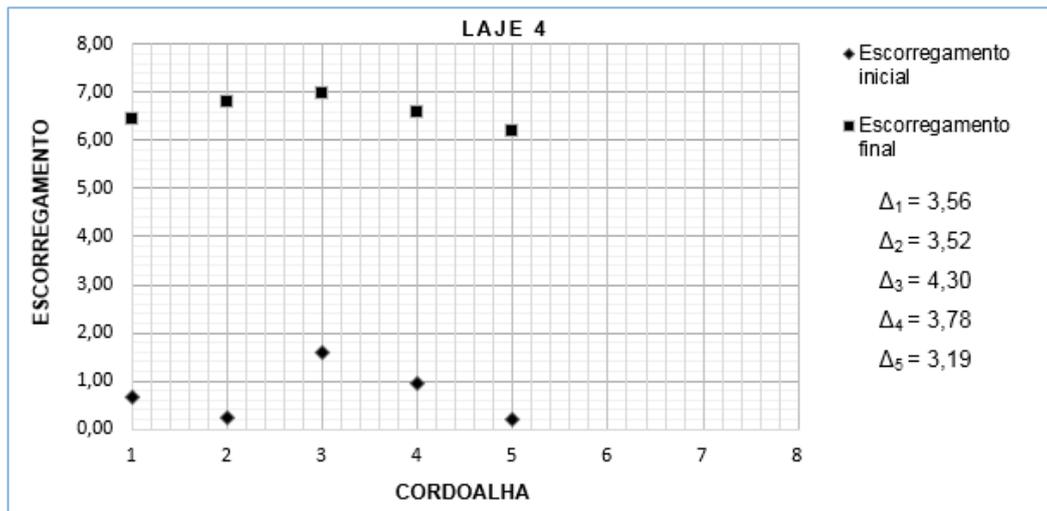
Fonte: O AUTOR.

**Figura 3.74: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 3.**



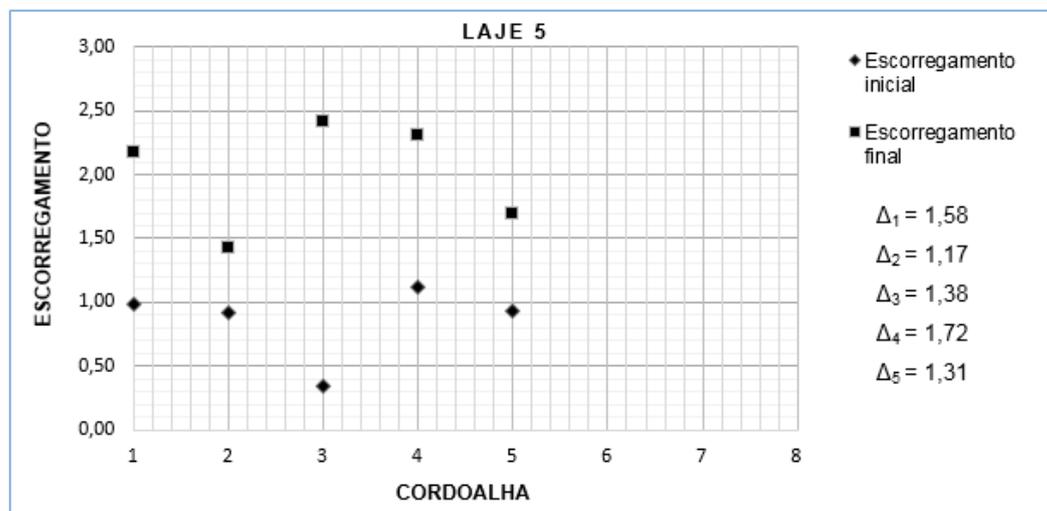
Fonte: O AUTOR.

**Figura 3.75: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 4.**



Fonte: O AUTOR.

**Figura 3.76: Escorregamento inicial e final das cordoalhas da laje 5.**



Fonte: O AUTOR.

Observa-se a partir da análise dos gráficos de escorregamento que em todos os modelos estudados, o escorregamento inicial das cordoalhas pertencentes a uma mesma laje possuem valores distintos, indicando diferentes níveis e protensão e/ou aderência entre aço e concreto.

### 3.5.9.6 Valores experimentais

A seguir serão expostos os valores experimentais de resistência ao esforço cortante, calculados a partir dos carregamentos obtidos nos ensaios realizados com as lajes alveolares protendidas desse trabalho.

Os esquemas estáticos e os diagramas de esforço cortante foram obtidos por meio do programa computacional FTOOL conforme apresentado no Anexo 5.

A partir dos valores máximos de carregamento, foi possível calcular os esforços cortantes, apresentados por meio da Tabela 3.17.

**Tabela 3.17: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.**

Laje	Carregamento [kN]	Área da abertura [m <sup>2</sup> ]	Área total [m <sup>2</sup> ]	Peso Próprio [kN/m <sup>2</sup> ]	Peso laje [kN]	q [kN/m]	Distancia de Aplicação da Carga [m]	V <sub>exp</sub> [kN]
LA 1	168,89	0,00	7,47	2,73	20,39	3,41	0,50	164,96
LA 2	114,51	0,16	7,31	2,73	19,96	3,34	0,50	114,91
LA 3	108,11	0,16	7,31	2,73	19,96	3,34	0,50	109,05
LA 4	92,24	0,16	7,31	2,73	19,96	3,34	0,50	94,49
LA 5	83,39	0,16	7,31	2,73	19,96	3,34	0,50	86,36
LA 6	175,41	0,45	7,02	2,73	19,17	3,93	0,50	163,99
LA 7	131,00	0,45	7,02	2,73	19,17	3,92	0,85	115,77
LA 8	145,51	0,78	6,70	2,73	18,28	3,44	0,50	139,94
LA 9	134,32	0,78	6,70	2,73	18,28	3,41	1,12	114,35
LA 10	128,41	1,34	6,13	2,73	16,73	3,00	0,50	124,77
LA 11	119,68	1,34	6,13	2,73	16,73	3,00	1,63	92,60

**Fonte: O AUTOR.**

Deve-se observar que as lajes 6, 7, 8, 9, 10 e 11, possuem dimensões diferentes (comprimento e área) e posição de aplicação do carregamento, perpendicular ao eixo longitudinal da laje ou paralelo ao apoio. Portanto, a Tabela 3.17 faz uso dos valores médios dos comprimentos das laterais das lajes e adequa o valor da distância de aplicação do carregamento para cada ensaio para calcular o valor da resistência ao esforço cortante obtido.

### 3.5.9.7 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011

A metodologia de cálculo da resistência ao esforço cortante contida na norma técnica nacional ABNT NBR 14861:2011 não prevê aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares, desse modo, apenas para a Laje 01 (referência) foi possível aplicar as equações contidas na norma.

A seguir são expostos os valores da resistência à força cortante que foram calculados em três etapas para a laje de referência.

Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, aqueles usados pelos projetistas no ato da concepção estrutural, como resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência a tração do concreto, além de resistência a tração do aço, e fazendo uso dos coeficientes de segurança (que minora a resistência dos materiais). Esse valor é apresentado na Tabela 3.18 e recebe o nome de Valor de projeto ( $V_{Rd}$ ).

**Tabela 3.18: Valor de projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração de projeto do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área total de aço
$P$ [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,14	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,31	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	62,15	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	42,52	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>104,67</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

O mesmo cálculo apresentado anteriormente, porém sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.19 e recebe o nome de Valor de cálculo ( $V_R$ ).

**Tabela 3.19: Valor de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,85	Resistência à tração do concreto
E [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área toral de aço
P [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,14	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,31	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,20	Altura da laje
d [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	87,01	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	42,52	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>129,53</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor teórico característico ( $V_k$ ), mostrado na Tabela 3.20.

**Tabela 3.20: Valor teórico característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	40,80	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,43	Resistência característica à tração do concreto
E [Mpa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área toral de aço
P [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,14	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,31	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,20	Altura da laje
d [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	74,18	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	42,52	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_k</math> [kN]</b>	<b>116,70</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

A Tabela 3.21 apresenta a comparação entre o Valor de Projeto, Valor de Cálculo, Valor Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante da Laje 1.

**Tabela 3.21: Comparativo das resistências ao esforço cortante da Laje 1.**

V [kN]	Resistência ao esforço cortante
104,67	Valor de Projeto
129,53	Valor de Cálculo
116,70	Valor Teórico Característico
164,96	Experimental

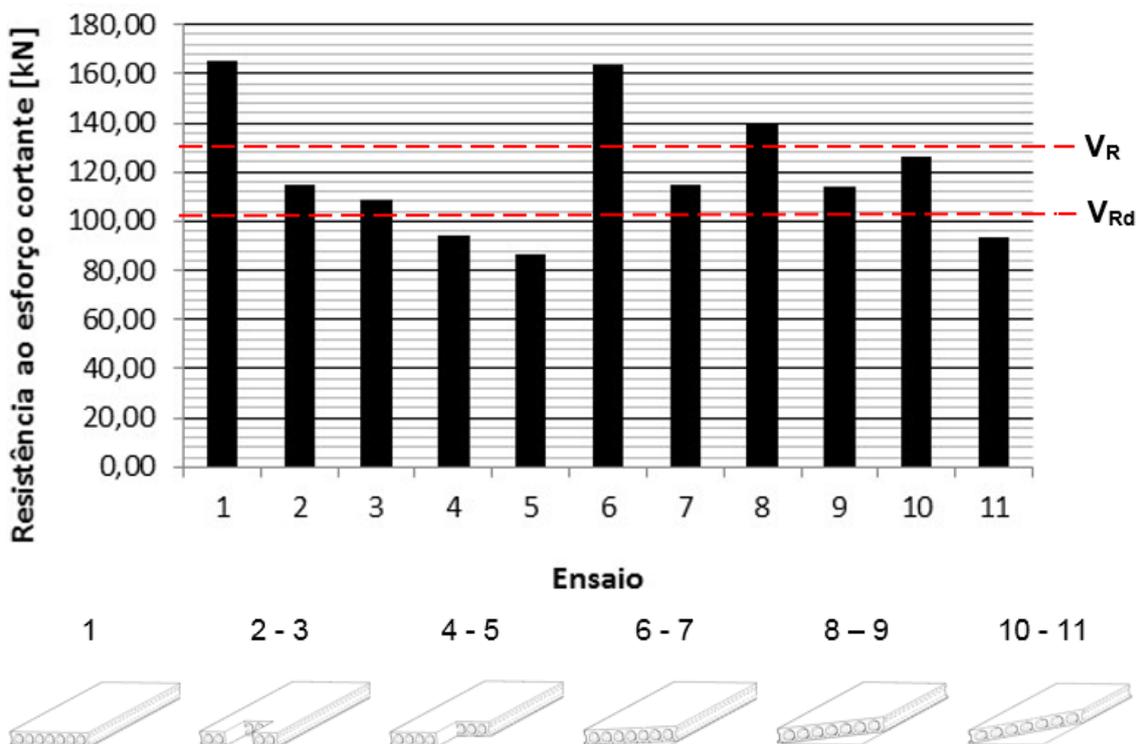
Fonte: O AUTOR.

Para o ensaio da Laje 1 (referência), é possível observar que os dados dos ensaios convergem a valores a favor da segurança, conforme a Tabela 3.21.

### 3.5.9.8 Comparação entre valores experimentais

A Figura 3.77 mostra os valores experimentais de resistência ao esforço cortante.

**Figura 3.77: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.**



Fonte: O AUTOR.

Além dos valores experimentais de resistência ao esforço cortante, a Figura 3.77 apresenta o Valor de Projeto ( $V_{Rd}$ ) e O Valor de Cálculo ( $V_R$ ) da Laje 1 (referência), sendo possível identificar os ensaios que obtiveram valores de resistência ao esforço cortante inferior aos dados de projeto e de cálculo da laje referência.

A Tabela 3.22 compara os valores de resistência ao esforço cortante obtidos por meio dos ensaios das lajes com aberturas ou cortes oblíquos com a laje de referência.

**Tabela 3.22: Comparação entre valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas ou cortes oblíquos e a laje de referência.**

Laje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$V_{EXP}$ [kN]	164,97	114,91	109,05	94,49	86,36	163,99	115,77	139,94	114,35	124,77	92,60
$V_{EXP}/V_{EXP1}$	1,00	0,70	0,66	0,57	0,52	0,99	0,70	0,85	0,69	0,76	0,56

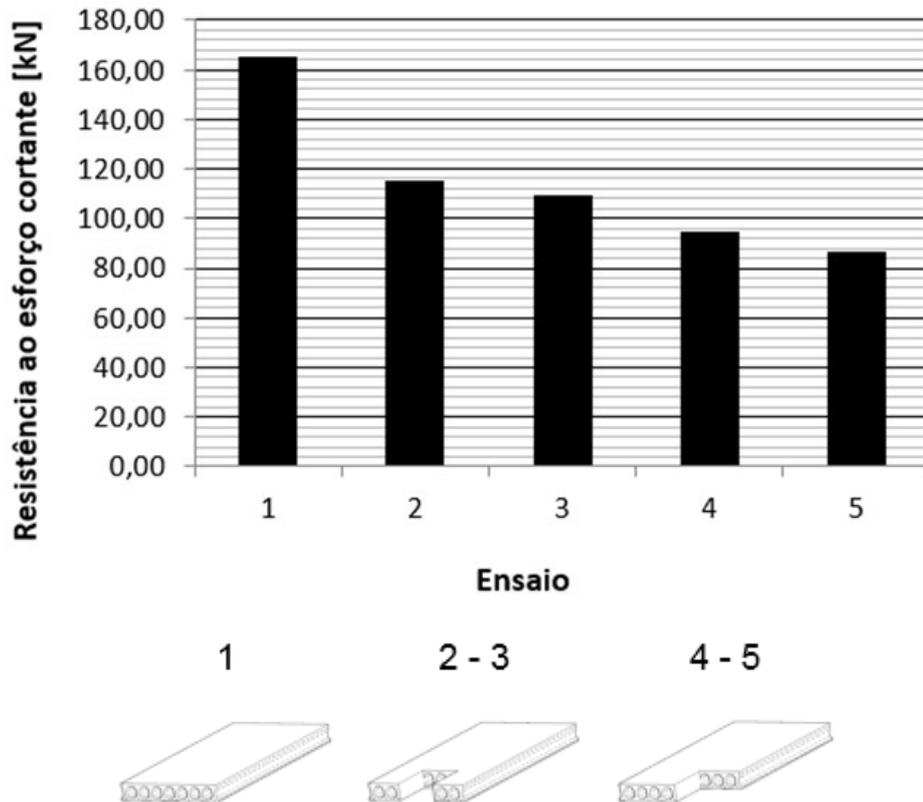
**Fonte: O AUTOR.**

Na Tabela 3.22 o valor  $V_{EXP1}$  é referente à resistência ao esforço cortante da laje 01, tomada como referência. A partir da relação  $V_{EXP}/V_{EXP1}$ , é possível observar a perda de capacidade de resistência ao esforço cortante das lajes com aberturas ou cortes oblíquos, sendo o valor mais crítico de redução evidenciado nos modelos L4, L5 e L11.

### **3.5.9.9 Comparação entre lajes com aberturas**

A Figura 3.78 apresenta os valores experimentais de resistência ao esforço cortante das lajes com aberturas laterais ou centrais.

**Figura 3.78: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas laterais ou centrais.**



Fonte: O AUTOR.

A Tabela 3.23 compara os valores de resistência ao esforço cortante obtidos de lajes com aberturas laterais ou centrais com a laje de referência.

**Tabela 3.23: Comparação entre os valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas laterais ou centrais com a laje de referência.**

Laje	Abertura Central		Abertura Lateral	
	2	3	4	5
$V_{EXP}$ [kN]	114,91	109,05	94,49	86,36
$V_{EXPmédio}$ [kN]	111,98		90,43	
$V_{EXPLateral} / V_{EXPCentral}$	0,81			

Fonte: O AUTOR.

Na Tabela 3.23 o valor  $V_{EXPLateral} / V_{EXPCentral}$  representa a relação entres as resistências ao esforço cortante das lajes com aberturas na parte lateral e na parte central.

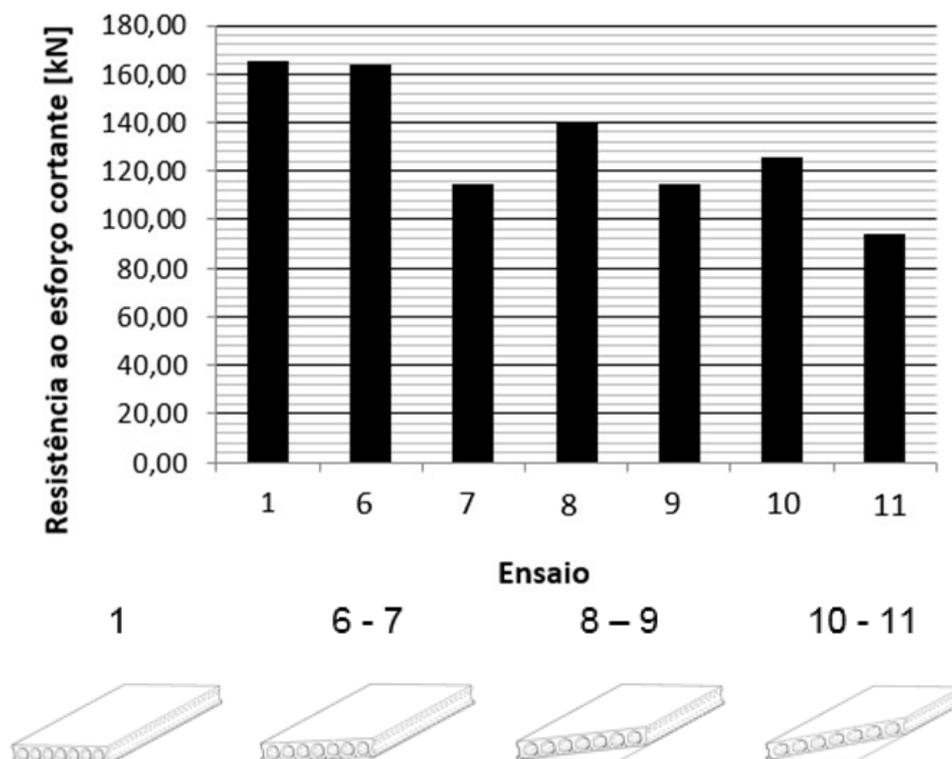
Com relação à referência, a relação indica uma maior perda de capacidade resistente para lajes com abertura lateral quando comparadas a lajes com aberturas frontais.

### 3.5.9.10 Comparação entre lajes com cortes oblíquos

As lajes 6, 7, 8, 9, 10 e 11, possuem diferentes dimensões e posição de aplicação do carregamento, podendo ser perpendicular ao eixo longitudinal da laje ou paralelo ao apoio.

A Figura 3.79 apresenta os valores experimentais de resistência ao esforço cortante das lajes com cortes oblíquos.

**Figura 3.79: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante de lajes com cortes oblíquos.**



**Fonte: O AUTOR.**

A Tabela 3.24 compara os valores de resistência ao esforço cortante obtidos por meio dos ensaios das lajes com aberturas ou cortes oblíquos com a laje de referência e também com a posição de aplicação do carregamento.

**Tabela 3.24: Comparação entre os valores de resistência ao esforço cortante de lajes com cortes em diferentes ângulos oblíquos e diferentes posições de aplicação de carregamento.**

Ângulo do corte oblíquo	Corte 60º		Corte 45º		Corte 30º	
	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
Laje	6	7	8	9	10	11
$V_{EXP}$ [kN]	163,99	115,77	139,94	114,35	124,77	92,60
$V_{EXPparalelo} / V_{EXPperpendicular}$	1,42		1,22		1,35	
$V_{EXPparalelo} / V_{EXP1}$	0,99		0,85		0,76	
$V_{EXPperpendicular} / V_{EXP1}$	0,70		0,69		0,56	
OBS: $V_{EXP1}$ = Resistência ao esforço cortante da Laje 1 (referência sem corte ou abertura) = 164,96 kN						

Fonte: O AUTOR.

Na Tabela 3.24 os valores de resistência ao esforço cortante apresentaram decréscimo em relação a Laje 1 (referência), quando se aumentou o ângulo oblíquo, tanto para o caso de aplicação de carregamento paralelo ao apoio quanto perpendicular ao eixo central da laje.

A partir das relações  $V_{EXPperpendicular} / V_{EXPparalelo}$ , é possível observar a perda de capacidade de resistência ao esforço cortante das lajes com aplicação de carga paralelo ao apoio é menor que a perda apresentado pelas lajes com aplicação perpendicular ao eixo da peça.

### 3.5.9.11 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada à aberturas frontais

O item 3.5.9.7 apresenta os valores da resistência ao esforço cortante obtidos por meio das equações contidas na norma técnica nacional ABNT NBR 14861:2011, contudo, a mesma não prevê aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares.

Neste item, é proposta uma simples adaptação da formulação existente para os casos estudados nesta pesquisa de aberturas frontais em lajes, para isso, os valores do somatório das nervuras ( $\Sigma b_w$ ), a força de protensão (P) em função do tipo e número de cordoalhas, e a área de concreto ( $A_c$ ), foram modificados com o objetivo de aproximar a equação existente aos modelos estudados.

Analogamente ao exposto no item 3.5.9.7, os valores da resistência à força cortante foram calculados em três etapas para os casos de aberturas centrais.

Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, aqueles usados pelos projetistas no ato da concepção estrutural, como resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência a tração do concreto, além de resistência a tração do aço, e fazendo uso dos coeficientes de segurança (que minora a resistência dos materiais). Esse valor é apresentado na Tabela 3.25 e recebe o nome de Valor adaptado de projeto ( $V_{Rda}$ ).

**Tabela 3.25: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração de projeto do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área total de aço
$P$ [kN]	499,20	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,10	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,26	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	50,03	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	32,23	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>82,26</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

O cálculo similar ao apresentado anteriormente, porém desenvolvido sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.26 e recebe o nome de Valor adaptado de cálculo ( $V_{Ra}$ ).

**Tabela 3.26: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,85	Resistência à tração do concreto
E [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área total de aço
P [kN]	499,20	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,10	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,26	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,20	Altura da laje
d [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	70,04	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	32,23	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>102,28</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor adaptado teórico característico ( $V_{ka}$ ), mostrado na Tabela 3.27.

**Tabela 3.27: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	39,09	Resistência característica a compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,94	Resistência a tração de projeto do concreto
E [Mpa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0004	Área total de aço
P [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,14	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,26	Somatorio das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,20	Altura da laje
d [m]	0,18725	Altura util
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	78,55	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	26,95	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>105,50</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

A Tabela 3.28 apresenta a comparação entre o Valor adaptado de Projeto, Valor adaptado de Cálculo, Valor adaptado Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante das lajes com abertura frontal.

**Tabela 3.28: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura frontal.**

V [kN]	Resistência ao esforço cortante
82,26	Valor adaptado de Projeto
102,28	Valor adaptado de Cálculo
105,50	Valor adaptado Teórico Característico
114,91	Valor Experimental
109,05	Valor Experimental

**Fonte: O AUTOR.**

Para os ensaios das lajes com aberturas frontais, ao se adaptar a formulação existente para as aberturas frontais, observa-se que os dados dos dois ensaios (Valores Experimentais) são a favor da segurança, pois são superiores ao Valor adaptado de Projeto e Valor adaptado de Cálculo. Logo, a adaptação realizada na formulação para o caso em estudo demonstra coerência, tendo em vista que para a laje referência, sem aberturas, o seu Valor de Projeto e Valor de Cálculo (calculados por meio das equações disponíveis na ABNT NBR 14861:2011 sem modificação) também foram inferiores ao Valor Experimental.

### **3.5.9.12 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada à aberturas laterais**

Assim como apresentado no item 3.5.9.11, neste item também é proposta uma simples adaptação da formulação existente para os casos estudados nesta pesquisa de aberturas laterais em lajes, para isso, os valores do somatório das nervuras ( $\Sigma b_w$ ), a força de protensão (P) em função do tipo e número de cordoalhas, e a área de concreto ( $A_c$ ), foram modificados com o objetivo de aproximar a equação existente aos modelos estudados.

Novamente serão apresentadas as três etapas do cálculo da resistência à força cortante para os casos de aberturas laterais.

A Tabela 3.29 apresenta o Valor adaptado de projeto ( $V_{Rda}$ ) da resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas laterais.

**Tabela 3.29: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração de projeto do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área total de aço
$P$ [kN]	416,00	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,10	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,19	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	43,16	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	22,00	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>65,17</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

O cálculo similar ao apresentado anteriormente, porém desenvolvido sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.30 e recebe o nome de Valor adaptado de cálculo ( $V_{Ra}$ ).

**Tabela 3.30: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,85	Resistência à tração do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00045	Área total de aço
$P$ [kN]	416,00	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,10	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,19	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,18725	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	60,43	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	22,00	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>82,43</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor adaptado teórico característico ( $V_{ka}$ ), mostrado na Tabela 3.31 Tabela 3.27.

**Tabela 3.31: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	39,09	Resistência característica a compressão do concreto
$f_{ctd}$ [MPa]	2,94	Resistência a tração de projeto do concreto
$E$ [MPa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0004	Área total de aço
$P$ [kN]	416,00	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,14	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,20	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,18725	Altura útil
$\bar{\sigma}_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3052,09	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	63,15	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	16,80	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
$V_{Rd}$ [kN]	<b>79,95</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

A Tabela 3.32 apresenta a comparação entre o Valor adaptado de Projeto, Valor adaptado de Cálculo, Valor adaptado Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante das lajes com abertura lateral.

**Tabela 3.32: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura lateral.**

V [kN]	Resistência ao esforço cortante
65,17	Valor adaptado de Projeto
82,43	Valor adaptado de Cálculo
79,95	Valor adaptado Teórico Característico
94,49	Valor Experimental
86,36	Valor Experimental

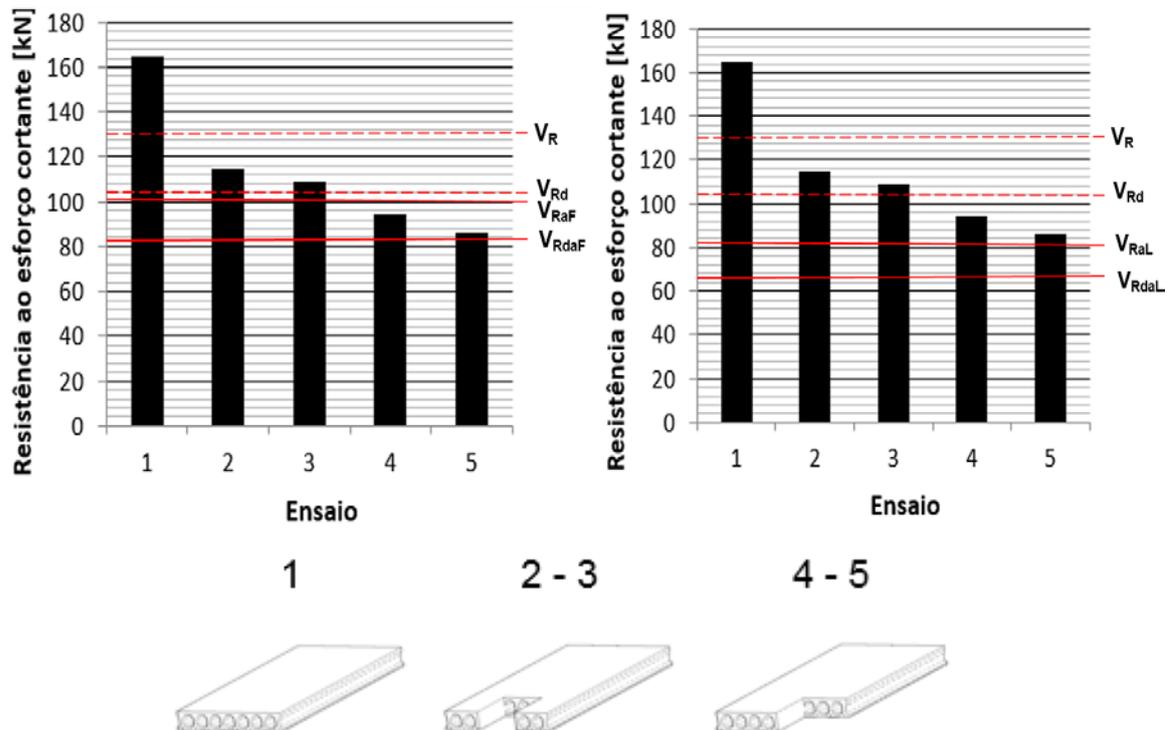
**Fonte: O AUTOR.**

Para os ensaios das lajes com aberturas laterais, ao se adaptar a formulação existente para as aberturas laterais, observa-se que os dados dos dois ensaios (Valores Experimentais) são superiores ao Valor adaptado de Projeto e Valor adaptado de Cálculo, assim como ocorrido com lajes que possuem abertura frontal e lajes sem aberturas.

### 3.5.9.13 Comparação entre valores experimentais, valores adaptados e valores segundo a ABNT NBR 14861:2011 para lajes com aberturas

A Figura 3.80 apresenta os valores experimentais de resistência ao esforço cortante onde os Valores de Projeto e Valores de Cálculo adaptados e segundo a ABNT NBR 14861:2011 são destacados por meio das linhas horizontais tracejadas e contínuas respectivamente.

**Figura 3.80: Valores experimentais, valores adaptados e valores de norma da resistência ao esforço cortante.**



Fonte: O AUTOR.

Sendo:

$V_R$  = Valor de Cálculo;

$V_{Rd}$  = Valor de Projeto;

$V_{RaF}$  = Valor adaptado de Cálculo para lajes com aberturas frontais;

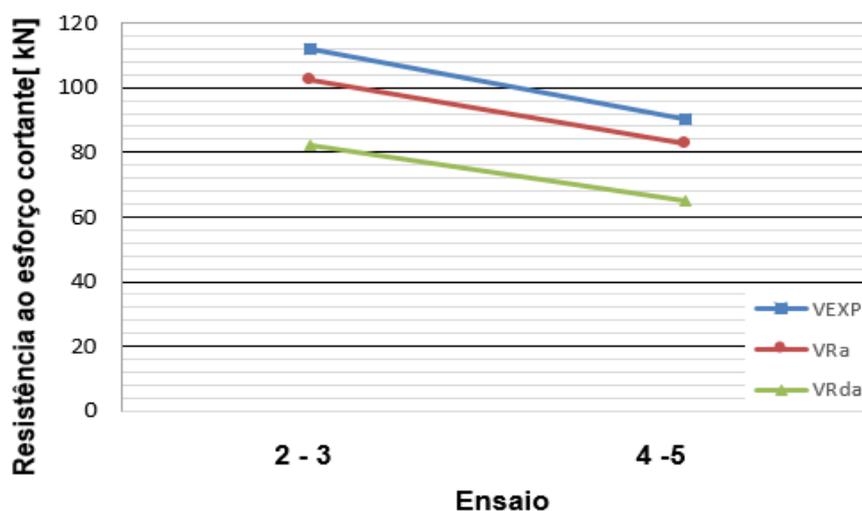
$V_{RdaF}$  = Valor adaptado de Projeto para lajes com aberturas frontais;

$V_{RaL}$  = Valor adaptado de Cálculo para lajes com aberturas laterais;

$V_{RdaL}$  = Valor adaptado de Projeto para lajes com aberturas laterais.

A Figura 3.81 apresenta a comparação entre os Valores Experimentais médios ( $V_{Exp}$ ) dos ensaios das lajes com aberturas frontais (ensaios 2 e 3) e aberturas laterais (ensaios 4 e 5), com os Valores adaptados de Cálculo ( $V_{Ra}$ ) e Valores adaptados de Projeto ( $V_{Rda}$ ).

**Figura 3.81: Comparação entre as médias dos Valores experimentais com o Valores adaptados de Cálculo e Valores adaptados de Projeto.**



Fonte: O AUTOR.

Para ambos os casos de abertura, observa-se a adaptação da formulação aos modelos em estudo conduz a Valores de Cálculo e Valores de Projeto inferiores aos Valores Experimentais, portanto, a adaptação realizada na formulação para os modelos propostos demonstra coerência e está a favor da segurança.

### 3.5.10 Conclusões preliminares do Programa experimental 1

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar a influência de aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares.

Nota-se que a laje tomada como referência apresentou valor experimental de suporte ao esforço cortante superior ao valor de cálculo, aproximando-se de valores seguros e validando os modelos para estudo.

Observou-se com os modelos ensaiados que os valores experimentais de resistência à força cortante de lajes com aberturas e cortes em ângulo são inferiores ao modelo de referência.

Em lajes com aberturas, os testes indicam uma perda de capacidade resistente, para lajes com abertura lateral, entre 42,70% e 47,60% quando comparadas com a laje de referência (sem abertura). As lajes com aberturas centrais apresentaram uma perda de capacidade resistente de 30,30% a 33,70% em relação ao modelo de referência.

Os modelos com cortes oblíquos também apresentaram decréscimo de na resistência ao esforço cortante em relação a laje de referência. Conforme se aumentou o corte, ou se diminuiu o ângulo entre a região cortada e a cordoalha, tanto para o caso de aplicação de carregamento paralelo ao apoio quanto perpendicular ao eixo central da laje, houve diminuição da capacidade resistente da laje. Quando comparados a referência, elementos com corte em um ângulo de  $60^\circ$ , em relação as cordoalhas, apresentaram diminuição de 0,60% a 30,40%. Modelos com ângulo de  $45^\circ$  apresentaram diminuição de 15,17% a 30,70%. Por fim, as lajes com ângulo de  $30^\circ$  tiveram diminuição de 23,67% a 43,17%.

Observou-se ainda uma maior perda na resistência ao esforço cortante em lajes onde a aplicação do carregamento ocorreu perpendicularmente ao eixo da peça, quando comparado aos modelos com carregamento paralelo ao apoio, podendo chegar a 29,8% de perda de resistência ao esforço cortante (lajes com corte oblíquo em um ângulo de  $30^\circ$  em relação as cordoalhas).

Para o caso de lajes com aberturas, a adaptação da formulação disponibilizada pela ANBT NBR 14861:2011 demonstrou-se coerente, pois para ambos os casos de abertura, observou-se que a modificação das equações existentes conduz a Valores de Cálculo e Valores de Projeto seguros.

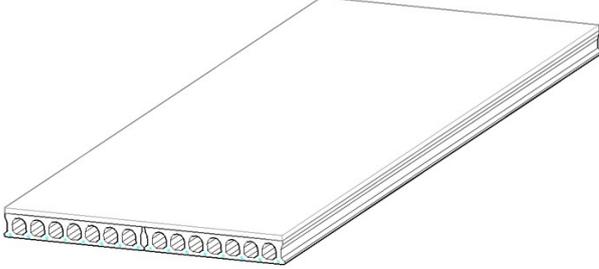
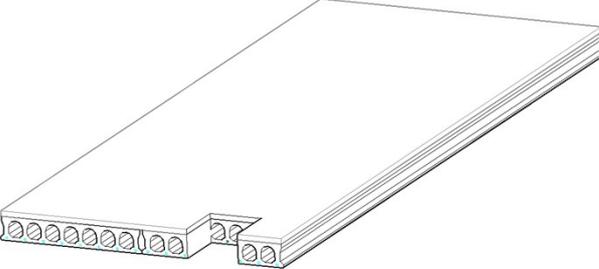
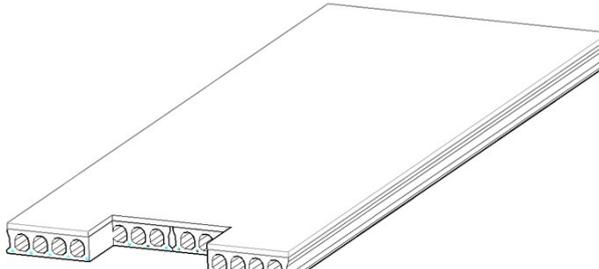
Os ensaios propostos para serem realizados mostraram-se coerentes e validam o primeiro programa experimental da pesquisa.

### 3.6 Programa Experimental 2

O Programa Experimental 2 contou com a realização de ensaios de lajes duplas, com o uso de chave de cisalhamento e capeamento estrutural, com e sem aberturas, no Laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

A quantidade e tipologia dos elementos ensaiados na segunda etapa experimental são apresentadas na Tabela 3.33.

**Tabela 3.33: Programa de ensaios.**

Tipo de laje	Esquema da LAP	Número de ensaios	Tipo de ensaio
<b>Referência</b>			
Lajes 1 e 2 <i>Sem abertura</i> <i>Referência</i>		2	Esforço cortante
<b>Abertura</b>			
Lajes 3 e 4: <i>Abertura lateral</i> 400x400 mm		2	Esforço cortante
Lajes 5 e 6: <i>Abertura central</i> 400x800 mm		2	Esforço cortante
<b>Total de lajes ensaiadas</b>		<b>6</b>	

**Fonte: O AUTOR.**

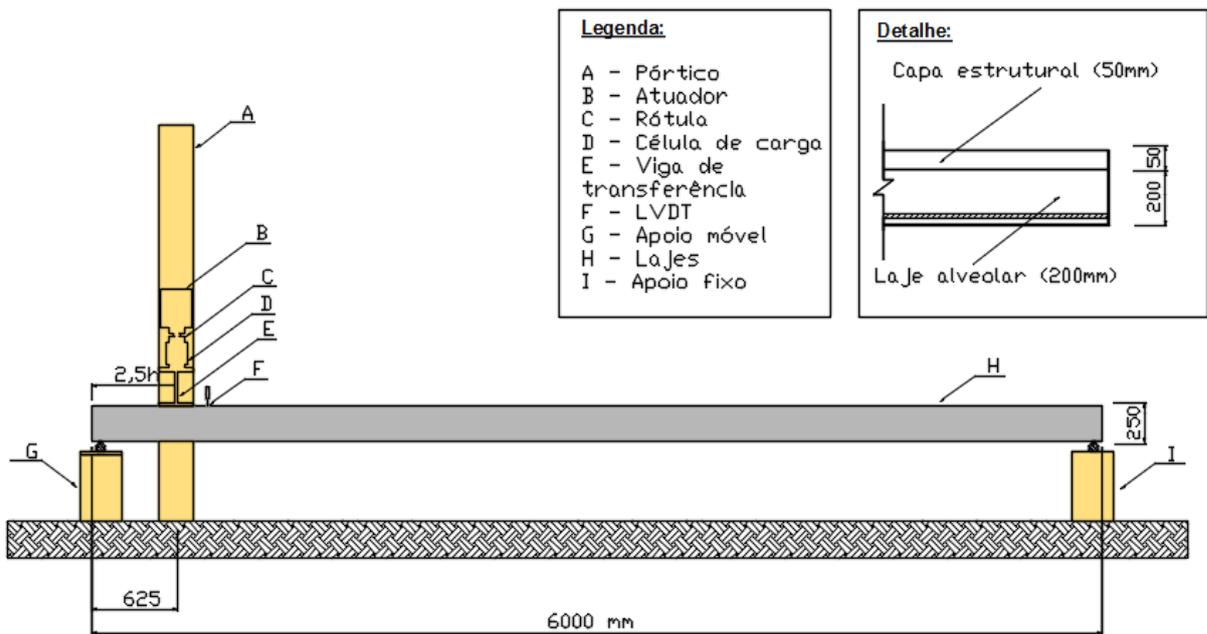
As lajes utilizadas na segunda etapa experimental pertencem ao mesmo lote de fabricação das unidades testadas no programa experimental 1 desta pesquisa, e foram ensaiadas conforme o modelo FIP (1992) para a determinação da resistência ao esforço cortante.

### 3.6.1 Modelo de ensaio do Programa experimental 2 (*Test set up*)

Para avaliar a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares, sendo o cisalhamento proveniente exclusivamente do esforço cortante, foi empregado o esquema de ensaio (“*test set up*”) que segue as recomendações da FIP (1992), porém fazendo uso de lajes duplas, conforme a Figura 3.82 e a Figura 3.83.

**Figura 3.82: Esquema do ensaio – Vista lateral.**

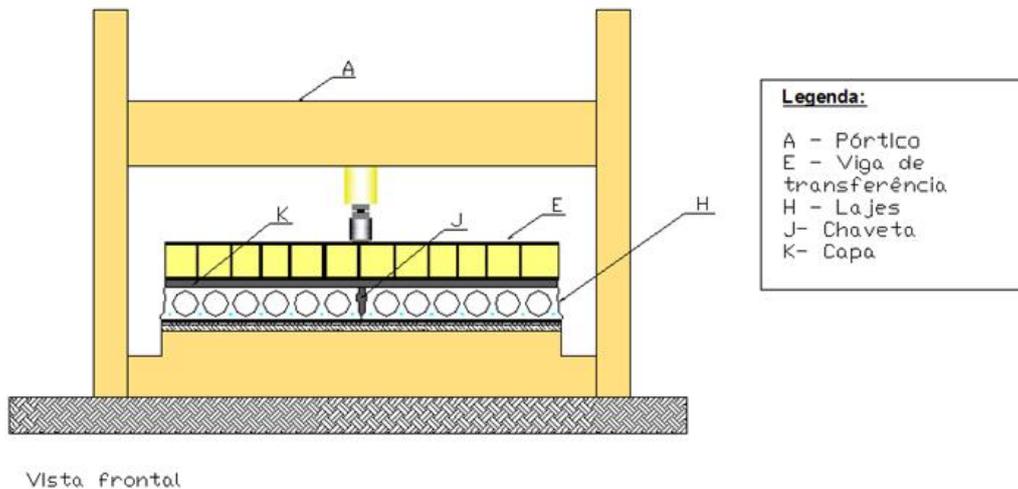
#### Esquema de ensaio (segundo modelo FIP)



Vista lateral

Fonte: O AUTOR.

**Figura 3.83: Esquema do ensaio – Vista Frontal.**



**Fonte: O AUTOR.**

O objetivo dos ensaios de lajes duplas foi o de tornar o modelo de ensaiado o mais próximo possível de um pano de laje executado em uma obra em estrutura pré-fabricada de concreto. Além disso, verificar a influência da presença da capa estrutural unida a outra laje para avaliar a sua contribuição.

### **3.6.2 Equipamentos de ensaio do Programa experimental 2**

Os ensaios de resistência ao esforço cortante foram realizados no LES – Laboratório de Estruturas da UNICAMP. Este laboratório trata-se de um ambiente destinado a estudo, pesquisa e extensão na área de engenharia civil, mais precisamente na área de materiais e estruturas, possuindo os equipamentos necessários para pesquisas com elementos estruturais de grandes dimensões, conforme a Figura 3.84.

**Figura 3.84: Pórtico de ensaio da FEC – UNICAMP.**



**Fonte: O AUTOR.**

Para a realização dos ensaios, utilizou-se:

- Empilhadeira com capacidade de 50 kN para montagem dos ensaios;
- Caminhão com guincho hidráulico do tipo Munck com capacidade de 200 kN para montagem dos ensaios;
- Atuador hidráulico da marca Enerpac com capacidade de 600kN, alimentado por uma bomba elétrica com controlador manual;
- Pórticos e laje de reação para a realização dos ensaios;
- Ferramentas em geral para montagem/desmontagem do aparato de ensaios;
- Transdutores LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* ou Transformadores Diferenciais Variáveis Linearmente ) da marca MM (*Micro-Measurements*) para a aferição dos deslocamentos ocorridos nos ensaios;

- Sistema de aquisição de dados *StrainSmart Data Acquisition System* da marca MM (*Micro-Measurements*) para captação dos dados fornecidos pela célula de carga e LVDT's;
- Microcomputador para operação do sistema de aquisição de dados;
- Célula de carga da marca MSI (*Micro Sensores Industriais*) de carga com capacidade para 600 kN;
- Prensa para ensaio com capacidade para 2000 KN da marca *Soil Test*;
- Prensa para ensaio com capacidade para 500 KN da marca *Soil Test*.

A caracterização do concreto das lajes e da capa estrutural bem como da argamassa da chave de cisalhamento, foi realizada no Laboratório de Sistemas Estruturais – LSE da UFSCar e no próprio LES-UNICAMP.

### **3.6.3 Caracterização dos materiais utilizados no Programa experimental 2**

Neste item serão apresentados os processos de caracterização dos principais materiais utilizados na fabricação das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas desta pesquisa, bem como empregados na capa estrutural e na chave de cisalhamento.

#### **3.6.3.1 Concreto**

Conforme mencionado anteriormente, os elementos ensaiados são pertencentes ao mesmo lote de lajes utilizadas no primeiro programa experimental, assim sendo, a caracterização do concreto das lajes é a mesma apresentada no item 3.5.4.1.

A segunda etapa experimental contou com lajes que possuíam capeamento estrutural que também foi submetido a ensaios de controle.

Corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foram moldados segundo a ABNT NBR 5738:2003 para a realização dos ensaios de:

- i. resistência à compressão na data do ensaio das lajes;

- ii. resistência à tração diametral e tração na flexão na data do ensaio das lajes;
- iii. módulo de elasticidade.

A Figura 3.85 apresenta a moldagem dos corpos de prova no momento da execução do capeamento das lajes.

**Figura 3.85: Moldagem de corpos do capeamento estrutural.**



**Fonte: O AUTOR.**

A caracterização do concreto das lajes foi realizada no LSE – UFSCar, item 3.5.4.1, e no LES - UNICAMP com uso de uma prensa de ensaio com capacidade para 2000 KN da marca Soil Test, conforme a Figura 3.86.

**Figura 3.86: Ensaio dos corpos de prova das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os corpos de prova foram retificados conforme procedimento apresentado no do Programa experimental 1, no item 3.5.4.1.

Todos os ensaios foram executados de acordo com as normas: ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 7222:2011, ABNT NBR 12142:2010, e ABNT NBR 8522:2008.

A caracterização do concreto das lajes é apresentado na Tabela 3.2 do Programa experimental 1, no item 3.5.4.1.

Os dados da caracterização do concreto utilizado na execução dos capeamentos estruturais dos 6 modelos ensaiados na segunda etapa experimental são apresentados da Tabela 3.34 a Tabela 3.39.

**Tabela 3.34: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 1.**

Concreto Capa Estrutural	Laje 1							
Slump 120 mm	7 dias (08/10/15) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [Mpa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	24300	30,32	31,40	N/A	0,03	0,87	29,98	N/A
	25200	31,44						
	26000	32,44						
Tração na flexão	3000	3,92	N/A	2,68	0,03	0,09	N/A	2,54
	3000	3,92						
	2800	3,66						
Tração Diametral	9400	2,93	N/A	2,53	0,04	0,11	N/A	2,34
	8600	2,68						
Módulo de Elasticidade	35,54 GPa				$E_{médio} = 34,10$ GPa			
	32,66 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

**Tabela 3.35: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 2.**

Concreto Capa Estrutural	Laje 2							
Slump 150 mm	7 dias (29/10/15) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	24400	30,45	33,40	N/A	0,06	2,16	29,84	N/A
	28500	35,56						
	27400	34,19						
Tração na flexão	3600	4,704	N/A	3,35	0,11	0,38	N/A	2,74
	3200	4,18133						
	4200	5,49						
Tração Diametral	10500	3,28	N/A	3,02	0,02	0,07	N/A	2,90
	11000	3,43						
Módulo de Elasticidade	30,73 GPa				$E_{médio} = 29,09$ GPa			
	27,45 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.36: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 3.

Concreto Capa Estrutural	Laje 3							
Slump 100 mm	8 dias (18/11/15) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	31800	39,68	38,93	N/A	0,02	0,61	37,93	N/A
	30600	38,18						
	31200	38,93						
Tração na flexão	3300	4,312	N/A	2,71	0,08	0,22	N/A	2,36
	2800	3,65867						
	2800	3,66						
Tração Diametral	12200	3,81	N/A	3,51	0,02	0,08	N/A	3,37
	12800	3,99						
Módulo de Elasticidade	24,42 GPa				$E_{médio} = 22,96$ GPa			
	21,49 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.37: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 4.

Concreto Capa Estrutural	Laje 4							
Slump 100 mm	6 dias (30/11/15) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	22000	27,45	27,49	N/A	0,02	0,46	26,74	N/A
	21600	26,95						
	22500	28,08						
Tração na flexão	3100	4,05067	N/A	2,71	0,04	0,11	N/A	2,53
	2800	3,65867						
	3000	3,92						
Tração Diametral	9700	3,03	N/A	2,60	0,05	0,13	N/A	2,39
	8800	2,75						
Módulo de Elasticidade	25,22 GPa				$E_{médio} = 24,77$ GPa			
	24,32 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.38: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 5.

Concreto Capa Estrutural	Laje 5							
Slump 100 mm	6 dias (26/01/16) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	18300	22,83	22,63	N/A	0,01	0,29	22,14	N/A
	17800	22,21						
	18300	22,83						
Tração na flexão	2300	3,00533	N/A	2,23	0,05	0,11	N/A	2,04
	2400	3,136						
	2600	3,40						
Tração Diametral	7800	2,43	N/A	2,33	0,06	0,14	N/A	2,10
	8800	2,75						
Módulo de Elasticidade	20,35 GPa				$E_{médio} = 20,56$ GPa			
	20,76 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.39: Caracterização do concreto da capa estrutural do modelo 6.

Concreto Capa Estrutural	Laje 6							
Slump 100 mm	6 dias (04/02/16) - No momento do ensaio da laje							
Tipo de Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [Mpa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk}$ [MPa]
Resistência a Compressão	13400	16,72	17,51	N/A	0,03	0,58	16,56	N/A
	14500	18,09						
	14200	17,72						
Tração na flexão	2200	2,87467	N/A	2,04	0,02	0,04	N/A	1,97
	2300	3,00533						
	2200	2,87						
Tração Diametral	7200	2,25	N/A	1,94	0,04	0,08	N/A	1,80
	6600	2,06						
Módulo de Elasticidade	22,31 GPa				$E_{médio} = 20,05$ GPa			
	17,78 GPa							
OBS: N/A = Não Aplicavel ao campo selecionado.								

Fonte: O AUTOR.

### 3.6.3.2 Argamassa

A chave de cisalhamento foi executada por meio do uso de argamassa. A mistura foi feita no laboratório com o uso de uma betoneira onde a areia utilizada pertenceu ao mesmo lote. O cimento empregado foi o CPV ARI e traço adotado, em volume, foi 1:3,5 com A/C = 0,45.

Corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm foram moldados segundo a ABNT NBR 13279:2005 para a realização dos ensaios de resistência a compressão na data do ensaio das lajes.

A Figura 3.87 apresenta os corpos de prova moldados no momento da execução da chave de cisalhamento das lajes.

**Figura 3.87: Corpos de prova da chave de cisalhamento.**



**Fonte: O AUTOR.**

A caracterização da argamassa da chave de cisalhamento das lajes foi realizada no LES - UNICAMP, com uso de uma prensa de ensaio com capacidade para 500 KN da marca Soil Test, conforme a Figura 3.88.

**Figura 3.88: Ensaio dos corpos de prova das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os corpos de prova foram capeados por meio de uma argamassa fundida de enxofre.

Para a argamassa utilizada na execução das chaves de cisalhamento dos 6 modelos ensaiados na segunda etapa experimental, seus valores são apresentados da Tabela 3.40 a Tabela 3.45.

**Tabela 3.40: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 1.**

Argamassa Chaveta	Ensaio I					
	14 dias (08/10/15) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{2m}$ [Mpa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{a_k}$ [MPa]
Resistência a Compressão	3850	19,22	20,80	0,07	1,45	18,42
	4100	20,46				
	4550	22,71				

Fonte: O AUTOR.

**Tabela 3.41: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 2.**

Argamassa Chaveta	Ensaio II					
	7 dias (04/02/16) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [Mpa]	$f_{2m}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{a_k}$ [MPa]
Resistência a Compressão	4200	20,96	22,71	0,09	2,13	19,21
	4300	21,46				
	5150	25,70				

Fonte: O AUTOR.

**Tabela 3.42: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 3.**

Argamassa Chaveta	Ensaio III					
	14 dias (29/10/15) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{2m}$ [Mpa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{a_k}$ [MPa]
Resistência a Compressão	3350	16,72	17,14	0,02	0,31	16,62
	3500	17,47				
	3450	17,22				

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.43: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 4.

Argamassa Chaveta	Ensaio IV					
	13 dias (26/01/16) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [Mpa]	$f_{2m}$ [MPa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ak}$ [MPa]
Resistência a Compressão	4400	21,96	24,08	0,09	2,12	20,59
	5250	26,20				
	0,00	0,00				

Fonte: O AUTOR.

Observação: Para essa série de ensaios um corpo de prova foi rejeitado por apresentar problemas na desforma.

Tabela 3.44: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 5.

Argamassa Chaveta	Ensaio V					
	13 dias (18/11/15) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{2m}$ [Mpa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ak}$ [MPa]
Resistência a Compressão	3800	18,97	17,47	0,06	1,13	15,60
	3250	16,22				
	3450	17,22				

Fonte: O AUTOR.

Tabela 3.45: Caracterização da argamassa da chave de cisalhamento do modelo 6.

Argamassa Chaveta	Ensaio VI					
	12 dias (30/11/15) - No momento do ensaio da laje					
Ensaio	Carregamento [kgf]	Tensão [MPa]	$f_{2m}$ [Mpa]	$\delta$	$S_d$ [MPa]	$f_{ak}$ [MPa]
Resistência a Compressão	3540	17,67	17,45	0,12	2,02	14,12
	2980	14,87				
	3970	19,81				

Fonte: O AUTOR.

### 3.6.3.3 Aço

O controle das cordoalhas é apresentado no item 3.5.4.2 do Programa experimental 1.

### 3.6.4 Medidas preliminares do Programa Experimental 2

A metodologia usada para a realização das medidas preliminares foi a mesma empregada no Programa Experimental 1, no item 3.5.5 .

Na Tabela 3.46 são apresentadas as dimensões das LAPs ensaiadas na segunda etapa desta pesquisa.

**Tabela 3.46: Dimensões das LAPs.**

Laje	Lado	Altura			Largura			Comprimento		
		H <sub>1</sub> [mm]	H <sub>2</sub> [mm]	H <sub>médio</sub> [mm]	B <sub>inf</sub> [mm]	B <sub>sup</sub> [mm]	B <sub>médio</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	L <sub>médio</sub> [mm]
LA 1	A	20,50	20,30	20,40	124,30	122,60	123,45	598,50	598,40	598,45
	B	20,50	20,40	20,45	124,10	122,70	123,40			
	A	20,70	20,50	20,60	124,20	123,00	123,60	598,80	599,00	598,90
	B	20,20	20,60	20,40	124,60	122,20	123,40			
LA 2	A	20,50	20,90	20,70	123,80	122,80	123,30	599,30	599,80	599,55
	B	20,50	20,90	20,70	124,30	122,10	123,20			
	A	18,90	21,00	19,95	124,40	123,50	123,95	597,90	600,00	598,95
	B	20,70	20,70	20,70	123,60	122,00	122,80			
LA 3	A	20,20	20,80	20,50	123,90	122,90	123,40	599,00	599,50	599,25
	B	20,50	20,50	20,50	124,00	123,40	123,70			
	A	20,90	20,40	20,65	81,80	80,10	80,95	598,20	599,20	598,70
	B	20,40	20,00	20,20	124,60	122,40	123,50			
LA 4	A	21,10	20,10	20,60	123,00	122,00	122,50	598,00	599,90	598,95
	B	20,20	20,10	20,15	124,00	123,00	123,50			
	A	20,00	20,00	20,00	124,20	122,90	123,55	597,90	598,70	598,30
	B	20,10	20,00	20,05	123,90	123,10	123,50			
LA 5	A	*	21,50	21,50	83,50	75,00	79,25	598,40	598,80	598,60
	B	21,00	*	21,00	84,00	75,00	79,50			
	A	21,00	20,50	20,75	124,50	123,00	123,75	597,00	598,20	597,60
	B	20,50	20,00	20,25	124,50	123,50	124,00			
LA 6	A	20,40	*	20,40	79,50	77,70	78,60	599,00	598,10	598,55
	B	*	20,50	20,50	75,70	74,50	75,10			
	A	20,10	20,00	20,05	124,10	123,00	123,55	600,10	599,10	599,60
	B	20,50	20,10	20,30	123,60	122,20	122,90			

**Fonte: O AUTOR.**

Na Tabela 3.47 são apresentados os valores do cobrimento e posição efetiva das cordoalhas.

**Tabela 3.47: Valores de cobrimento e posição das cordoalhas.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
LA 1	Ce	38,00	43,00	39,00	40,00	46,00	44,00	47,00	42,00
	Cd	35,00	37,00	39,00	37,00	34,00	34,00	35,00	31,00
	Cinf	25,00	25,00	25,00	23,00	23,00	25,00	24,00	24,00
	Ce	34,00	33,00	34,00	34,00	40,00	39,00	38,00	36,00
	Cd	45,00	47,00	46,00	46,00	43,00	42,00	49,00	41,00
	Cinf	25,00	28,00	25,00	24,00	23,00	23,00	23,00	23,00
LA 2	Ce	42,00	49,00	43,00	43,00	45,00	46,00	50,00	45,00
	Cd	37,00	38,00	39,00	40,00	31,00	35,00	34,00	30,00
	Cinf	22,00	24,00	24,00	23,00	23,00	25,00	28,00	27,00
	Ce	35,00	44,00	40,00	42,00	42,00	41,00	41,00	42,00
	Cd	31,00	36,00	37,00	40,00	32,00	31,00	31,00	27,00
	Cinf	32,00	30,00	30,00	27,00	27,00	29,00	28,00	28,00
LA 3	Ce	29,00	34,00	33,00	32,00	40,00	37,00	36,00	34,00
	Cd	43,00	46,00	44,00	45,00	42,00	39,00	43,00	36,00
	Cinf	28,00	28,00	28,00	25,00	26,00	28,00	21,00	29,00
	Ce	30,00	34,00	35,00	*	*	41,00	38,00	35,00
	Cd	44,00	47,00	32,00	*	*	40,00	47,00	38,00
	Cinf	27,00	27,00	26,00	*	*	25,00	24,00	23,00
LA 4	Ce	26,00	33,00	33,00	30,00	38,00	27,00	33,00	37,00
	Cd	43,00	47,00	47,00	46,00	45,00	45,00	40,00	37,00
	Cinf	30,00	30,00	29,00	27,00	29,00	27,00	27,00	27,00
	Ce	41,00	5,00	43,00	*	*	49,00	48,00	46,00
	Cd	30,00	35,00	36,00	*	*	33,00	30,00	30,00
	Cinf	29,00	28,00	32,00	*	*	28,00	31,00	30,00
LA 5	Ce	37,00	33,00	32,00	29,00	38,00	*	*	*
	Cd	45,00	49,00	46,00	48,00	42,00	*	*	*
	Cinf	33,00	31,00	30,00	28,00	29,00	*	*	*
	Ce	*	*	*	46,00	49,00	49,00	49,00	47,00
	Cd	*	*	*	40,00	32,00	34,00	36,00	31,00
	Cinf	*	*	*	26,00	27,00	28,00	28,00	29,00
LA 6	Ce	27,00	31,00	30,00	28,00	38,00	*	*	*
	Cd	44,00	49,00	47,00	47,00	45,00	*	*	*
	Cinf	30,00	32,00	29,00	26,00	27,00	*	*	*
	Ce	*	*	*	46,00	47,00	48,00	48,00	44,00
	Cd	*	*	*	39,00	30,00	34,00	34,00	26,00
	Cinf	*	*	*	26,00	26,00	30,00	30,00	29,00

**Fonte: O AUTOR.**

Na Tabela 3.48 são apresentados os valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes.

**Tabela 3.48: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Nervura							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
LA 1	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	35,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	43,00	*
LA 2	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*
	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	43,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
LA 3	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	40,00	37,00	42,00	40,00	*
	b <sub>ext</sub>	41,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	42,00	37,00	40,00	39,00	41,00	*
LA 4	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	43,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	38,00	38,00	40,00	39,00	*
	b <sub>ext</sub>	40,00	*	*	*	*	*	*	43,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	39,00	41,00	39,00	42,00	42,00	*
LA 5	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	38,00	43,00	41,00	*
	b <sub>ext</sub>	43,00	*	*	*	*	*	*	40,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
LA 6	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	39,00	42,00	45,00	45,00	*
	b <sub>ext</sub>	39,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	46,00	43,00	42,00	38,00	45,00	42,00	*

Fonte: O AUTOR.

As medidas de contra-flecha das lajes são apresentadas na Tabela 3.49.

**Tabela 3.49: Valores da contra-flecha das lajes.**

Contra-flecha [mm]	Laje					
	LA 1	LA 2	LA 3	LA 4	LA 5	LA 6
	15,00	20,00	17,00	19,00	20,00	25,00

Fonte: O AUTOR.

Para os modelos ensaiados foram medidos os escorregamentos iniciais das cordoalhas a fim de serem comparados com os valores obtidos após os ensaios (escorregamento final).

Na Tabela 3.50 são apresentados os valores dos escorregamentos iniciais ( $A_i$ ) das cordoalhas das lajes.

**Tabela 3.50: Valores do escorregamento inicial das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Ai	0,11	0,59	0,52	0,45	1,09	0,49	0,17	0,18
	Ai	0,38	0,19	0,50	0,57	0,30	0,43	0,15	0,24
2	Ai	0,84	0,67	0,49	0,15	1,10	0,28	0,58	0,30
	Ai	0,21	0,06	1,32	*	*	0,09	0,99	0,15
3	Ai	*	*	*	0,60	1,54	1,30	0,41	0,96
	Ai	0,90	0,51	1,16	1,04	0,51	*	*	*
4	Ai	*	*	*	0,77	0,22	0,40	0,92	0,45
	Ai	0,58	0,68	0,54	0,32	0,40	*	*	*
5	Ai	0,39	0,50	0,66	0,77	1,33	0,60	0,39	0,53
	Ai	0,65	0,77	0,45	*	*	0,45	0,42	1,21
6	Ai	0,90	0,63	0,66	1,54	0,59	1,02	0,83	0,81
	Ai	0,85	0,38	0,85	0,82	0,64	0,75	0,67	1,12

**Fonte: O AUTOR.**

Após a coleta dos dados da análise dimensional, as lajes foram preparadas para serem posicionadas no local definitivo de ensaio.

### 3.6.5 Preparação dos modelos

As lajes foram posicionadas sobre os apoios com o auxílio de um caminhão munck, após feitas as marcações, garantindo o apoio mínimo e o ponto exato de aplicação do carregamento, segundo recomendação da FIP (1992), conforme a Figura 3.89.

**Figura 3.89: Posicionamento das lajes para ensaio.**



**Fonte: O AUTOR.**

Após o posicionamento das lajes foi executada a chave de cisalhamento, conforme a Figura 3.90.

**Figura 3.90: Execução da chave de cisalhamento.**



**Fonte: O AUTOR.**

Com a chave de cisalhamento já executada, iniciou-se a preparação para a concretagem da capa estrutural, conforme a Figura 3.91.

**Figura 3.91: Preparação para a execução da capa estrutural.**



**Fonte: O AUTOR.**

Após o posicionamento da armadura (tela soldada de 4,2 mm - armadura mínima solicitada pelo fabricante das lajes) e execução da forma, realizou-se a concretagem da capa estrutural, conforme a Figura 3.93.

**Figura 3.92: Execução da capa estrutural.**



**Fonte: O AUTOR.**

Ao final da concretagem as lajes foram cobertas com lona plástica para ajudar no processo de cura e evitar a perda de umidade para o ambiente.

Depois de curadas, todas as lajes foram pintadas com tinta látex branca para ajudar na visualização e identificação das aberturas de fissuras, além de sinalizar o escorregamento das cordoalhas, conforme a Figura 3.93.

**Figura 3.93: Processo de pintura das lajes.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os elementos ensaiados foram posicionados sobre dois apoios, sendo estes concebidos de modo a atuarem como: apoio fixo (metálico, rígido, e com elemento de contato em forma de rolete travado com cunhas), e apoio móvel (metálico, rígido, com elemento de contato em forma de rolete), conforme a Figura 3.94.

**Figura 3.94: Aparelho de apoio.**



**Fonte: O AUTOR.**

Com os modelos já posicionados, aplicou-se uma camada de argamassa para regularização da superfície de contato entre a viga de transferência de carregamento e a superfície da laje, conforme a Figura 3.95.

**Figura 3.95 : Execução da regularização sobre a laje.**



**Fonte: O AUTOR.**

Após o posicionamento da viga de transferência, instalou-se a célula de carga e os transdutores para aquisição de dados, conforme a Figura 3.96.

**Figura 3.96: Montagem do esquema de ensaio.**



**Fonte: O AUTOR.**

Os procedimentos acima descritos foram utilizados em todos os ensaios da segunda etapa experimental desta pesquisa.

### 3.6.6 Execução dos ensaios

Neste item serão apresentados os ensaios de resistência ao esforço cortante das lajes duplas desta pesquisa.

Por meio dos valores coletados pela célula de carga e pelos LVDT's, dispostos nas faces inferiores direita e esquerda de cada uma das lajes que formam os modelos, foram plotadas as curvas carregamento versus deslocamento.

Um LVDT foi posicionado em um dos apoios, na região mais próxima a aplicação do carregamento, com o objetivo de se avaliar o deslocamento dos apoios, conforme a Figura 3.97. O maior valor encontrado para o deslocamento foi de 0,636 mm, sendo portanto desprezado para a plotagem dos gráficos e análise dos dados.

**Figura 3.97: Deslocamento dos apoios.**



**Fonte: O AUTOR.**

Durante os ensaios o primeiro modelo apresentou fissurações na região compreendida entre a laje e a capa estrutural em todas as extremidades, além da perda de sinal de um de seus transdutores. O problema da fissuração foi resolvido após a melhoria do processo de cura das lajes, que além de aspensão

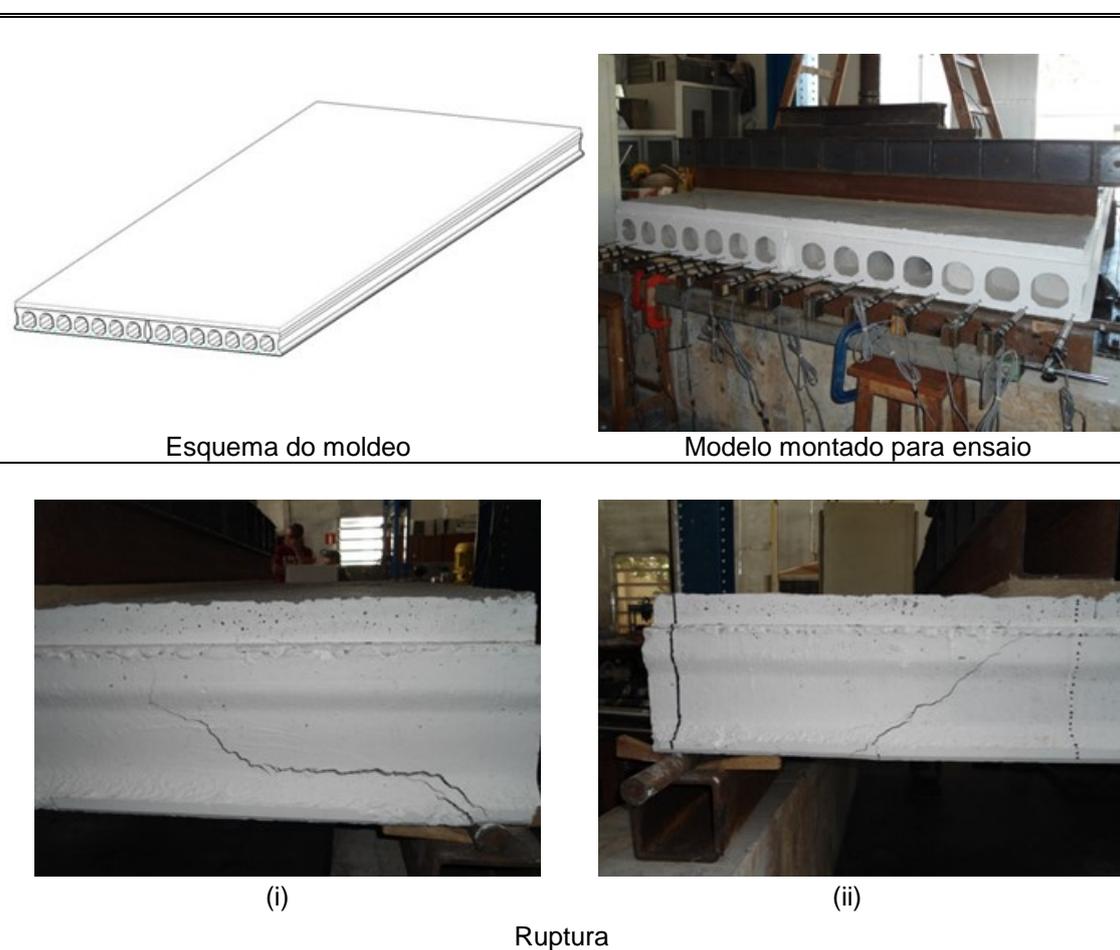
de água passou a contar com a proteção do elemento concretado com uma lona plástica por um período de 48 horas.

### 3.6.6.1 Ensaio da Laje 1

A Laje 1 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.98 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

**Figura 3.98: Ensaio Laje 1.**

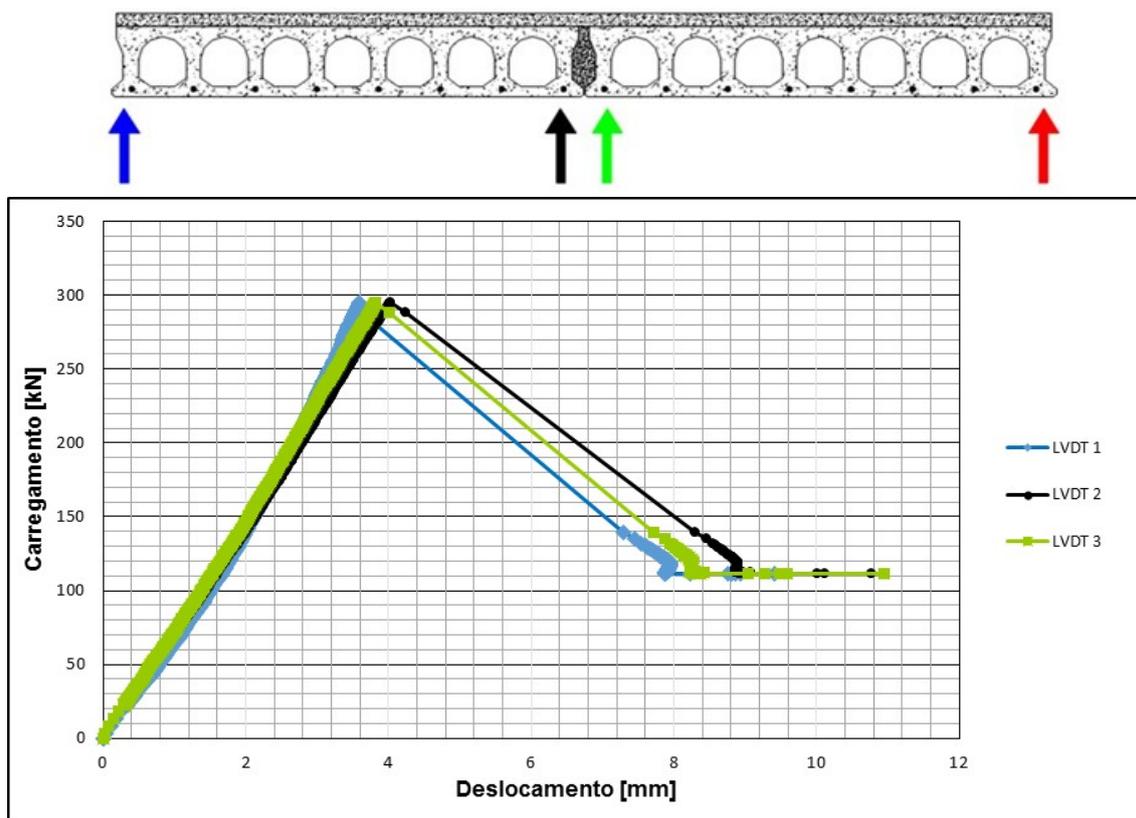


**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 1, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.99 apresenta as curvas Força vs. Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 1.

**Figura 3.99: Curva do Ensaio da Laje 1.**



Fonte: O AUTOR.

De acordo com os resultados descritos para a Laje 1, mesmo com os problemas de fissuração, mostrado pela Figura 3.100, e a perda de sinal de um dos transdutores, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's.

**Figura 3.100: Fissuras na região entre a laje e a capa estrutural.**



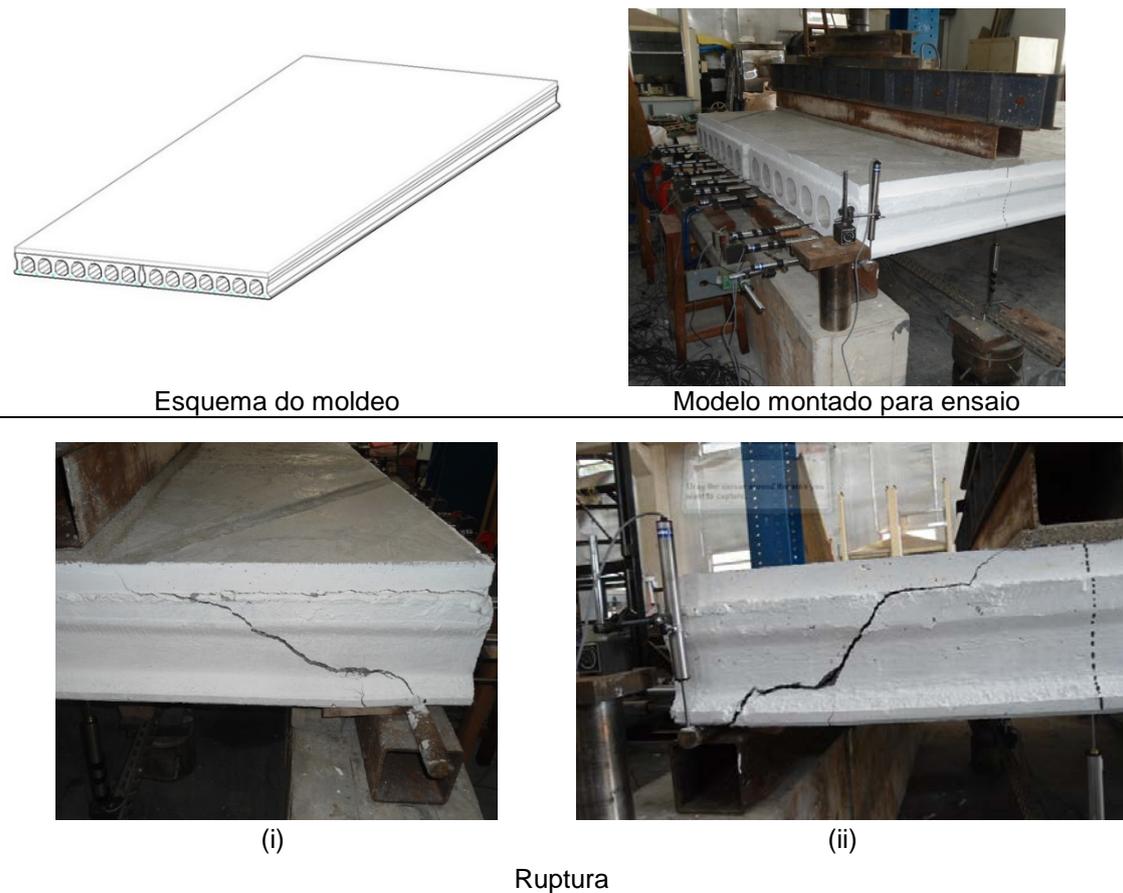
Fonte: O AUTOR.

### 3.6.6.2 Ensaio da Laje 2

A Laje 2 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.101 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

**Figura 3.101: Ensaio Laje 2.**

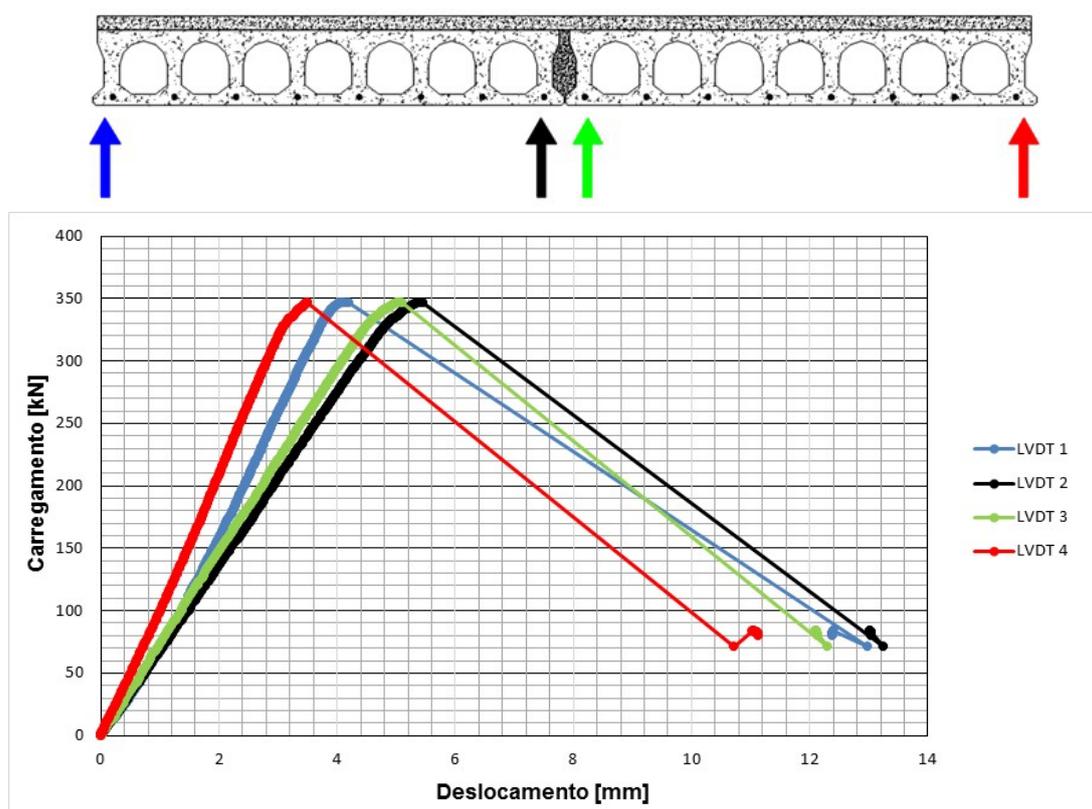


**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 2, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.102 apresenta as curvas Força vs. Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 2.

Figura 3.102: Curva do Ensaio da Laje 2.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com os resultados descritos para a Laje 2 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's intermediários (na região central do pano de laje), contudo nota-se um desvio nos transdutores das extremidades das lajes (curvas nas cores vermelha e azul).

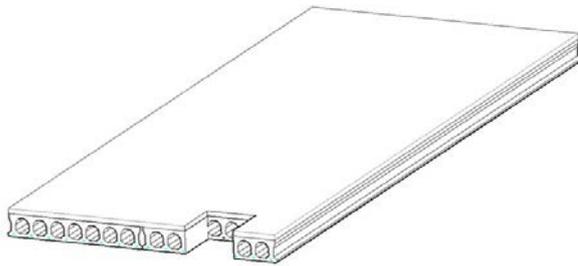
A diferença dos transdutores das extremidades pode ser consequência da acomodação dos apoios ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pela diferença de tensão existente nas cordoalhas das lajes devido ao processo produtivo, descrito no item 3.4.

### 3.6.6.3 Ensaio da Laje 3

A Laje 3 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.103 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

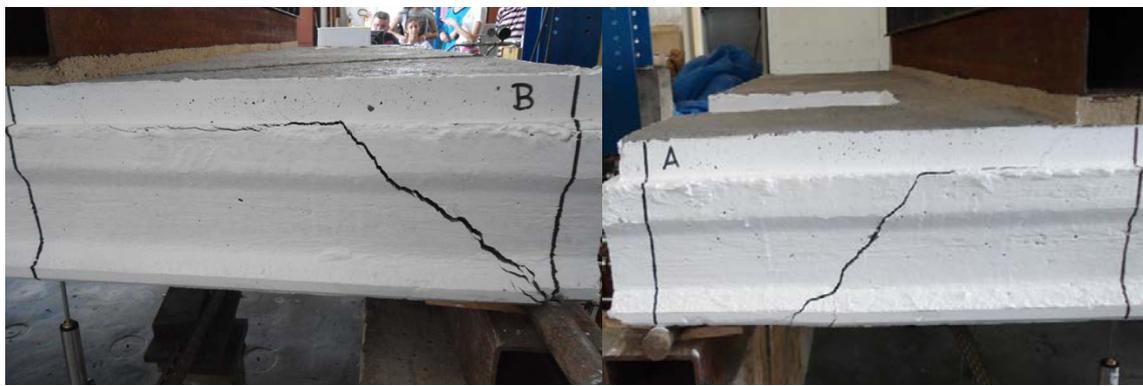
**Figura 3.103: Ensaio Laje 3.**



Esquema do molde



Modelo montado para ensaio



(i)

(ii)

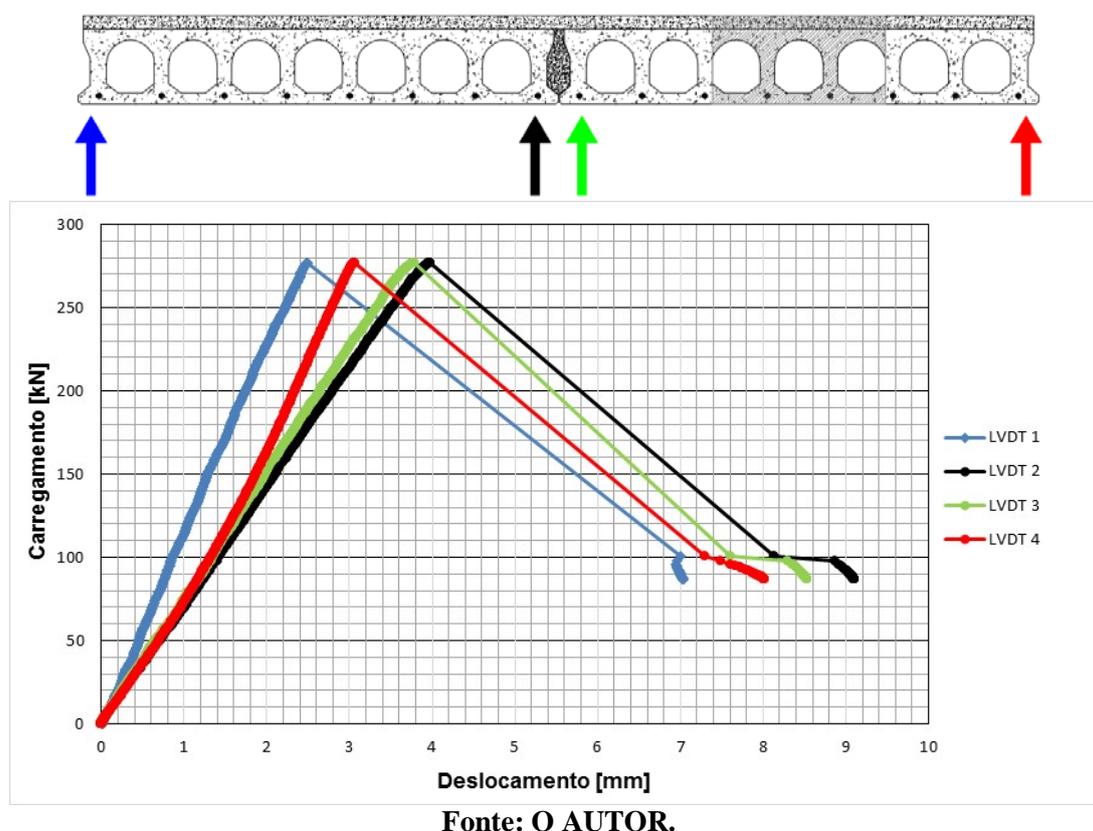
Ruptura

**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 3, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.104 apresenta as curvas Força vs. Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 3.

**Figura 3.104: Curva do Ensaio da Laje 3.**



De acordo com os resultados descritos para a Laje 3 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's intermediários (na região central do pano de laje), contudo nota-se um desvio nos transdutores das extremidades das lajes (curvas nas cores vermelha e azul).

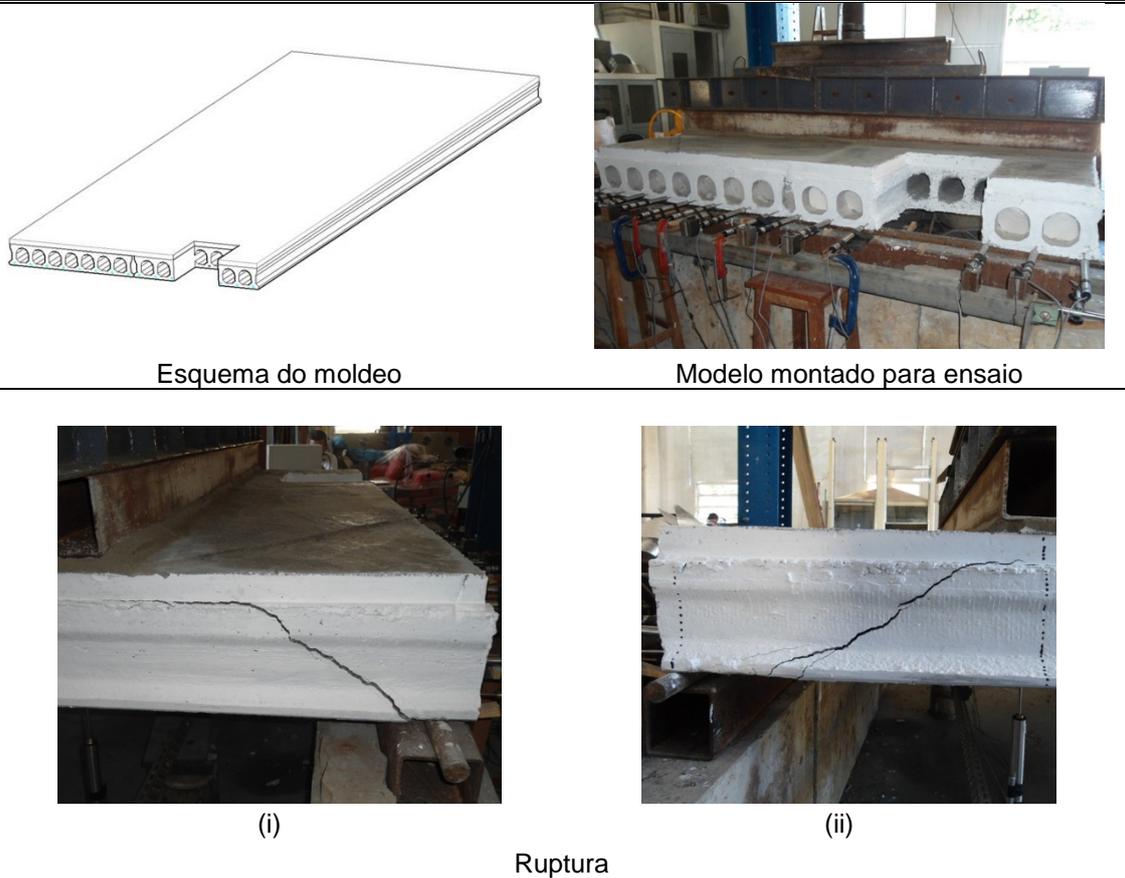
A diferença dos transdutores das extremidades pode ser consequência do diferente tipo de ruptura para as lajes, conforme apresentado pela Figura 3.103. Além do diferente tipo de ruptura, tal fato pode ter sido causado por uma acomodação dos apoios ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pela abertura em uma das lajes do pano. A diferença de tensão existente nas cordoalhas das lajes devido ao processo produtivo, descrito no item 3.4., também pode influenciar o seu comportamento.

#### **3.6.6.4 Ensaio da Laje 4**

A Laje 4 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.105 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

**Figura 3.105: Ensaio Laje 4.**

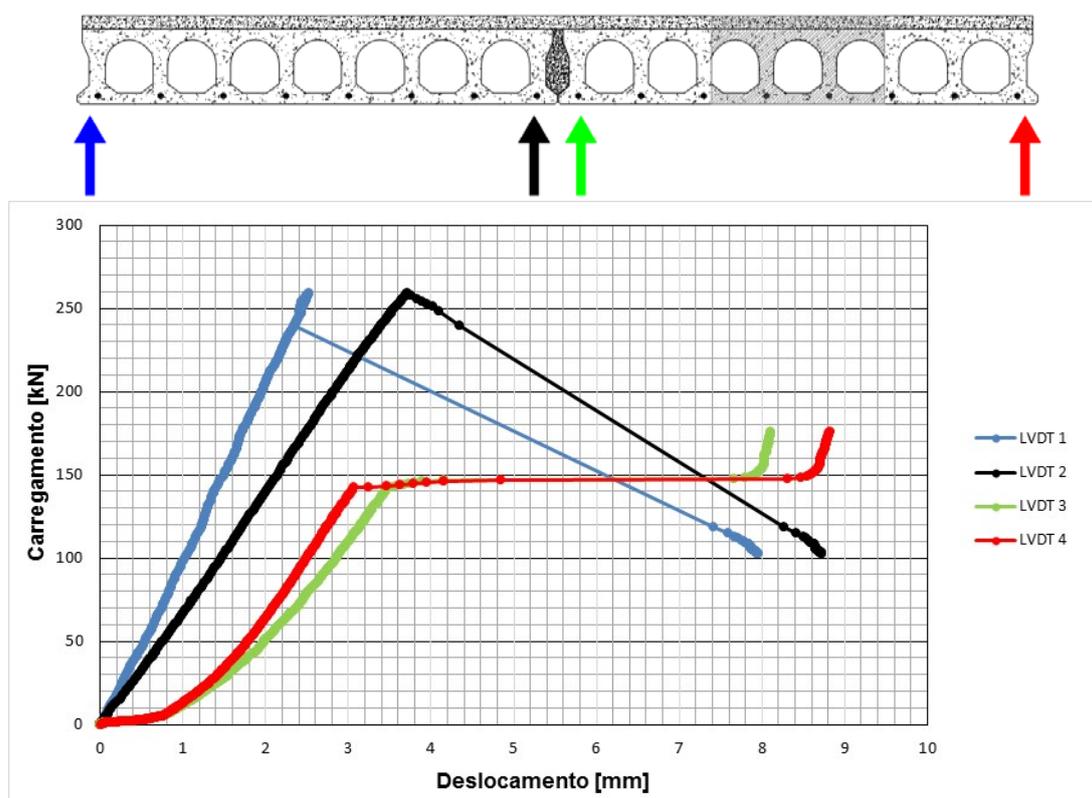


**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 4, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.106 apresenta as curvas Força vs. Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 4.

Figura 3.106: Curva do Ensaio da Laje 4.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com os resultados descritos para a Laje 4, observa-se que a ruptura da laje com a abertura ocorreu antes do que a laje sem abertura. Para esse modelo, a chave de cisalhamento e a capa estrutural não foram capazes de transferir totalmente o carregamento que estava sendo resistido pela laje com abertura para a laje sem abertura.

Pode-se dizer com base no gráfico que, as lajes, a chave de cisalhamento e o capeamento estrutural, trabalharam como um pano de laje (o mais próximo possível de uma estrutura monolítica) até próximo ao carregamento de 150 kN. A partir desse ponto, possivelmente a chave de cisalhamento falhou, fazendo com que as lajes contassem apenas com a aderência entre a sua superfície e a capa estrutural para se manterem unidas. Com o aumento do carregamento a resistência da ligação laje-capa foi excedida e o modelo passou a contar apenas com a resistência dos elementos (capa, lajes e chave) trabalhando individualmente.

Essa ruptura é de grande relevância, pois demonstra que o mecanismo de ruptura necessita da transferência de esforços realizado pela chave de

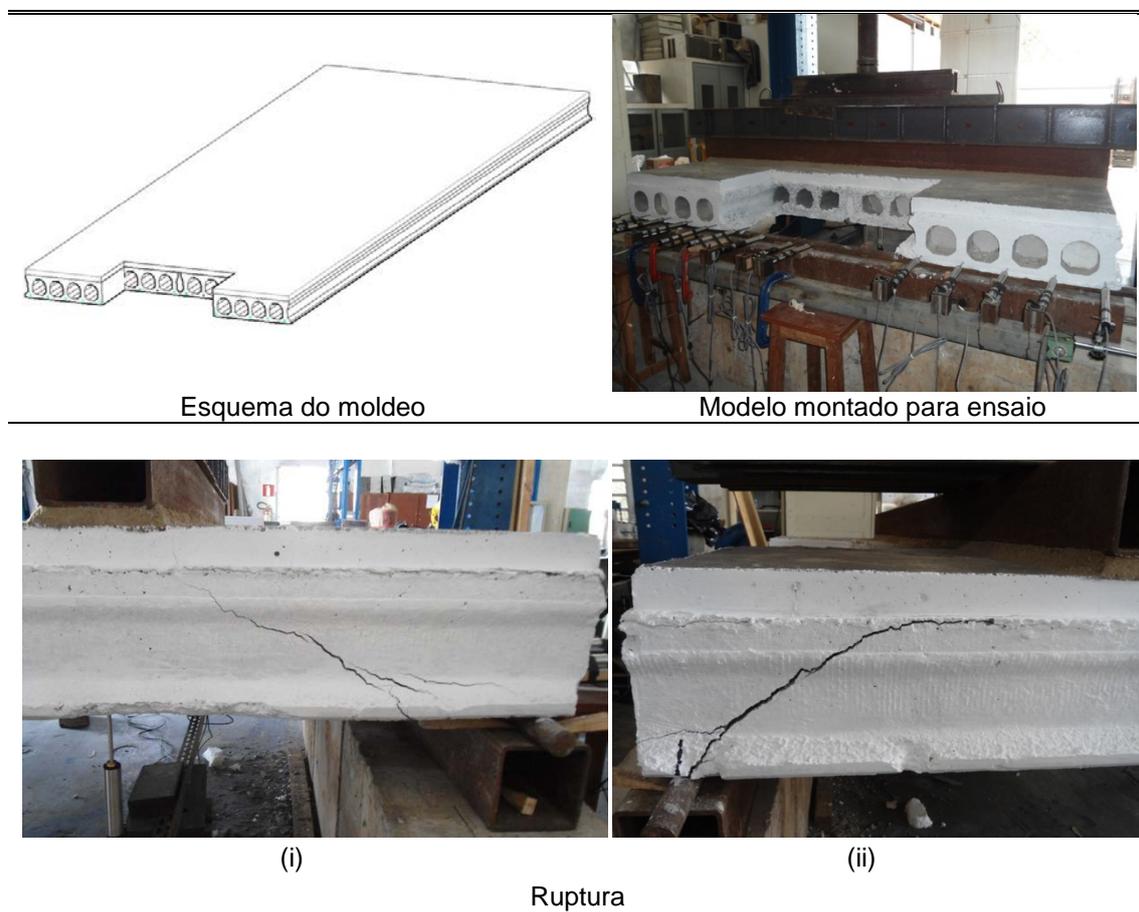
cisalhamento, o que significa que esse procedimento é de grande importância para execução de lajes alveolares com aberturas.

### 3.6.6.5 Ensaio da Laje 5

A Laje 5 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.107 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

**Figura 3.107: Ensaio Laje 5.**

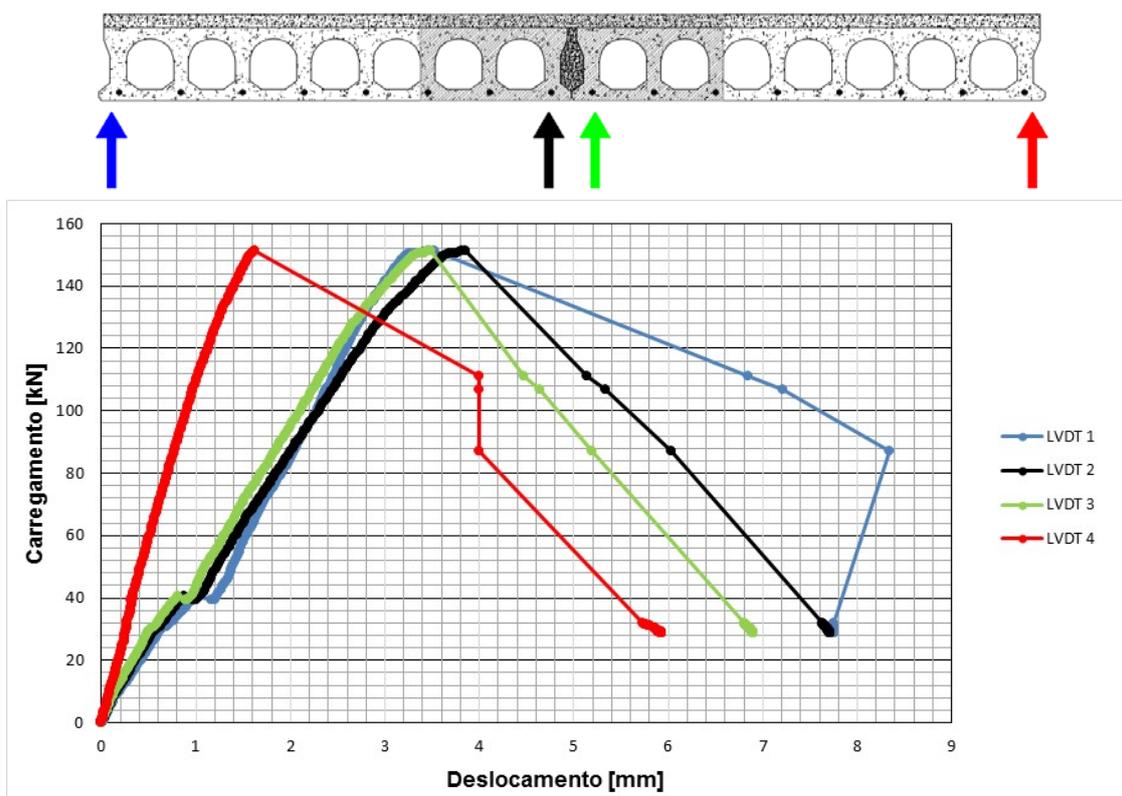


**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 5, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.108 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 5.

Figura 3.108: Curva do Ensaio da Laje 5.



Fonte: O AUTOR.

De acordo com os resultados descritos para a Laje 5 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's 1, 2 e 3, contudo nota-se um certo desvio no transdutor 4 (curva na cor vermelha).

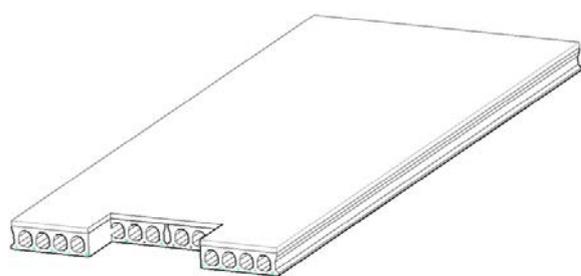
A diferença de leitura do transdutor 4 pode ser consequência do diferente tipo de ruptura para as lajes, conforme apresentado pela Figura 3.107. Além do diferente tipo de ruptura, tal fato pode ter sido causado por uma acomodação dos apoios ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pelas aberturas. A diferença de tensão existente nas cordoalhas das lajes devido ao processo produtivo, descrito no item 3.4., também pode influenciar o seu comportamento.

### 3.6.6.6 Ensaio da Laje 6

A Laje 6 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4 e os ensaios realizados conforme a metodologia descrita no item 3.6.1.

A Figura 3.109 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para a face direita (i) e esquerda (ii) da laje, respectivamente.

**Figura 3.109: Ensaio Laje 6.**



Esquema do molde



Modelo montado para ensaio



(i)



(ii)

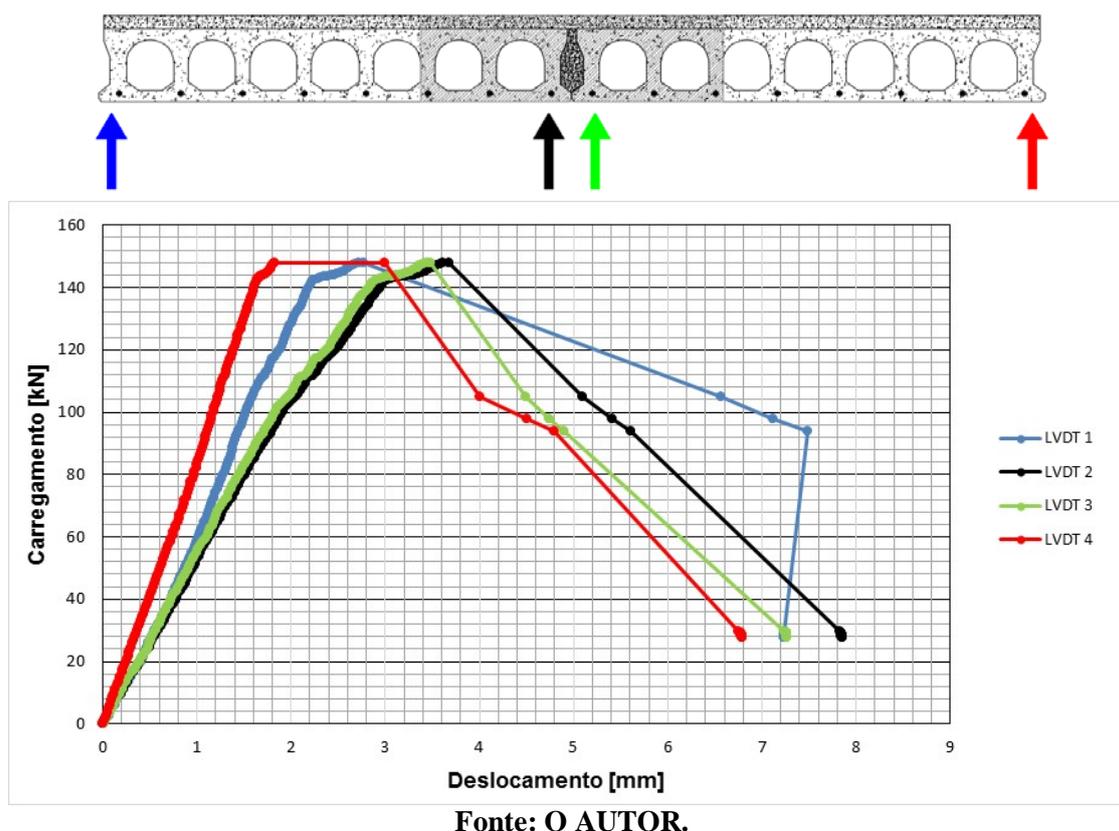
Ruptura

**Fonte: O AUTOR.**

De acordo com o Ensaio da Laje 6, a ruptura do modelo se deu por cisalhamento em ambas as faces, direita (i) e esquerda (ii).

A Figura 3.110 apresenta as curvas Carregamento vs Deslocamento, além da posição de cada LVDT e sua representação, obtidas no ensaio da Laje 6.

Figura 3.110: Curva do Ensaio da Laje 6.



De acordo com os resultados descritos para a Laje 6 pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's, com uma sutil diferença de leitura do transdutor 4 (curva na cor vermelha), que pode ser consequência da acomodação dos apoios ou simplesmente pelo desequilíbrio gerado pelas aberturas. A diferença de tensão existente nas cordoalhas das lajes devido ao processo produtivo, descrito no item 3.4., também pode influenciar o seu comportamento.

### 3.6.7 Escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa experimental 2

A verificação do escorregamento das cordoalhas foi feita por meio da identificação visual dos afundamentos seguida de medição com paquímetro.

Conforme apresentado no item 3.6.4, pela Tabela 3.50, anteriormente ao início dos ensaios foram coletados os valores do escorregamento inicial das cordoalhas.

Após a realização dos ensaios, os valores de escorregamento final (Af) das cordoalhas foram aferidos, conforme a Tabela 3.53.

**Tabela 3.51: Valores do escorregamento final das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Af	3,48	3,18	2,97	2,94	2,75	2,45	2,66	3,17
2	Af	2,92	1,74	2,26	*	*	1,18	1,82	1,87
3	Af	2,42	2,51	2,50	*	*	0,51	0,15	0,68
4	Af	6,44	6,79	6,99	6,60	6,19	*	*	*
5	Af	2,17	1,42	2,42	2,31	1,69	*	*	*

Fonte: O AUTOR.

### 3.6.8 Análise preliminar dos dados do Programa experimental 2

Neste item são analisados os resultados dos ensaios executado nas lajes estudadas, que segue a mesma metodologia empregada no Programa Experimental 1.

#### 3.6.8.1 Dimensões das lajes

A análise dimensional das lajes foi desenvolvida com base nas recomendações da ABNT NBR 14861:2011, que apresenta tolerâncias de fabricação de lajes alveolares, conforme a Tabela v do Anexo 6.

De acordo com a Tabela v, a variação admitida para a altura das lajes é de -10 mm e +12,5 mm. O comprimento pode ter um desvio de  $\pm 15$  mm, e nenhuma recomendação é feita quanto a largura da laje.

A Tabela 3.52 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.52: Dimensões das LAPs.**

Laje	Lado	Altura			Largura			Comprimento		
		H <sub>1</sub> [mm]	H <sub>2</sub> [mm]	H <sub>médio</sub> [mm]	B <sub>inf</sub> [mm]	B <sub>sup</sub> [mm]	B <sub>médio</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	L <sub>médio</sub> [mm]
LA 1	A	205,00	203,00	204,00	1243,00	1226,00	1234,50	5985,00	<b>5984,00</b>	5984,50
	B	205,00	204,00	204,50	1241,00	1227,00	1234,00			
	A	207,00	205,00	206,00	1242,00	1230,00	1236,00	5988,00	5990,00	5989,00
	B	202,00	206,00	204,00	1246,00	1222,00	1234,00			
LA 2	A	205,00	209,00	207,00	1238,00	1228,00	1233,00	5993,00	5998,00	5995,50
	B	205,00	209,00	207,00	1243,00	1221,00	1232,00			
	A	<b>189,00</b>	210,00	199,50	1244,00	1235,00	1239,50	<b>5979,00</b>	6000,00	5989,50
	B	207,00	207,00	207,00	1236,00	1220,00	1228,00			
LA 3	A	202,00	208,00	205,00	1239,00	1229,00	1234,00	5990,00	5995,00	5992,50
	B	205,00	205,00	205,00	1240,00	1234,00	1237,00			
	A	209,00	204,00	206,50	818,00	801,00	809,50	<b>5982,00</b>	5992,00	5987,00
	B	204,00	200,00	202,00	1246,00	1224,00	1235,00			
LA 4	A	211,00	201,00	206,00	1230,00	1220,00	1225,00	<b>5980,00</b>	5990,00	5985,00
	B	202,00	201,00	201,50	1240,00	1230,00	1235,00			
	A	200,00	200,00	200,00	1242,00	1229,00	1235,50	<b>5979,00</b>	5987,00	5983,00
	B	201,00	200,00	200,50	1239,00	1231,00	1235,00			
LA 5	A	*	<b>215,00</b>	21,50	835,00	750,00	792,50	<b>5984,00</b>	5988,00	5986,00
	B	210,00	*	21,00	840,00	750,00	795,00			
	A	210,00	205,00	207,50	1245,00	1230,00	1237,50	<b>5970,00</b>	<b>5982,00</b>	5976,00
	B	205,00	200,00	202,50	1245,00	1235,00	1240,00			
LA 6	A	204,00	*	20,40	795,00	777,00	786,00	5990,00	<b>5981,00</b>	5985,50
	B	*	205,00	20,50	757,00	745,00	751,00			
	A	201,00	200,00	200,50	1241,00	1230,00	1235,50	6001,00	5991,00	5996,00
	B	205,00	201,00	203,00	1236,00	1222,00	1229,00			

**Fonte: O AUTOR.**

Nota-se que apenas uma laje apresentou desvio superior aos limites estabelecidos em sua altura, porém dos 2 valores coletados de altura para esse modelo, apenas um valor de altura referente ao modelo 5 apresentou desvio.

Em relação ao comprimento das lajes, todos os modelos apresentaram pelo menos uma laje com desvio superior aos limites.

### **3.6.8.2 Cobrimento das cordoalhas**

O cobrimento das cordoalhas foi analisado por meio das recomendações contidas na ANBT NBR 6118:2014. Para lajes de concreto protendido a norma sugere um cobrimento de 25 a 50 mm, dependendo da classe de agressividade do ambiente, conforme a Tabela vii do Anexo 7.

Para este trabalho será analisado o cobrimento segundo a classe de agressividade II, por se tratar do caso mais comum. Para essa situação o cobrimento recomendado é de 30 mm com uma variação de até 10 mm, portanto de no mínimo 20 mm.

A Tabela 3.53 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.53: Valores de cobrimento e posição das cordoalhas.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
LA 1	Ce	38,00	43,00	39,00	40,00	46,00	44,00	47,00	42,00
	Cd	35,00	37,00	39,00	37,00	34,00	34,00	35,00	31,00
	Cinf	25,00	25,00	25,00	23,00	23,00	25,00	24,00	24,00
	Ce	34,00	33,00	34,00	34,00	40,00	39,00	38,00	36,00
	Cd	45,00	47,00	46,00	46,00	43,00	42,00	49,00	41,00
	Cinf	25,00	28,00	25,00	24,00	23,00	23,00	23,00	23,00
LA 2	Ce	42,00	49,00	43,00	43,00	45,00	46,00	50,00	45,00
	Cd	37,00	38,00	39,00	40,00	31,00	35,00	34,00	30,00
	Cinf	22,00	24,00	24,00	23,00	23,00	25,00	28,00	27,00
	Ce	35,00	44,00	40,00	42,00	42,00	41,00	41,00	42,00
	Cd	31,00	36,00	37,00	40,00	32,00	31,00	31,00	27,00
	Cinf	32,00	30,00	30,00	27,00	27,00	29,00	28,00	28,00
LA 3	Ce	29,00	34,00	33,00	32,00	40,00	37,00	36,00	34,00
	Cd	43,00	46,00	44,00	45,00	42,00	39,00	43,00	36,00
	Cinf	28,00	28,00	28,00	25,00	26,00	28,00	21,00	29,00
	Ce	30,00	34,00	35,00	*	*	41,00	38,00	35,00
	Cd	44,00	47,00	32,00	*	*	40,00	47,00	38,00
	Cinf	27,00	27,00	26,00	*	*	25,00	24,00	23,00
LA 4	Ce	26,00	33,00	33,00	30,00	38,00	27,00	33,00	37,00
	Cd	43,00	47,00	47,00	46,00	45,00	45,00	40,00	37,00
	Cinf	30,00	30,00	29,00	27,00	29,00	27,00	27,00	27,00
	Ce	41,00	25,00	43,00	*	*	49,00	48,00	46,00
	Cd	30,00	35,00	36,00	*	*	33,00	30,00	30,00
	Cinf	29,00	28,00	32,00	*	*	28,00	31,00	30,00
LA 5	Ce	37,00	33,00	32,00	29,00	38,00	*	*	*
	Cd	45,00	49,00	46,00	48,00	42,00	*	*	*
	Cinf	33,00	31,00	30,00	28,00	29,00	*	*	*
	Ce	*	*	*	46,00	49,00	49,00	49,00	47,00
	Cd	*	*	*	40,00	32,00	34,00	36,00	31,00
	Cinf	*	*	*	26,00	27,00	28,00	28,00	29,00
LA 6	Ce	27,00	31,00	30,00	28,00	38,00	*	*	*
	Cd	44,00	49,00	47,00	47,00	45,00	*	*	*
	Cinf	30,00	32,00	29,00	26,00	27,00	*	*	*
	Ce	*	*	*	46,00	47,00	48,00	48,00	44,00
	Cd	*	*	*	39,00	30,00	34,00	34,00	26,00
	Cinf	*	*	*	26,00	26,00	30,00	30,00	29,00

Fonte: O AUTOR.

Nota-se que nenhuma laje apresentou desvio superior aos limites estabelecidos por norma.

### 3.6.8.3 Espessura das nervuras

A espessura das nervuras foi analisada por meio das recomendações contidas na ANBT NBR 6118:2014. A norma sugere um limite de -10 mm e 15 mm, conforme a Tabela v do Anexo 6.

Segundo o projeto de fabricação das lajes, as nervuras internas devem ter espessura de 37,5 mm e as externas de 42,5 mm.

A Tabela 3.54 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.54: Valores da espessura das nervuras internas e externas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Nervura							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
LA 1	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	35,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	43,00	*
LA 2	b <sub>ext</sub>	42,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	37,00	41,00	39,00	42,00	*
	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	43,00	39,00	41,00	37,00	43,00	41,00	*
LA 3	b <sub>ext</sub>	37,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	40,00	37,00	42,00	40,00	*
	b <sub>ext</sub>	41,00	*	*	*	*	*	*	37,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	42,00	37,00	40,00	39,00	41,00	*
LA 4	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	43,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	38,00	38,00	40,00	39,00	*
	b <sub>ext</sub>	40,00	*	*	*	*	*	*	43,00
	b <sub>int</sub>	*	41,00	39,00	41,00	39,00	42,00	42,00	*
LA 5	b <sub>ext</sub>	38,00	*	*	*	*	*	*	42,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	39,00	41,00	38,00	43,00	41,00	*
	b <sub>ext</sub>	43,00	*	*	*	*	*	*	40,00
	b <sub>int</sub>	*	40,00	43,00	38,00	41,00	40,00	42,00	*
LA 6	b <sub>ext</sub>	44,00	*	*	*	*	*	*	38,00
	b <sub>int</sub>	*	42,00	44,00	39,00	42,00	45,00	45,00	*
	b <sub>ext</sub>	39,00	*	*	*	*	*	*	44,00
	b <sub>int</sub>	*	46,00	43,00	42,00	38,00	45,00	42,00	*

Fonte: O AUTOR.

Nota-se que nenhuma laje apresentou desvio superior aos limites estabelecidos por norma.

#### 3.6.8.4 Contra flecha

A contra flecha foi analisada por meio das recomendações contidas na ANBT NBR 6118:2014. A norma sugere um valor máximo de contra flecha de  $\pm L/350$ , conforme a Tabela viii do Anexo 8.

Para os elementos ensaiados, com 6000 mm de comprimento, a contra flecha deve possuir uma variação de  $\pm 17,14$  mm.

A Tabela 3.55 destaca os valores que apresentaram desvios superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 3.55: Valores da contra-flecha das lajes.**

Contra-flecha [mm]	Laje					
	LA 1	LA 2	LA 3	LA 4	LA 5	LA 6
	15,00	20,00	17,00	19,00	20,00	25,00

**Fonte: O AUTOR.**

Nota-se que apenas as lajes 1 e 3 apresentaram contra flecha dentro dos limites estabelecidos por norma.

#### 3.6.8.5 Análise do escorregamento das cordoalhas das lajes do Programa Experimental 2

A análise do escorregamento das cordoalhas seguiu a metodologia exposta no item 3.5.9.5, segundo recomendações da ABNT NBR 14861:2011.

O valor do escorregamento deve respeitar um limite recomendado pela ABNT NBR 14861:2011 e é calculado segundo a Equação (3.1).

A Tabela 3.56 apresenta os valores dos escorregamentos inicial ( $A_i$ ) e final ( $A_f$ ) das cordoalhas para cada laje ensaiada e destaca os dados que apresentaram desvio em relação aos limites estabelecidos por norma.

**Tabela 3.56: Valores do escorregamento das cordoalhas das lajes.**

Laje	Unidade [mm]	Cordoalha							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Ai	0,11	0,59	0,52	0,45	1,09	0,49	0,17	0,18
	Af	3,08	3,31	3,30	2,96	3,26	2,42	2,05	2,23
	Ai	0,38	0,19	0,50	0,57	0,30	0,43	0,15	0,24
	Af	3,11	3,10	3,57	3,78	3,69	3,81	3,21	3,51
2	Ai	0,84	0,67	0,49	0,15	1,10	0,28	0,58	0,30
	Af	4,00	4,59	4,04	4,30	4,58	3,42	3,86	3,57
	Ai	0,21	0,06	1,32	*	*	0,09	0,99	0,15
	Af	4,45	3,83	4,97	*	*	2,94	3,39	3,41
3	Ai	*	*	*	0,60	1,54	1,30	0,41	0,96
	Af	*	*	*	3,62	4,34	3,61	3,54	4,10
	Ai	0,90	0,51	1,16	1,04	0,51	*	*	*
	Af	3,42	2,30	3,62	4,10	4,59	*	*	*
4	Ai	*	*	*	0,77	0,22	0,40	0,92	0,45
	Af	*	*	*	4,66	4,65	4,95	6,05	7,26
	Ai	0,58	0,68	0,54	0,32	0,40	*	*	*
	Af	4,37	4,23	4,13	3,87	3,75	*	*	*
5	Ai	0,39	0,50	0,66	0,77	1,33	0,60	0,39	0,53
	Af	3,55	3,37	2,42	3,04	2,90	3,30	1,52	3,07
	Ai	0,65	0,77	0,45	*	*	0,45	0,42	1,21
	Af	2,76	2,86	1,56	*	*	1,86	2,36	2,54
6	Ai	0,90	0,63	0,66	1,54	0,59	1,02	0,83	0,81
	Af	4,39	4,37	4,89	5,20	4,36	3,44	4,85	4,38
	Ai	0,85	0,38	0,85	0,82	0,64	0,75	0,67	1,12
	Af	5,20	5,23	5,39	5,67	5,78	5,39	5,56	5,25

Fonte: O AUTOR.

Nota-se que apenas os moldeos 2, 4 e 6 apresentaram escorregamento final superior ao limite estabelecido por norma.

### 3.6.8.6 Valores experimentais

A seguir serão expostos os valores experimentais de resistência ao esforço cortante, calculados de maneira análoga as lajes simples, utilizando programa computacional FTOOL. Os valores dos esforços cortantes são apresentados por meio da Tabela 3.57.

**Tabela 3.57: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.**

Laje	Carregamento [kN]	Área da abertura [m <sup>2</sup> ]	Área total [m <sup>2</sup> ]	Peso Próprio [kN/m <sup>2</sup> ]	Peso laje [kN]	q [kN/m]	Distancia de Aplicação da Carga [m]	V <sub>exp</sub> [kN]
LA 1	300,70	0,00	14,88	4,42	65,77	10,24	0,62	306,40
LA 2	355,80	0,00	14,88	4,42	65,77	10,24	0,62	355,00
LA 3	282,70	0,16	14,72	4,42	65,06	10,12	0,62	289,50
LA 4	263,40	0,16	14,72	4,42	65,06	10,12	0,62	271,50
LA 5	154,20	0,32	14,56	4,42	64,36	10,01	0,62	171,40
LA 6	151,10	0,32	14,56	4,42	64,36	10,01	0,62	168,50

Fonte: O AUTOR.

### 3.6.8.7 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011

A metodologia de cálculo da resistência ao esforço cortante contida na norma técnica nacional ABNT NBR 14861:2011 não prevê aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares, desse modo, apenas para as Lajes 1 e 2 foi possível aplicar as equações contidas na norma. A Laje 2 será tomada como referência em virtude de problemas de aderência entre capa e laje apresentados pela Laje 1

O procedimento de cálculo consiste em determinar a resistência ao esforço cortante de uma unidade de laje que possua capa estrutural e chave de cisalhamento. Para o pano de laje, adiciona-se ao o valor de resistência ao esforço cortante encontrado a resistência ao esforço cortante dos demais conjuntos (lajes + chave + capa) que compõem o pano de laje.

A seguir são expostos os valores de cálculo da resistência à força cortante que foram calculados em três etapas. Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, aqueles usados pelos projetistas no ato da concepção estrutural, como resistência à compressão concreto, módulo de elasticidade do concreto e resistência a tração do concreto, além de resistência a tração do aço. Esse valor é apresentado na Tabela 3.58 e recebe o nome de Valor de Projeto (VRd).

**Tabela 3.58: Valor de Projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica a compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração de projeto do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,01	Área total de aço
$P$ [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,40	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,24	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	146,02	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	107,74	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>253,76</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

O mesmo cálculo exposto anteriormente, contudo sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.59 e recebe o nome de Valor de cálculo ( $V_R$ ).

**Tabela 3.59: Valor de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,01	Área total de aço
$P$ [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,40	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,24	Altura util
$\bar{\sigma}_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	146,02	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	107,74	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>312,16</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor Teórico Característico ( $V_k$ ), mostrado na Tabela 3.60.

**Tabela 3.60: Valor Teórico Característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	40,80	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,43	Resistência característica à tração do concreto
$E$ [Mpa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,01	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,01	Área total de aço
$P$ [kN]	665,60	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,40	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,20	Altura da laje
$d$ [m]	0,24	Altura util
$\bar{\sigma}_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1664,00	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	181,48	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	107,86	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_k</math> [kN]</b>	<b>289,34</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

Fonte: O AUTOR.

A Tabela 3.61 apresenta a comparação entre o Valor de Projeto, Valor de Cálculo, Valor Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante da Laje 2 (referência).

**Tabela 3.61: Comparativo das Resistência ao esforço cortante da Laje 2.**

V [kN]	Resistência ao esforço cortante
253,76	Valor de Projeto
312,16	Valor de Cálculo
289,34	Valor Teórico Característico
355,00	Experimental

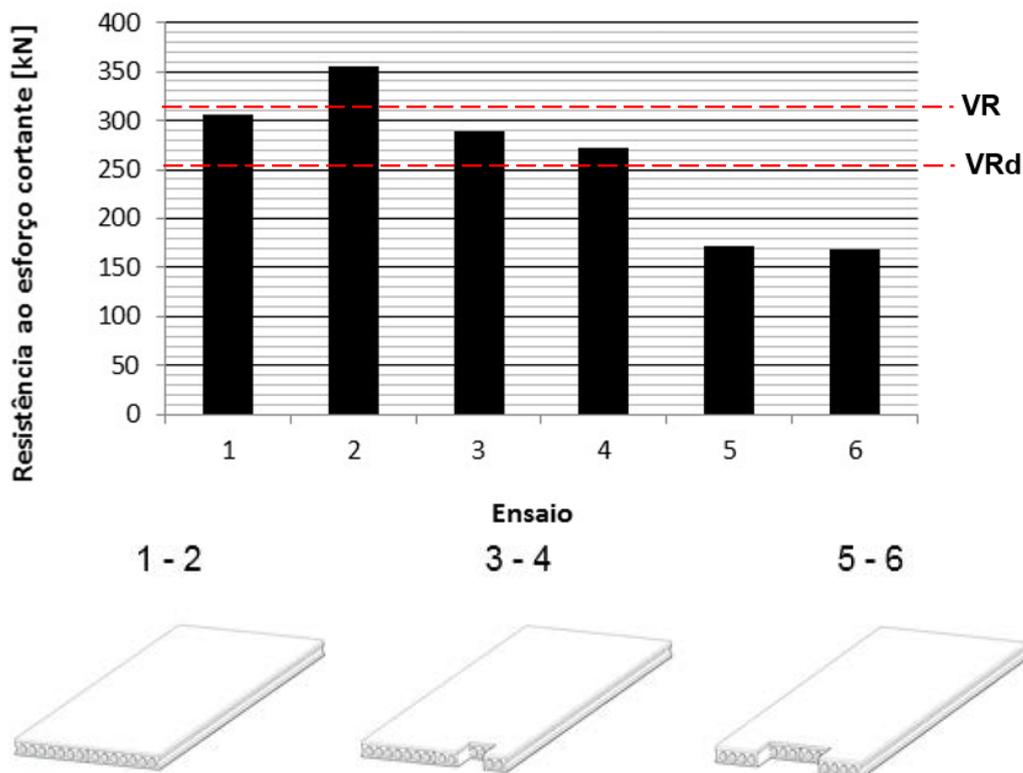
Fonte: O AUTOR.

Para o ensaio da Laje 2 (referência), é possível observar que os dados dos ensaios convergem a valores a favor da segurança, conforme a Tabela 3.61.

### 3.6.8.8 Comparação entre valores experimentais

A Figura 3.111 mostra os valores experimentais de resistência ao esforço cortante.

**Figura 3.111: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.**



Fonte: O AUTOR.

Além dos valores experimentais de resistência ao esforço cortante, a Figura 3.111 apresenta o Valor de Projeto ( $V_{Rd}$ ) e O Valor de Cálculo ( $V_R$ ) da Laje 2 (referência), sendo possível identificar os ensaios que obtiveram valores de resistência ao esforço cortante inferior aos dados de projeto e de cálculo da laje referência.

A Tabela 3.62 compara os valores de resistência ao esforço cortante obtidos por meio dos ensaios das lajes com aberturas com a laje de referência (Laje 2).

**Tabela 3.62: Comparação entre dos valores de resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas e a laje de referência.**

Laje	1	2	3	4	5	6
$V_{EXP}$ [kN]	306,40	<b>355,00</b>	289,50	271,50	171,40	168,50
$V_{EXP}/V_{EXP2}$	0,86	<b>1,00</b>	0,82	0,76	0,48	0,47

**Fonte: O AUTOR.**

Na Tabela 3.62 o valor  $V_{EXP 2}$  é referente à resistência ao esforço cortante da laje 2, tomada como referência. A partir da relação  $V_{EXP}/V_{EXP2}$ , é possível observar a perda de capacidade de resistência ao esforço cortante das lajes com aberturas.

### **3.6.8.9 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada a panos de lajes com uma abertura frontal**

O item 3.6.8.7 apresenta os valores da resistência ao esforço cortante de lajes duplas com chave de cisalhamento e capeamento estrutural obtidos por meio das equações contidas na norma técnica nacional ABNT NBR 14861:2011.

O procedimento de cálculo consiste em determinar a resistência ao esforço cortante de um pano de laje formado por duas lajes (uma laje integra + uma laje com abertura central de 400x400mm – Modelos 3 e 4 de ensaio), que possuam capa estrutural e chave de cisalhamento, contudo, o mesmo não prevê aberturas nas lajes alveolares.

Neste item, assim como desenvolvido no Programa Experimental 1, é proposta uma adaptação da formulação existente para o caso estudado nesta pesquisa de panos de laje com uma abertura frontal, para isso, os valores do

somatório das nervuras ( $\Sigma b_w$ ), a força de protensão (P) em função do tipo e número de cordoalhas, e a área de concreto ( $A_c$ ), foram modificados com o objetivo de aproximar a equação existente aos modelos estudados.

Analogamente ao exposto no item 3.6.8.7, os valores da resistência à força cortante foram calculados em três etapas para os casos de aberturas simples.

Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, aqueles usados pelos projetistas no ato da concepção estrutural, como resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência a tração do concreto, além de resistência a tração do aço, e fazendo uso dos coeficientes de segurança (que minoram a resistência dos materiais). Esse valor é apresentado na Tabela 3.63 e recebe o nome de Valor adaptado de projeto ( $V_{Rda}$ ).

**Tabela 3.63: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência à tração de projeto do concreto
E [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,0038	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0009	Área total de aço
P [kN]	1164,80	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,24	Área da seção transversal de concreto
$\Sigma b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,25	Altura da laje
d [m]	0,2375	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	136,14	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	100,06	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
$V_{Rd}$ [kN]	<b>236,21</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

O cálculo similar ao apresentado anteriormente, porém desenvolvido sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.64 e recebe o nome de Valor adaptado de cálculo ( $V_{Ra}$ ).

**Tabela 3.64: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência a tração do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,0038	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0009	Área total de aço
$P$ [kN]	1164,80	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,24	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,25	Altura da laje
$d$ [m]	0,2375	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	190,60	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	100,06	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>290,66</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor adaptado teórico característico ( $V_{ka}$ ), mostrado na Tabela 3.65.

**Tabela 3.65: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	40,80	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,43	Resistência característica à tração do concreto
$E$ [MPa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,00	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00	Área total de aço
$P$ [kN]	1164,80	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,24	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,62	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,25	Altura da laje
$d$ [m]	0,24	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	162,65	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	87,85	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_k</math> [kN]</b>	<b>250,50</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

A Tabela 3.66 apresenta a comparação entre o Valor adaptado de Projeto, Valor adaptado de Cálculo, Valor adaptado Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante de panos de laje com uma abertura frontal.

**Tabela 3.66: Comparativo das resistências ao esforço cortante de panos de laje com uma abertura frontal.**

<b>V [kN]</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>
236,21	Valor de Projeto
290,66	Valor de Cálculo
250,50	Valor Teórico Característico
289,50	Experimental
271,00	Experimental

**Fonte: O AUTOR.**

Para os ensaios dos panos de laje com uma abertura frontal, ao se adaptar a formulação existente, observa-se que os dados dos ensaios (Valores Experimentais) são a favor da segurança, pois são superiores ao Valor adaptado de Projeto. Por outro lado, o Valor adaptado de Cálculo (aquele que não faz uso dos coeficientes de segurança) foi superior aos Experimentais, demonstrando a necessidade do uso destes coeficientes ao se adaptar a formulação à essa condição específica de abertura em panos de laje. Portanto, a adaptação realizada na formulação para o caso em estudo demonstra coerência para o Valor de Projeto.

#### **3.6.8.10 Valores obtidos a partir da formulação da ABNT NBR 14861:2011 adaptada a panos de laje com duas aberturas laterais**

Assim como apresentado no item 3.6.8.9, neste item também é proposta uma adaptação da formulação existente para o caso estudado nesta pesquisa de panos de laje com duas aberturas frontais, para isso, os valores do somatório das nervuras ( $\Sigma b_w$ ), a força de protensão ( $P$ ) em função do tipo e número de cordoalhas, e a área de concreto ( $A_c$ ), foram modificados com o objetivo de aproximar a equação existente aos modelos estudados.

O procedimento de cálculo consiste em determinar a resistência ao esforço cortante de um pano de laje formado por duas lajes (duas lajes com

aberturas laterais de 400x400mm – Modelos 5 e 6 de ensaio), que possuam capa estrutural e chave de cisalhamento, contudo, o mesmo não prevê aberturas nas lajes alveolares.

Analogamente ao exposto no item 3.6.8.7, os valores da resistência à força cortante foram calculados em três etapas para os casos de aberturas duplas.

Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, aqueles usados pelos projetistas no ato da concepção estrutural, como resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência a tração do concreto, além de resistência a tração do aço, e fazendo uso dos coeficientes de segurança (que minoram a resistência dos materiais). Esse valor é apresentado na Tabela 3.67 e recebe o nome de Valor adaptado de projeto ( $V_{Rda}$ ).

**Tabela 3.67: Valor adaptado de projeto da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	50,00	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência à tração de projeto do concreto
$E$ [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,0045	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0009	Área total de aço
$P$ [kN]	832,00	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,20	Área da seção transversal de concreto
$\sum b_w$ [m]	0,38	Somatório das nervuras internas e externas da laje
$h$ [m]	0,25	Altura da laje
$d$ [m]	0,2375	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	100,05	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	56,26	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_{Rd}</math> [kN]</b>	<b>156,30</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

O cálculo similar ao apresentado anteriormente, porém desenvolvido sem os coeficientes de segurança, é apresentado na Tabela 3.68 e recebe o nome de Valor adaptado de cálculo ( $V_{Ra}$ ).

**Tabela 3.68: Valor adaptado de cálculo da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_c$ [Mpa]	50,00	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,04	Resistência à tração do concreto
E [Mpa]	39597,98	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,0100	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0009	Área total de aço
P [kN]	1164,80	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,20	Área da seção transversal de concreto
$\Sigma b_w$ [m]	0,38	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,25	Altura da laje
d [m]	0,2375	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	138,08	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	56,26	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_R</math> [kN]</b>	<b>194,33</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

Posteriormente calculou-se o valor da resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais, aquelas obtidas por meio de ensaios de caracterização e por meio das formulações de norma. A esse foi dado o nome de Valor adaptado teórico característico ( $V_{ka}$ ), mostrado na Tabela 3.69.

**Tabela 3.69: Valor adaptado teórico característico da resistência ao esforço cortante.**

Variável	Valor	Legenda
$f_{ck}$ [Mpa]	40,80	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$ [Mpa]	2,43	Resistência característica à tração do concreto
E [MPa]	30075,00	Módulo de elasticidade do concreto
$d_{alv}$ [m]	0,13	Diâmetro dos alvéolos
$\rho$	0,0100	Taxa de armadura
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,0009	Área total de aço
P [kN]	1164,80	Força de protensão após as perdas
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,20	Área da seção transversal de concreto
$\Sigma b_w$ [m]	0,38	Somatório das nervuras internas e externas da laje
h [m]	0,25	Altura da laje
d [m]	0,24	Altura útil
$\sigma_{cp}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4883,35	Tensão de compressão
$V_c$ [kN]	122,54	Parcela do concreto na resistência ao esforço cortante
$V_p$ [kN]	42,34	Parcela da protensão na resistência ao esforço cortante
<b><math>V_K</math> [kN]</b>	<b>164,88</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>

**Fonte: O AUTOR.**

A Tabela 3.70 apresenta a comparação entre o Valor adaptado de Projeto, Valor adaptado de Cálculo, Valor adaptado Teórico Característico e Valor Experimental da resistência ao esforço cortante das lajes com abertura lateral.

**Tabela 3.70: Comparativo das resistências ao esforço cortante das lajes com abertura lateral.**

<b>V [kN]</b>	<b>Resistência ao esforço cortante</b>
156,30	Valor de Projeto
194,33	Valor de Cálculo
164,88	Valor Teórico Característico
171,40	Experimental
168,50	Experimental

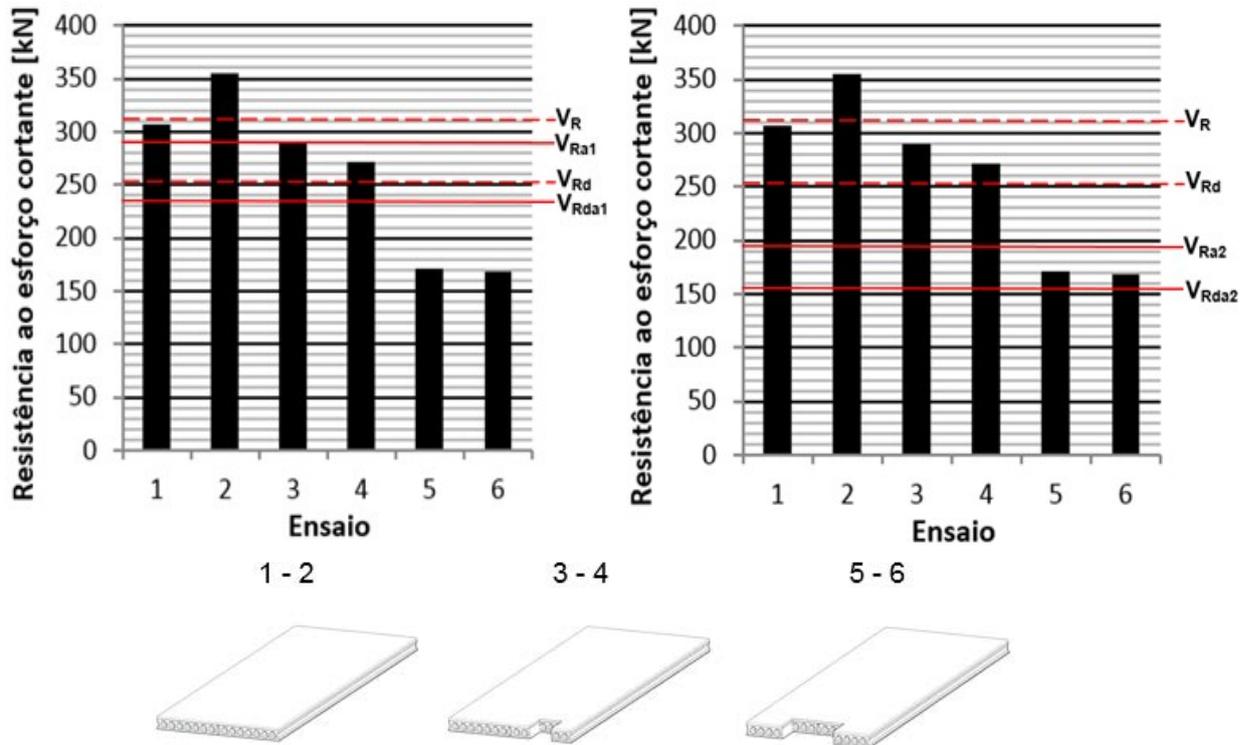
**Fonte: O AUTOR.**

Para os ensaios dos panos de laje com duas aberturas frontais, ao se adaptar a formulação existente, observa-se que os dados dos ensaios (Valores Experimentais) são a favor da segurança, pois são superiores ao Valor adaptado de Projeto. Por outro lado, o Valor adaptado de Cálculo (aquele que não faz uso dos coeficientes de segurança) foi superior aos Experimentais, demonstrando a necessidade do uso destes coeficientes ao se adaptar a formulação à essa condição específica de abertura em panos de laje. Portanto, a adaptação realizada na formulação para o caso em estudo demonstra coerência para o Valor de Projeto.

#### **3.6.8.11 Comparação entre valores experimentais, valores adaptados e valores segundo a ABNT NBR 14861:2011 para panos de laje com aberturas**

A Figura 3.112 apresenta os valores experimentais de resistência ao esforço cortante dos panos de laje onde os Valores de Projeto e Valores de Cálculo adaptados e segundo a ABNT NBR 14861:2011 são destacados por meio das linhas horizontais contínuas e tracejadas respectivamente.

Figura 3.112: Valores experimentais, valores adaptados e valores de norma da resistência ao esforço cortante.



Fonte: O AUTOR.

Sendo:

$V_R$  = Valor de Cálculo;

$V_{Rd}$  = Valor de Projeto;

$V_{Ra1}$  = Valor adaptado de Cálculo para panos de laje com uma abertura frontal;

$V_{Rda1}$  = Valor adaptado de Projeto para panos de laje com uma abertura frontal;

$V_{Ra2}$  = Valor adaptado de Cálculo para panos de laje com duas aberturas frontais;

$V_{Rda2}$  = Valor adaptado de Projeto para panos de laje com duas aberturas frontais.

Para ambos os casos de aberturas em panos de laje, observa-se a adaptação da formulação aos casos específicos em estudo, conduz a Valores de Projeto inferiores aos Valores Experimentais, portanto, a adaptação realizada

na formulação para os modelos propostos demonstra coerência e está a favor da segurança.

### **3.6.9 Conclusões preliminares do Programa Experimental 2**

O principal objetivo da segunda etapa experimental desta pesquisa foi avaliar a influência de aberturas em lajes alveolares por meio de modelos que visam reproduzir um pano de laje.

Ao todo, seis modelos compostos por duas lajes dispostas lado a lado com uso de chave de cisalhamento e capeamento estrutural foram ensaiados. Desses modelos dois não possuíam aberturas, e foram tomados como referência. Dois modelos possuíam abertura em uma das lajes, com dimensão de 400 x 400 mm, e por fim dois modelos com abertura em ambas as lajes, foramando um recorte de 400 x 800 mm.

Dos modelos sem aberturas, o primeiro apresentou problemas de aderência entre as lajes e a capa estrutural, o que resultou em uma capacidade de resistência ao esforço cortante inferior ao segundo modelo que não apresentou tal patologia. Por esse motivo o segundo modelo (Laje 2) foi tomado como referência. O modelo 2 apresentou Valor Experimental de resistência ao esforço cortante superior aos Valores de Projeto e de Cálculo, convergindo a valores seguros e validando os modelos para estudo.

Mesmo com o problema apresentado pelo modelo 1, este ainda obteve um Valor Experimental de resistência ao esforço cortante superior ao Valor de Projeto (obtido com base na formulação da ABNT NRB 14861:2011).

Observou-se com os modelos ensaiados que os valores experimentais de resistência à força cortante de lajes com aberturas foram inferiores aos valores medidos nos modelos de referência.

Os testes indicam uma perda de capacidade resistente para lajes com abertura simples (modelos 3 e 4 com aberturas de 400 x 400 mm) de 18,50% a 23,50%, quando comparadas a lajes sem aberturas. Estes modelos apresentaram um Valor Experimental de resistência ao esforço cortante superior ao Valor de Projeto.

Nos testes de lajes com abertura duplas (modelos 5 e 6 com aberturas de 400 x 800 mm) a perda de capacidade resistente foi ainda maior, ficando entre 51,70% e 52,50%, quando comparadas a lajes sem aberturas. Estes modelos

apresentaram um Valor Experimental de resistência ao esforço cortante inferior aos Valores de Projeto e de Cálculo, demonstrando uma condição não segura para seu uso.

Para o caso de panos de laje com aberturas, a adaptação da formulação disponibilizada pela ANBT NBR 14861:2011 demonstrou-se coerente, pois para ambos os casos de abertura, observou-se que a modificação das equações existentes conduz a Valores de Projeto seguros.

Os ensaios propostos para serem realizados mostraram-se coerentes e validam o segundo programa experimental da pesquisa.

## **4 Conclusões**

Neste trabalho foi estudado o comportamento de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas com cortes e aberturas. Foi realizado um extenso programa experimental que procurou atender o objetivo da pesquisa. De acordo com os resultados obtidos, diversas conclusões e observações podem ser realizadas, como mostradas a seguir.

### **4.1 Ensaio de lajes alveolares individuais (Programa experimental 1)**

Pode-se concluir por meio dos ensaios em lajes individuais que ao se executar uma abertura com dimensão de 400 x 400 mm (usualmente adatoada em obras em concreto pré-fabricado) ocorre uma perda de capacidade de resistência ao esforço cortante, sendo o decréscimo de resistência de 30,30% a 33,70% para lajes com abertura central e de 42,70% e 47,60% para abertura lateral, quando comparadas ao modelo de referência. Observa-se que ao mudar a posição da abertura, mesmo que mantidas as dimensões, o comportamento da laje é diferente, não sendo possível desse modo determinar um fator de correção para a formulação existente em casos onde existam aberturas. A proposta desenvolvida, apresentada e que mostrou-se coerente, foi de uma adaptação da formulação existente levando em conta a redução da área de concreto, área de aço, quantidade de nervuras e força de protensão, a fim de aproximar-se da realidade em que o elemento estudado está submetido.

Lajes com aberturas centrais apresentaram Valores Experimentais de resistência ao esforço cortante inferiores ao Valor de Cálculo, contudo superiores ao Valor de Projeto, da resistência ao esforço cortante da laje referência.

As lajes com aberturas laterais apresentaram Valores Experimentais de resistência ao esforço cortante inferiores aos Valores de Cálculo e de Projeto da resistência ao esforço cortante da laje referência.

Nota-se que a execução de cortes oblíquos acarretaram um decréscimo de capacidade de resistência ao esforço cortante que tende a ser mais acentuado conforme se aumenta a área extraída, ou ao se diminuir o ângulo entre a região cortada e a cordoalha.

Quando se varia a maneira de aplicação do carregamento, de paralelo ao apoio a perpendicular ao eixo central da laje, há interferência na resistência ao esforço cortante, sendo os casos de carregamento perpendicular mais severos.

Ao se comparar com a laje de referência, elementos com aplicação de carregamento perpendicular ao eixo da peça, e com corte em um ângulo de 60° em relação as cordoalhas, apresentaram diminuição de até 30,40%. Os elementos sob mesmo tipo de aplicação de carregamento, porém com um ângulo de 45° apresentam até 30,70% de redução, e as lajes com ângulo de corte de 30° tem sua resistência reduzida em até 43,17%.

Ao se mudar a aplicação de carregamento de perpendicular ao eixo da peça para paralelo ao apoio, obteve-se uma perda máxima de resistência ao esforço cortante de até 29,8% (lajes com corte oblíquo em um ângulo de 30° em relação as cordoalhas).

Excluindo-se a laje com corte em um ângulo de 30° com as cordoalhas e aplicação de carregamento perpendicular ao eixo longitudinal da peça, as demais lajes com cortes oblíquos apresentaram valores experimentais acima do Valor de Projeto da laje referência, conduzindo a valores seguros. Em casos como lajes com corte em ângulo de 60° e 45° com aplicação de carregamento paralelo ao apoio, os Valores Experimentais estão até mesmo acima dos Valores de Cálculo (aqueles que não fazem uso dos coeficientes de redução).

Mesmo as lajes com cortes oblíquos apresentando em sua maioria Valores Experimentais acima dos Valores de Projeto, assim como para o caso das lajes com aberturas, é preciso cautela quanto a execução e uso de lajes sob estas circunstâncias, pois a laje tomada como referência apresentou resistência consideravelmente superior ao Valor de Projeto.

#### **4.2 Ensaio de lajes alveolares duplas (Programa experimental 2)**

Assim como observado no Programa experimental 1, com ensaios em lajes individuais, ao se executar a abertura nas lajes, houve perda de resistência ao esforço cortante.

Modelos com abertura em uma de suas lajes (400 x 400 mm) apresentaram perda de até 23,50%, quando comparadas os panos de laje sem aberturas.

Para modelos com abertura dupla (400 x 800 mm) a perda de capacidade resistente foi ainda maior, chegando a 52,50%.

Observa-se que ao aumentar a dimensão da abertura, de 400x400mm para 400x800mm, a perda de resistência ao esforço cortante não é proporcional

ao aumento da abertura, ou seja, o comportamento não é linearmente proporcional e assim como em unidades de laje com aberturas não é possível determinar um fator de correção para a formulação existente em casos onde existam aberturas. A proposta desenvolvida, apresentada e que mostrou-se coerente, foi de uma adaptação da formulação existente levando em conta a redução da área de concreto, área de aço, quantidade de nervuras e força de protensão, a fim de aproximar-se da realidade em que o elemento estudado está submetido.

Os modelos que possuem abertura em apenas uma de suas lajes, apresentaram Valores Experimentais de resistência ao esforço cortante superiores ao Valor de Projeto, contudo inferiores ao Valor de Cálculo, da laje referência.

Para os modelos com abertura dupla, os mesmos apresentaram Valores Experimentais de resistência ao esforço cortante inferiores aos Valores de Projeto e de Cálculo, da laje referência.

#### **4.3 Considerações finais**

A partir da análise dos ensaios à força cortante das lajes e panos de laje desta pesquisa, pode-se concluir que em todos os casos os elementos com aberturas ou cortes oblíquos apresentaram perda de capacidade resistente.

Os ensaios de lajes e panos de laje tomados como referência, apresentaram Valores Experimentais de resistência ao esforço cortante superiores aos Valores de Cálculo e Valores de Projeto (segundo formulação continuada na ABNT NBR 14861:2011) mostrando a convergência das equações normativas a valores seguros.

A execução de aberturas centrais em unidades de laje, e/ou aberturas simples em panos de laje, causou a diminuição da resistência ao esforço cortante em ambos os casos, contudo, os Valores Experimentais encontrados ainda são superiores aos Valores de Projeto obtidos por meio das formulações da norma técnica nacional. Desse modo, mesmo com a perda de resistência e sem nenhuma recomendação normativa sobre o tema, os valores obtidos por meio dos modelos deste estudo, ainda conduzem a uma situação segura.

O mesmo fato pode ser observado com lajes que possuem cortes oblíquos. Todos os casos, exceto lajes com corte em um ângulo de 30° com as

cordoalhas e aplicação de carregamento perpendicular ao eixo longitudinal da peça, apresentam perda de resistência ao esforço cortante, contudo acima do Valor de Projeto, conduzindo a valores seguros ao se analisar os modelos desta pesquisa.

As lajes avaliadas foram produzidas, curadas, armazenadas, transportadas, ensaiadas e analisadas em um ambiente próximo ao da realidade, porém com um melhor controle das etapas. O excedente de resistência observado nas lajes de referência, quando comparadas com os Valores de Projeto e de Cálculo, pode ser decorrente da margem de segurança adotada pela empresa responsável pela produção dos modelos. Em uma situação real o excedente de resistência do modelo pode ser útil em caso de falha de alguma das etapas acima mencionadas, que irá provocar um decréscimo na resistência da laje. Ao adotar uma margem de segurança, evita-se o descarte de elementos em casos em que os mesmos não atendam as especificações mínimas de projeto.

O fato do comportamento das lajes e dos panos de laje com aberturas não ser linear quando avaliados ao esforço cortante, mostra a inviabilidade para os modelos em estudo, da utilização de um fator de correção para a formulação disponível na norma técnica nacional. Por outro lado, a proposta de adaptação das equações normativas com base em dados referentes à situações específicas mostrou-se coerente e provou a necessidade avaliar os elementos sob diferentes configurações.

Desse modo, é possível concluir que a execução de aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares protendida pré-fabricadas gera uma perda significativa na resistência ao esforço cortante, sendo essa perda observada mesmo em lajes trabalhando em conjunto (pano de laje) por intermédio da chave de cisalhamento e do capeamento estrutural, e essa situação deve ser considerada em projeto.

#### **4.4 Sugestões para trabalhos futuros**

Esta pesquisa explorou o tema aberturas e cortes oblíquos em lajes alveolares com altura de 200 mm e comprimento de 6000 mm.

A quantidade de ensaios desenvolvidos foi a suficiente para se provar que ao se executar uma abertura ou um corte em ângulo em lajes que possuam a

tipologia acima descrita, haverá perda da resistência ao esforço cortante, contudo, o universo de possibilidades e variáveis envolvidas neste tipo de sistema estrutural é muito amplo e deve ser explorado.

Sugere-se que lajes com altura superior e inferior também sejam estudadas, inicialmente sob as mesmas condições, com isso será possível estabelecer uma relação entre as aberturas e cortes oblíquos com a altura das lajes e suas respectivas perdas, e mais do que isso, entender se para diferentes alturas o comportamento é similar.

Outro aspecto importante é a quantidade de aberturas. É necessário entender se ha um número limite para a execução de aberturas, no qual não haveria efeito considerável na resistência ao esforço cortante. Alguns fabricantes sugerem que a execução de furos que não atinjam as nervuras das lajes, não causam nenhum efeito nocivo, sendo sua quantidade e localização ao longo da laje livres.

Ainda a respeito das aberturas, mais especificamente sobre sua dimensão, não se sabe ao certo qual a dimensão máxima para a sua execução. Alguns fabricantes, em manuais, limitam a dimensão da abertura, após esse valor sugere-se o uso de lajes de menor comprimento em relação as adjacentes, apoiadas em vigas metálicas. Logo, o estudo da dimensão da abertura é de interesse da comunidade científica e da indústria da construção.

Quanto ao ângulo do corte oblíquo, é necessário que se estude a variação gradual do ângulo, partindo da situação usual (lajes com corte em 90° em relação a cordoalha) e indo a ângulos menores, como executado nesta pesquisa por exemplo (60°). É importante se determinar a relação entre a perda de resistência com a diminuição do ângulo.

Nesta pesquisa, para as lajes com cortes em ângulo, executou-se dois tipos de carregamento, paralelo ao corte ou transversalmente ao eixo longitudinal da laje. A influência do tipo de carregamento foi notável, contudo o número de modelos estudados foi limitado (devido a abrangência da pesquisa), necessitando ser melhor avaliada e compreendida.

A pesquisa contou com lajes produzidas pelo processo de forma deslizante (*slip form*), que possui características e conseqüentemente comportamento distinto em certos aspectos de lajes produzidas por extrusão. A releitura da pesquisa com lajes produzidas por extrusoras é de grande interesse.

Para as lajes duplas desta pesquisa, que possuíam chave de cisalhamento e capeamento estrutural, é importante entender exatamente qual a contribuição da chave e da capa, separadamente. Sugere-se que ensaios de lajes duplas somente com a execução da chave de cisalhamento sejam executados, sob as mesmas condições dos ensaios desta pesquisa. Com isso será possível determinar com clareza a influência de cada elemento executado.

A realização das lajes duplas com as mesmas variações sugeridas acima para aberturas (lajes com diferentes alturas, lajes produzidas por extrusão, e lajes com diferentes dimensões de aberturas) necessitam ser executadas,

Por fim, sugere-se que as lajes unitárias, que foram ensaiadas sem a execução do capeamento estrutural, sejam ensaiadas com a capa estrutural, para o melhor entendimento da influência da capa na resistência ao esforço cortante de lajes com aberturas e cortes oblíquos.

## 5 Referências

- ASOCIACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LAS PLACAS ALVEOLARES (Aidepla) – CORTES, TALADROS Y HUECOS - boletim 8, Madrid España, 2008.
- ANTUNES, C. de F.M., Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória. Dissertação de mestrado, UFG, 2011.
- ARAUJO, C.A.M.; Contribuições para projetos de lajes alveolares protendidas. Florianópolis. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023. Informação e documentação: referências – elaboração. Rio de Janeiro. 2002. 24p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861 Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido – Requisitos. Rio de Janeiro. 2005.
- Comité Européen de Normalisation – CEN. EN1168:2005. Precast concrete products – Hollow core slabs (English version), Brussel: CEN.2005.
- BERGAMI, M.L. (2010). Diretrizes para a gestão da qualidade do processo de projeto em empresas de pré-fabricados baseado na norma NBR ISSO 9001:200. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 132 p., São Carlos, SP, 2010.
- Bernardi, P.; Cerioni, R.; Michelini, E. Numerical study on the structural behaviour of hollow core slabs with small openings, in: Advances in Reinforced Concrete and Precast Constructions, Edited by Marco Di Prisco, 2008, 53-61.
- Bernardi, P.; Cerioni, R.; Garutti, N.; Iori, I.; Michelini, E. Numerical study on structural behavior of HC floors with large openings: short report on research activity. International Conference on Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures - França, 2012;

Bernardi, P.; Cerioni, R.; Iori, I.; Michelini, E. Structural behaviour of hollow core floors with openings: a parametric numerical study, in Proc. 3rd Int. fib Congress, Washington DC (USA), 2010, Full paper on CD Rom (ID 397).

Bernardi P.; Cerioni R.; Garutti N.; Michelini E. A non-linear approach for the analysis of hollow core floors with large openings - Part 1, Concrete Plant International, vol. 2, April 2012, p. 166-171.

Bernardi P.; Cerioni R.; Garutti N.; Michelini E. A non-linear approach for the analysis of hollow core floors with large openings - Part 2, Concrete Plant International, vol. 3, June 2012, p. 144-149.

BISON PRECAST FLOORING SPECIFICATION, 2007.

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](http://www.cpci.ca/?sc=history&pn=prestressedincanada)>. Acesso em 13 de abril de 2014.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION – CSA. Design of Concrete Structures, Standard A23.3-04, (2001).

CARVALHO, R.C.; Concreto Protendido. Notas de Aula. 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R., Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003; - 3.ed. - São Carlos: EdUFSCar, 2007.

CAMILLO, C.A. (2012). Continuidade de painéis de laje alveolar em edifícios. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 152 p., São Carlos, SP, 2010.

CATOIA, B. (2011). Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada de flexão. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 325p, São Carlos, SP, 2011.

COLLINS, M. P.; BENTZ, E.C.; SHERWOOD, E.G.; XIE, L. (2008). An adequate theory for the shear strength of reinforced concrete structures. Magazine of Concrete Research, v.60, n.9, 635-650.

COSTA, O.O. (2010). Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 132 p., São Carlos, SP, 2010.

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.

DUPAS, M. A. Pesquisando e Normalizando: Noções Básicas e Recomendações Úteis para Elaboração de Trabalhos Científicos, EdUFSCar, 2004, 71p. (serieapontamentos).

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/precaster\\_machinery/extruder-1](http://www.precastfountain.com/precaster_machinery/extruder-1)>. Acesso em 13 de abril de 2014.

ELLIOTT, K. S., Precast Concrete Structures. Oxford: Elsevier, 2002.

FEDERATION INTERNATIONALE de la PRÉCONTAINE, FIP. Guide to good practice: quality assurance of Hollow core slabs. London, England. 1992

FERNANDES, N.S. (2007). Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: ensaio padrão de apoio para controle de qualidade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 124 p., São Carlos, SP, 2007.

FRANÇA, A.A.V. (2012). Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 138 p., Curitiba, PR, 2012.

FERREIRA, M. A., Manual de sistemas pré-fabricados de concreto (tradução). Autor do texto original: Arnold Van Acker (FIP-2002). Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto – ABCIC, São Paulo, 2003.

GUIDE OF GOOD PRACTICE – BULLETIN 6 FIB. Special desing considerations for precast prestresses hollow core floors – 174pág. Switzerland, 2000.

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.

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.

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.

Lozano, J.A.O. (2005). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental em la resistencia del hormigón preparado. Tese de doutorado,

Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 501p, España, 2005.

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.

MANSELL, J.; COSTA, M.; ARRUDA, M. E.; BOUVIER, M. Notas de aula da Disciplina Tecnologia da Edificação I, 2010.

MELO, C. (2004). Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreto. Editora PINI, 540 p., Brasil, 2004.

MONES, R. M.; Breña, S. F. (2013). Hollow Core Slabs with cast-in-place concrete toppings: A study of interfacial shear strength. PCI Journal. Summer 2013, pp. 124-141.

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION AUSTRALIA – NPCAA. Hollow Core Flooring – Technical Manual. Australia, 2003.

NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING/NEW ZEALAND CONCRETE SOCIETY/ STRUCTURAL ENGINEERING SOCIETY OF NEW ZEALAND - Seismic Performance of Hollow Core Floor Systems Guidelines for Design Assessment and Retrofit. New Zeland, 2009.

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

PINHEIRO, G.L., FERREIRA, M.A., ALMEIDA FILHO, F. M. e CARVALHO, R.C. Estudo preliminar sobre a influência do preenchimento dos alvéolos na resistência à força cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. 3º PPP, 2013, 10 pág, 2013.

PAJARI, M. (1989). Design of Prestressed Hollow Core Slabs. Technical Research Center of Pinland, Espoo, Finland. Rep. 657.

PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C. D., SANTOS, S. P. ESTRUTURAS DE CONCRETO – CAPÍTULO 2, 2004.

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

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI) Design Handbook 6th edition, Chicago, Illinois 2004.

REVEL, M. La prefabricacion em la construcion .1973.

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.

SERRA, S.M.B. ; FERREIRA, M.de A.; PIGOZZO, B. N., Evolução dos Pré-Fabricados de Concreto. 2010.

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

VASCONCELOS, A. C. O Concreto no Brasil .2002.

WIJESUNDARA, K.K., BOLOGNINI, D., NASCIMBENE R. Shear Strength of Precast Prestressed Concrete Hollow Core Slabs – Pavia, Italy.

YANG, L. (1994). Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to web Shear Failure. ASCE Journal of Structural Engineering. V. 120, September, pp. 2675-2696.

## Anexo 1

Os ensaios de resistência à compressão são realizados por meio da ABNT NBR 5739:2007 Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, que descreve o método de ensaios dos CP's cilíndricos moldados.

O valor da resistência a compressão obtido por ensaios de corpos de prova é dado pela Equação (i).

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (i)$$

Sendo:

$f_{cj}$  - resistência à compressão do corpo de prova em j dias;

$N_{rup}$  - carga de ruptura do corpo de prova;

A - área da seção transversal do corpos de prova.

Ao realizar um dado número de ensaios em corpos de prova de concreto, com o objetivo de se estabelecer a sua resistência à compressão, valores mais ou menos dispersos são obtidos, dependendo do rigor de sua produção e moldagem de CP's.

Para tornar a amostra representativa e fornecer um valor que reflita da melhor maneira possível a realidade da qualidade do concreto considerando sua dispersão, adota-se o conceito de valor característico, que consiste em uma medida onde não somente a resistência média é usada, mas sim um valor médio sob um tratamento estatístico fiel ao desvio apresentado.

A ABNT NBR 6118:2014 define valor característico de resistência ( $f_k$ ) de um certo lote de material, como sendo aquele que possui uma probabilidade de ser ultrapassado, no sentido desfavorável para a segurança, de 5%, ou seja, apresenta 95% de confiabilidade.

A resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) é dada pela Equação (ii).

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \times S \quad (ii)$$

Sendo:

$f_{ck}$  - resistência característica à compressão do concreto

$f_{cm}$  - resistência média à compressão do concreto;

S – desvio padrão.

Onde:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2} \quad \text{(iii)}$$

Sendo:

$\delta$  – coeficiente de variação.

Onde:

$$S = f_{cm} \times \delta \quad \text{(iv)}$$

Sendo:

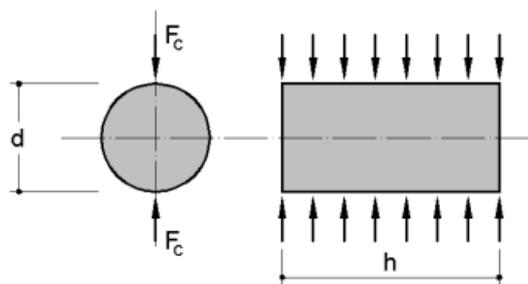
S – desvio padrão.

As principais características usadas no projeto de LAPs são: resistência a tração e módulo de elasticidade do concreto.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a resistência a tração do concreto pode ser obtido por meio de:

- i. resistência a tração indireta ( $f_{ct,sp}$ ) ou ensaio de compressão diametral: ensaio executado de acordo com a ABNT NBR 7222:2011 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Figura i;

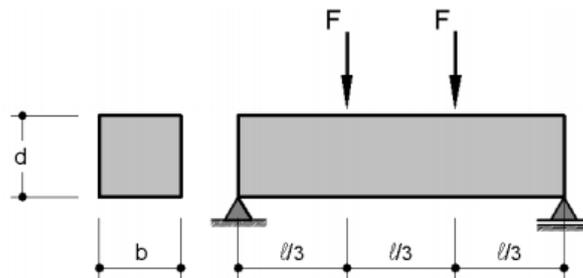
**Figura i: Ensaio de tração por compressão diametral.**



Fonte: PINHEIRO *et al*(2004).

- ii. resistência a tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ) ou ensaio flexão de corpo de prova prismático: ensaio executado de acordo com a ABNT NBR 12142:2010 Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Figura ii.

**Figura ii: Ensaio de resistência a tração na flexão.**



Fonte: PINHEIRO *et al*(2004).

Na ausência de ensaios específicos para a determinação destes parâmetros, a ABNT NBR 6118:2014 permite que sejam utilizadas correlações com valores de resistência a compressão do concreto.

Para concretos de classes até C50, tem-se a resistência média a tração ( $f_{ct,m}$ ) dada pelas Equações (v) e (vi).

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ct,m} \quad (\text{v})$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ct,m} \quad (\text{vi})$$

Sendo:

$f_{ctk,inf}$  - resistência característica inferior à tração do concreto;

$f_{ctk,sup}$  - resistência característica superior à tração do concreto;

$f_{ct,m}$  - resistência média a tração do concreto.

Onde:

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{vii})$$

Sendo:

$f_{ck}$  - resistência característica à compressão do concreto;

$f_{ct,m}$  - resistência média a tração do concreto.

Segundo a ABNT NBR 6118:2104 o módulo de deformação tangente inicial do concreto ( $E_{ci}$ ), ou simplesmente módulo de elasticidade inicial, deve ser determinado de acordo com o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522:2008 Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Sabe-se da Resistência dos Materiais que a relação entre a tensão e deformação possui intervalos lineares, sendo válida a Lei Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (\text{viii})$$

Sendo:

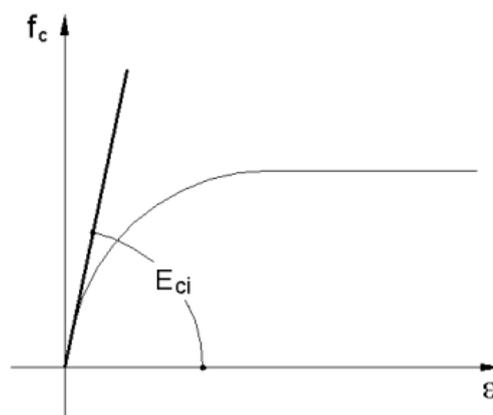
$\sigma$  - tensão;

$\varepsilon$  - deformação específica;

$E$  - módulo de elasticidade.

De forma análoga, para o concreto o Módulo de Elasticidade é obtido a partir da região retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, toma-se a tangente da curva na origem, Figura iii.

**Figura iii: Módulo de deformação tangente inicial  $E_{ci}$ .**



Fonte: PINHEIRO *et al*(2004).

Na ausência de ensaios específicos para a determinação do módulo de elasticidade, a ABNT NBR 6118:2014 permite que sejam utilizadas correlações com valores de resistência a compressão do concreto, conforme a Equação (ix).

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{ix})$$

Sendo:

$E_{ci}$  – módulo de elasticidade;

$\alpha_E$  – coeficiente dependente do tipo de agregado;

$f_{ck}$  – resistência característica a compressão do concreto.

Onde  $\alpha_E$ :

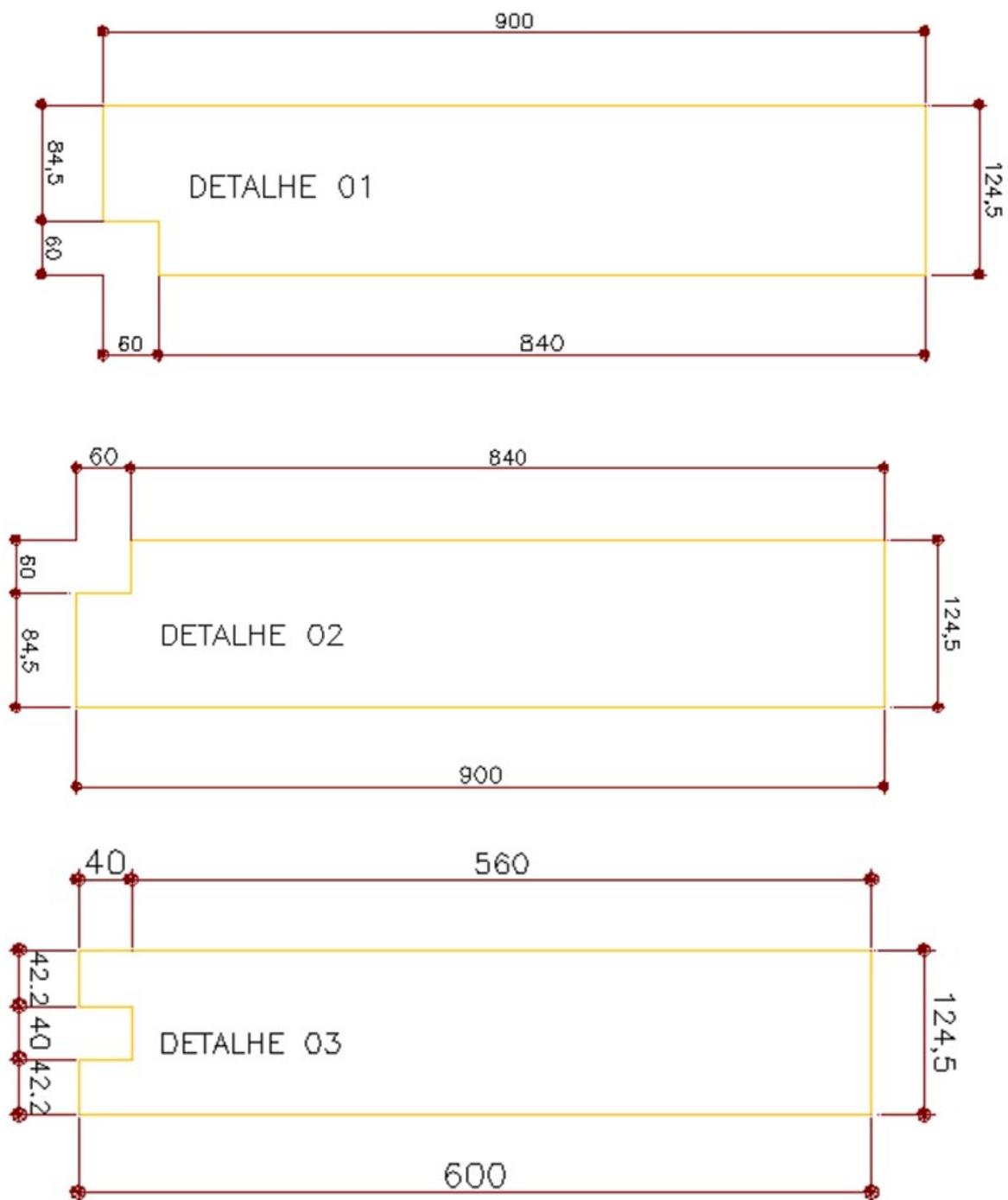
$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaisse;

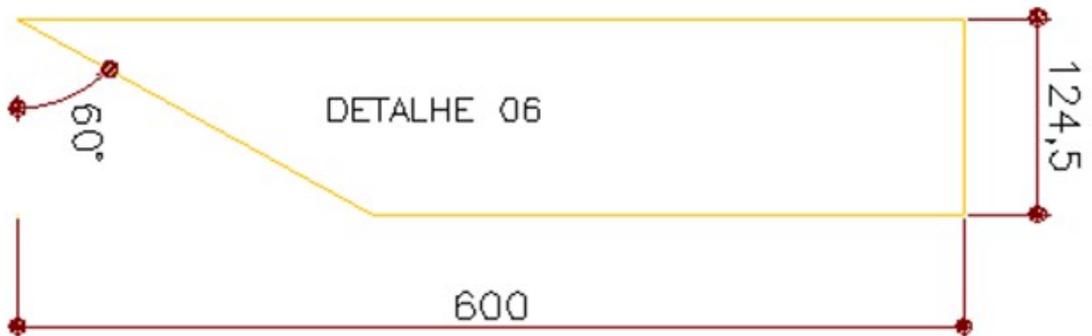
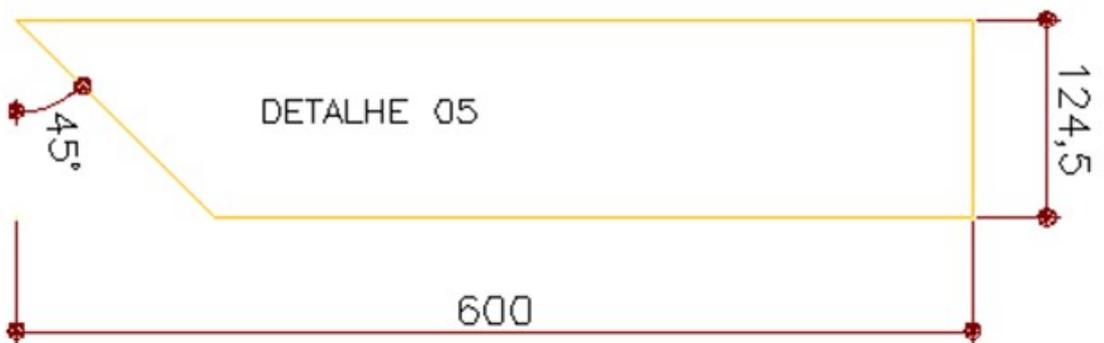
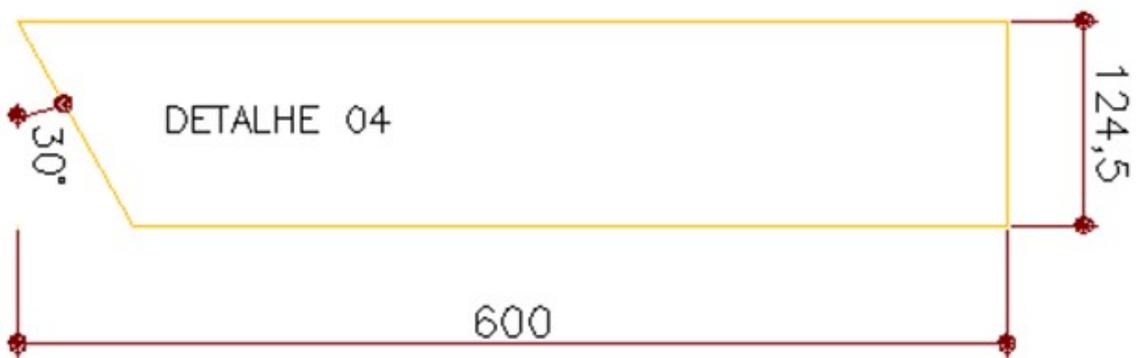
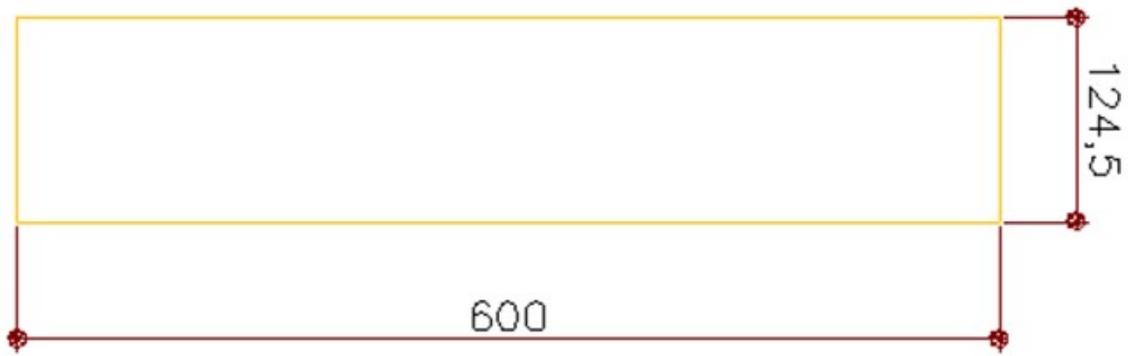
$\alpha_E = 0,9$  para calcário;

$\alpha_E = 0,7$  para arenito.

## Anexo 2

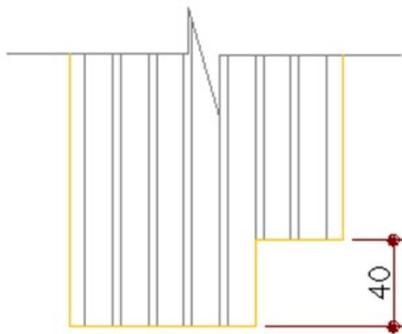


Fonte: O AUTOR.

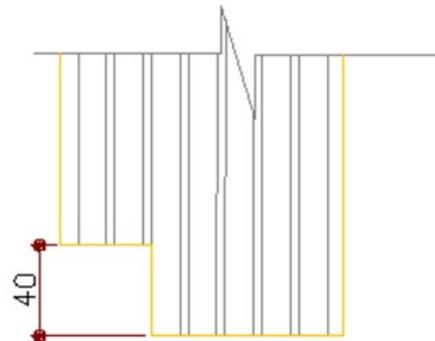


Fonte: O AUTOR.

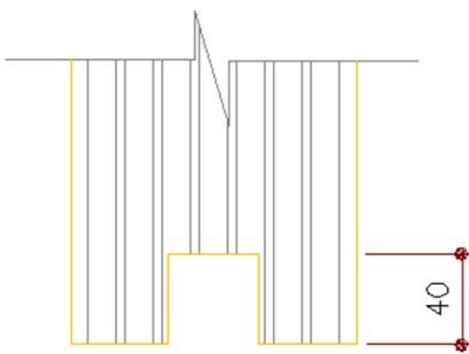
DETALHE 01



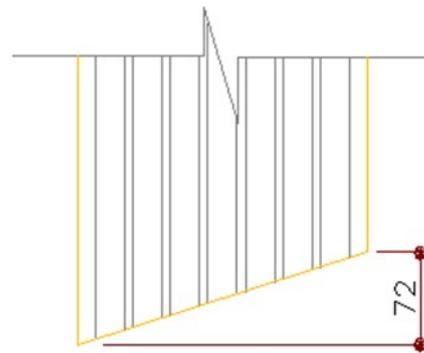
DETALHE 02



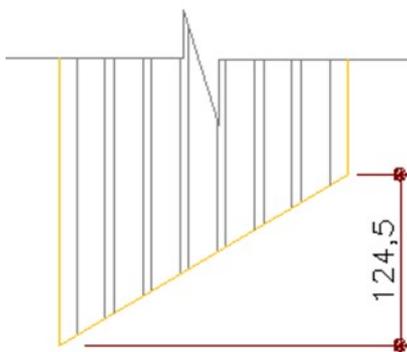
DETALHE 03



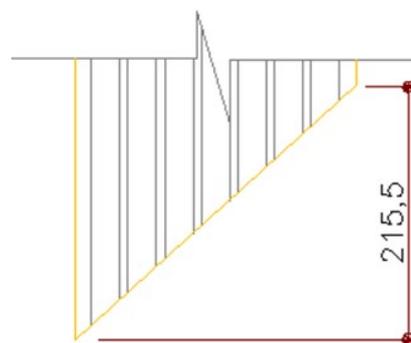
DETALHE 04



DETALHE 05

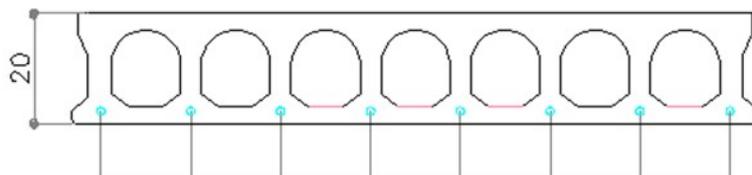


DETALHE 06



Fonte: O AUTOR.

## ARMADURA PARA AS LAJES LP20



8Ø12,7mm  
CP190RB(PROTENSÃO 80%)

Fonte: O AUTOR.

### NOTAS:

Dimensões em centímetros;  
fck do concreto = 35MPa  
fck de desprotensão = 21MPa  
cobrimento mínimo da armadura = 2,5cm  
fator  $a/c < 0,45$

### Recortes:

- LA001 - Detalhe 01
- LA003 - Detalhe 03
- LA004 - Laje inteira

### Obs.:

- Os recortes devem ser executados com o concreto em seu estado fresco, logo após extrusão;
- Ao executar os recortes, não cortar as nervuras do alvéolo;
- Executar os cortes na região das bordas inferiores e superiores do alvéolo;
- Arranhar a superfície da laje para garantir a aderência da capa estrutural.

TAMPAR ALVÉOLOS:  
SIM                      NÃO



Fonte: O AUTOR.

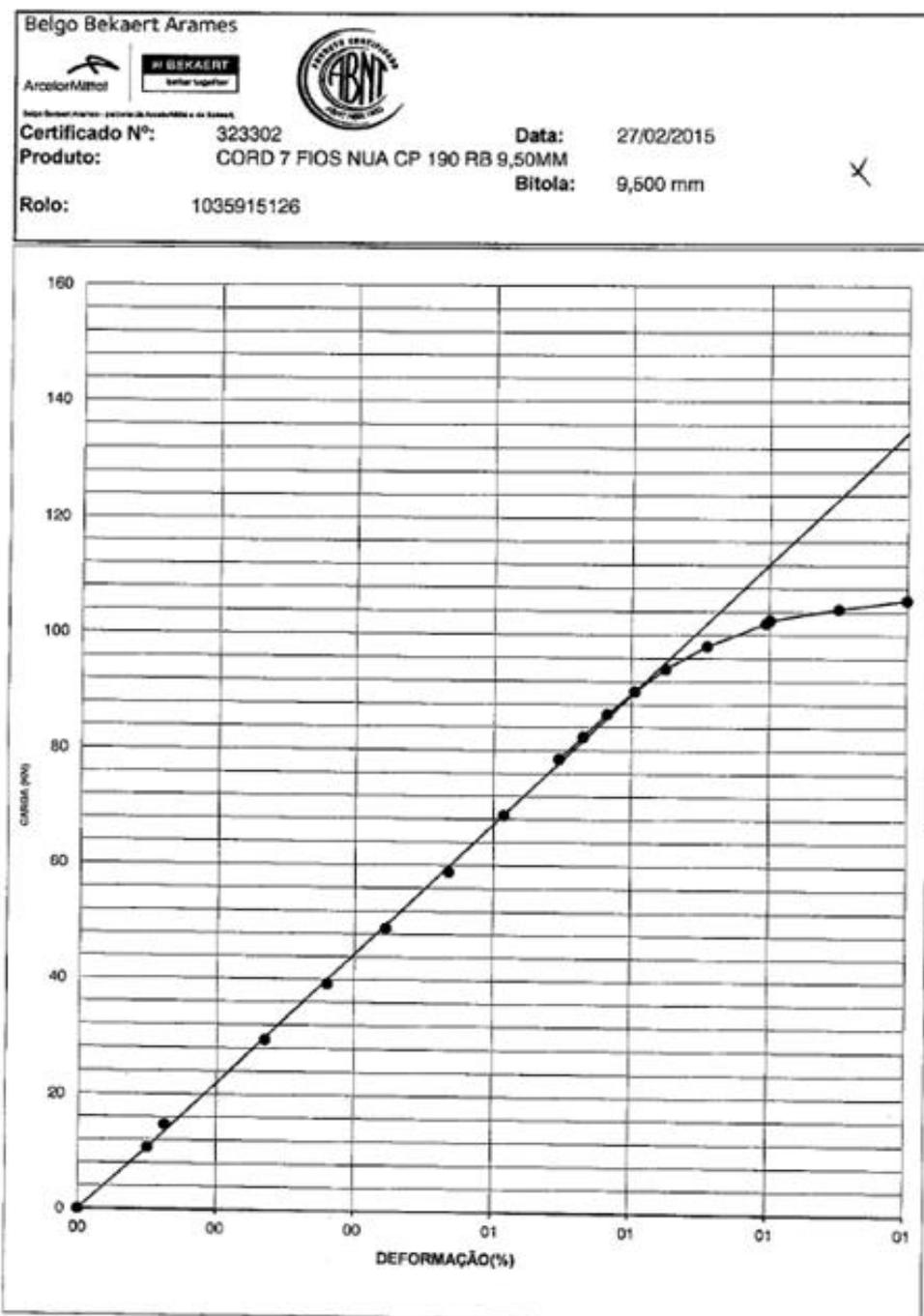
### Anexo 3

Laudos dos ensaios de caracterização do aço.

 <p>Belgo Bekaert Arames</p> <p>ArcelorMittal</p> <p>Av. Antônio Carlos de Almeida Prado, 500-A Cidade Industrial - Campinas - MG Cep: 13210-110</p>		<p align="center"><b>CERTIFICADO DA QUALIDADE</b></p> <p align="right"><b>CERTIFICADO Nº 000000323302</b> Pag. 1/ 1</p>												
<p>Cliente: 41044862 ROTESMA INDUSTRIA DE PRE-FABRICADOS</p> <p>Fornecedor: 0301454479</p> <p>Material: 40420068 CORD 7 FIOS NUA CP 190 RB 9,50MM</p> <p>Produto do Cliente:</p> <p>Norma: ABNT NBR 7483/2008</p>		<p>Ordem: 6199786 - 20 Data de Impressão: 27/02/2015</p> <p>Pedido do Cliente: E-MAIL ENV. 20.02.2015</p>												
<p align="center"><b>Propriedades Mecânicas / Metalúrgicas</b></p>														
Especific/ Volume	Aço cordão		Alongam 60000s		Carga 1%		Carga de ruptura		Massa		Diâmetro cordão		Módulo elástico	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	54,80	57,30	3,5		92		102		415		9,30		191.237	
	mm <sup>2</sup>		%		kN		kN		kg/1000m		mm		kN/mm <sup>2</sup>	
1035915126	55,81		5,1		103		113		437		9,62		201.956	
1035980456	55,71		5,1		101		112		437		9,62		197.385	
1035980459	55,66		5,0		102		114		438		9,62		198.000	
<p>OS TESTES REALIZADOS PARA ESTE PRODUTO FORAM BASEADOS NA NORMA ABNT NBR 7483/2008.</p>														
														
<p>Diâmetro: 9,500 mm</p> <p>Quantidade: 8.809,000</p> <p>Peso Líquido NF: 22.949,000</p>			<p>Nota Fiscal: 000788162 Emitida em: 27/02/2015</p> <p>Data de Criação: 27/02/2015</p>							 <p>Rogério Moraes de OLIVEIRA Responsável pelo Laboratório Física</p>				

Fonte: ROTESMA PRÉ-FABRICADOS 2016.

Amostra 1:



Modulo elasticidade 201.956 kN/mm<sup>2</sup>

  
Rogério Moraes de Oliveira  
Supervisor do Laboratório

Fonte: ROTESMA PRÉ-FABRICADOS 2016.

Amostra 2:

Belgo Bekaert Arames

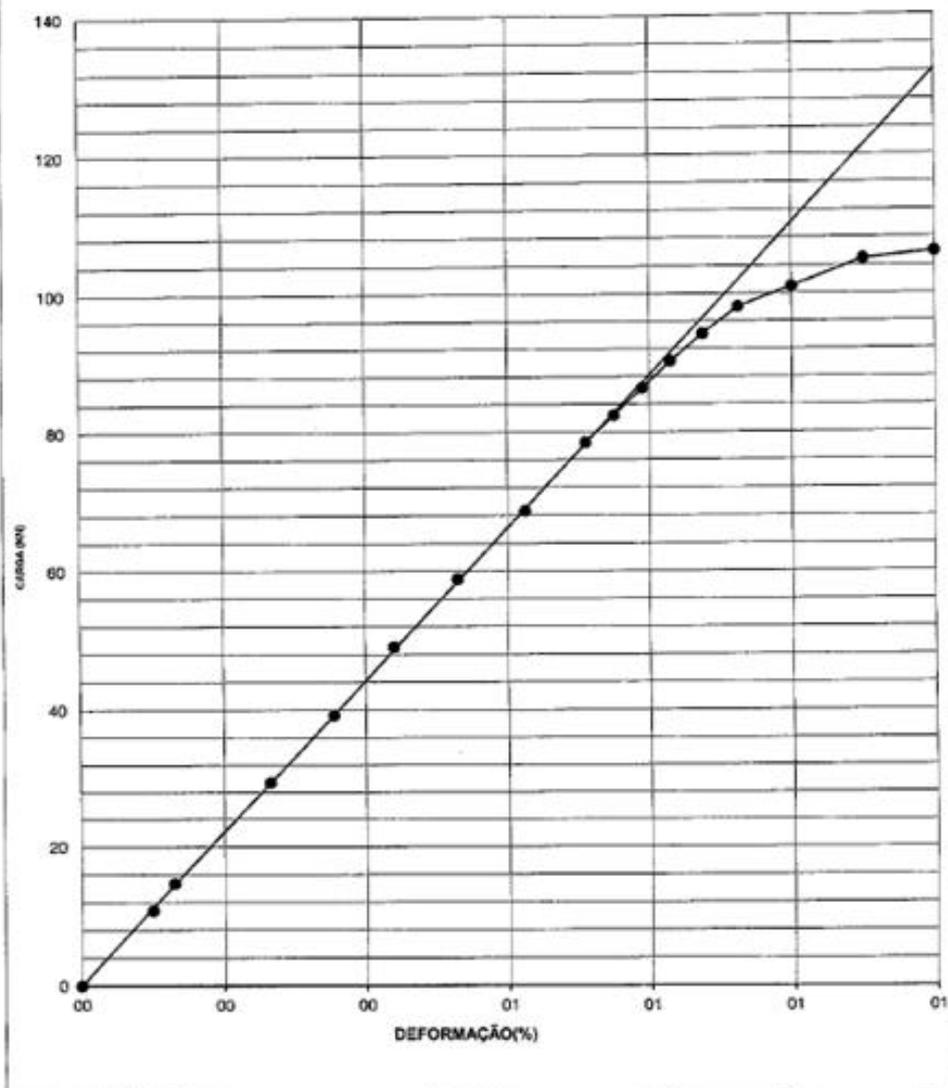
ArcelorMittal  

Belgo Bekaert Arames - Serviço de Assistência e de Suporte

Certificado Nº: 323302      Data: 27/02/2015

Produto: CORD 7 FIOS NUA CP 190 RB 9,50MM      Bitola: 9,500 mm

Rolo: 1035980456

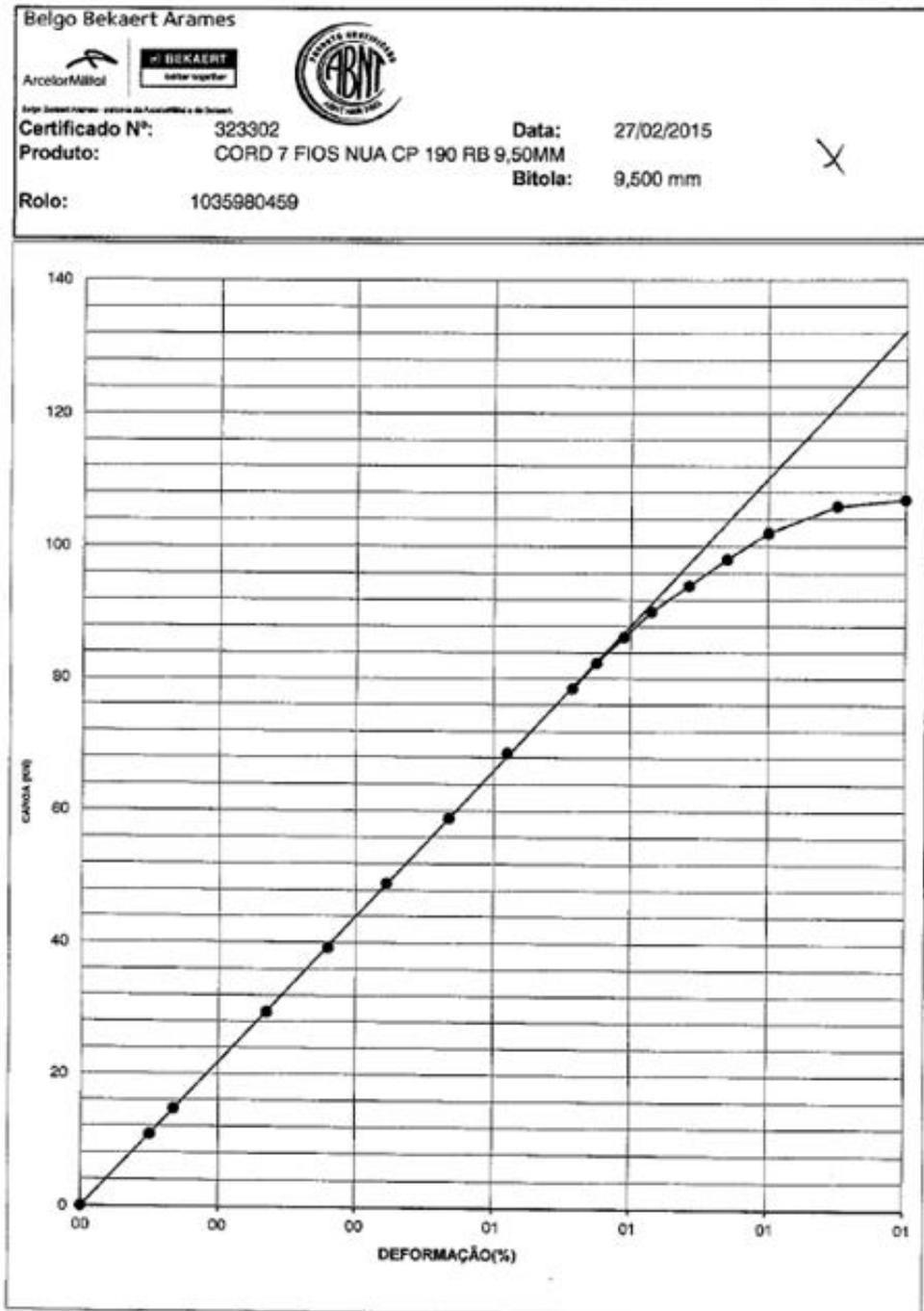


Modulo elasticidade 197.385 kN/mm<sup>2</sup>

  
Rogério Moris de Oliveira  
Supervisor do Laboratório

Fonte: ROTESMA PRÉ-FABRICADOS 2016.

Amostra 3:



Modulo elasticidade 198.690 kN/mm<sup>2</sup>

  
Rogério Morais de Oliveira  
Supervisor do Laboratório

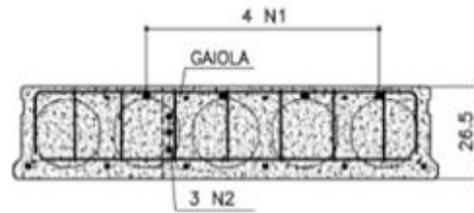
Fonte: ROTESMA PRÉ-FABRICADOS 2016.

## Anexo 4

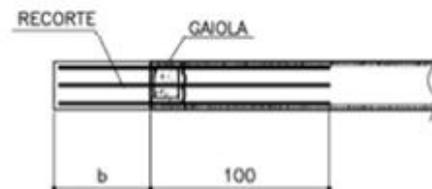
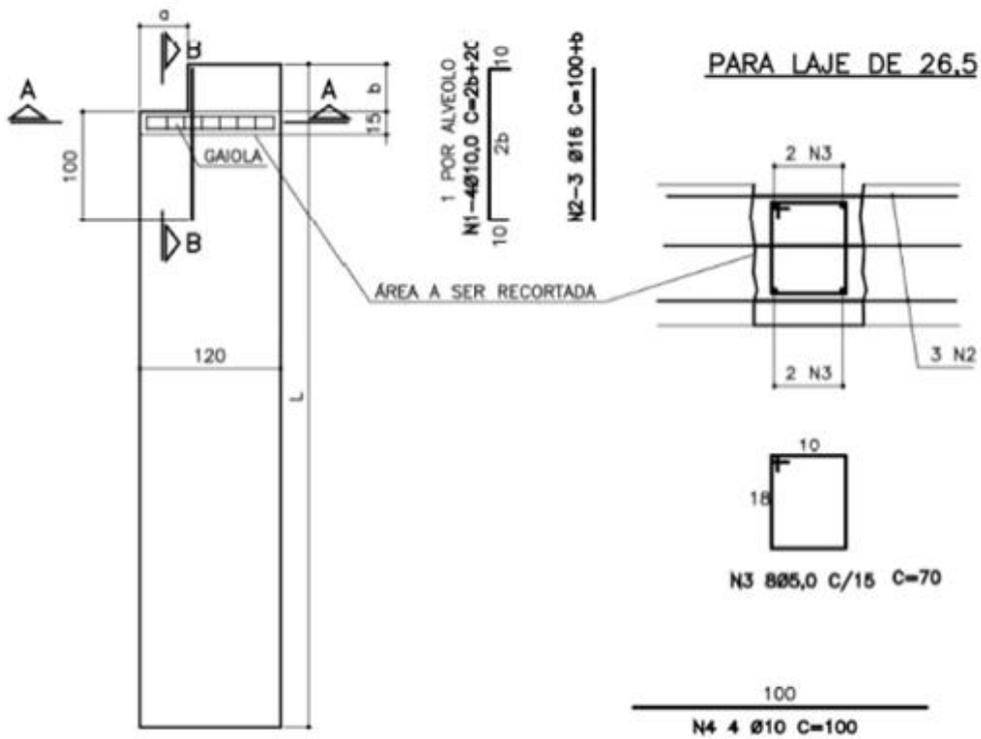
Reforço para abertura frontal laje de altura 265 mm:

RESUMO - LAJE DE 26,5  
VOL. ENCHIMENTO = 0,048 m<sup>3</sup>

PESO DE AÇO		
Ø	POS	PESO
5,0	N3	1
10	N4	3
TOTAL		4



CORTE "A"



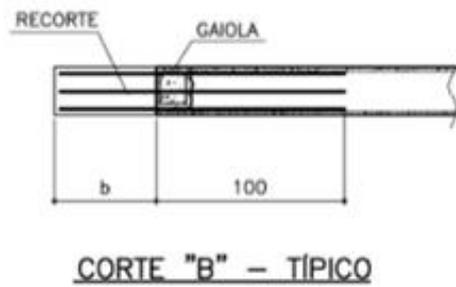
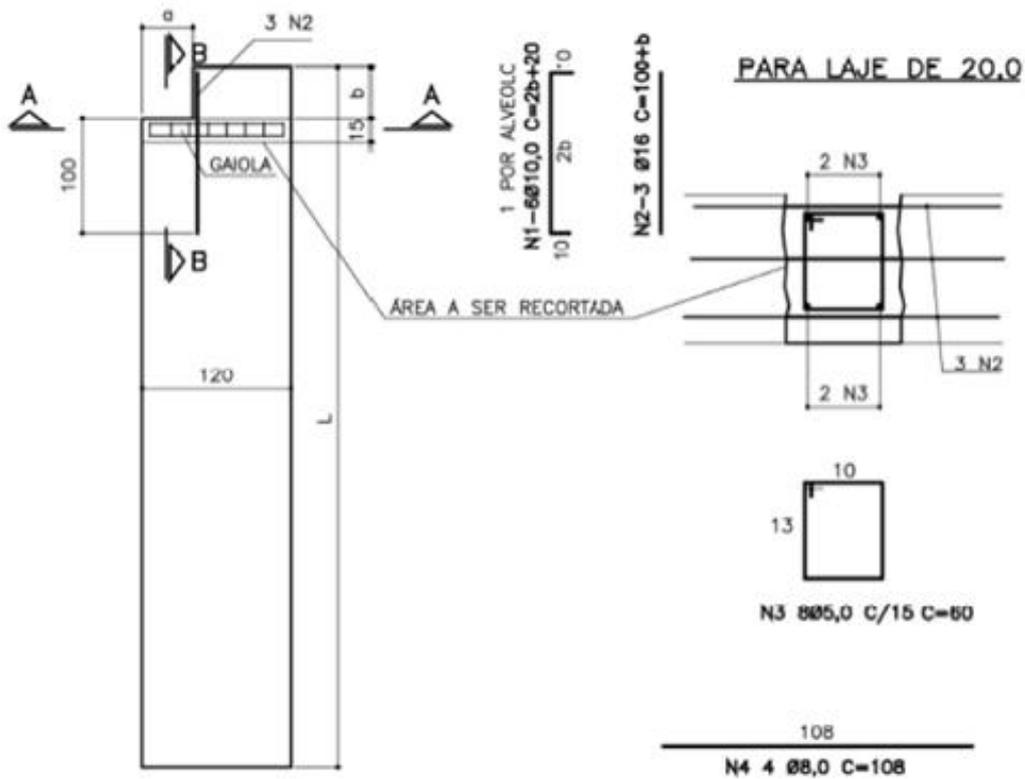
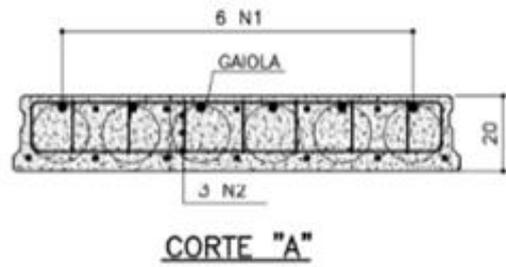
CORTE "B" - TÍPICO

Fonte: MUNTE 2007.

Reforço para abertura frontal laje de altura 200 mm:

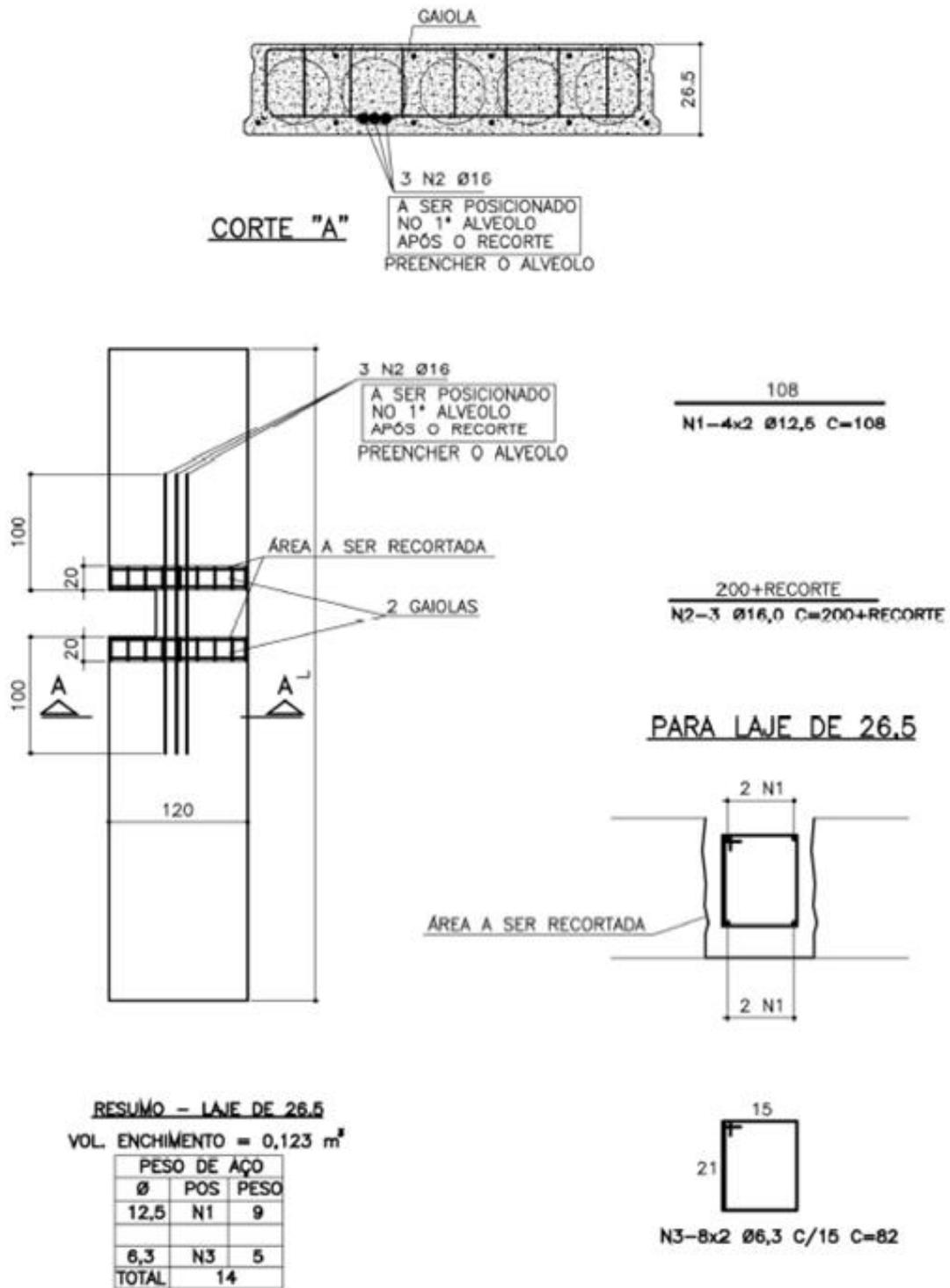
RESUMO - LAJE DE 20,0  
VOL. ENCHIMENTO = 0,036 m<sup>3</sup>

PESO DE AÇO		
Ø	POS	PESO
5,0	N3	1
8,0	N4	2
TOTAL		3



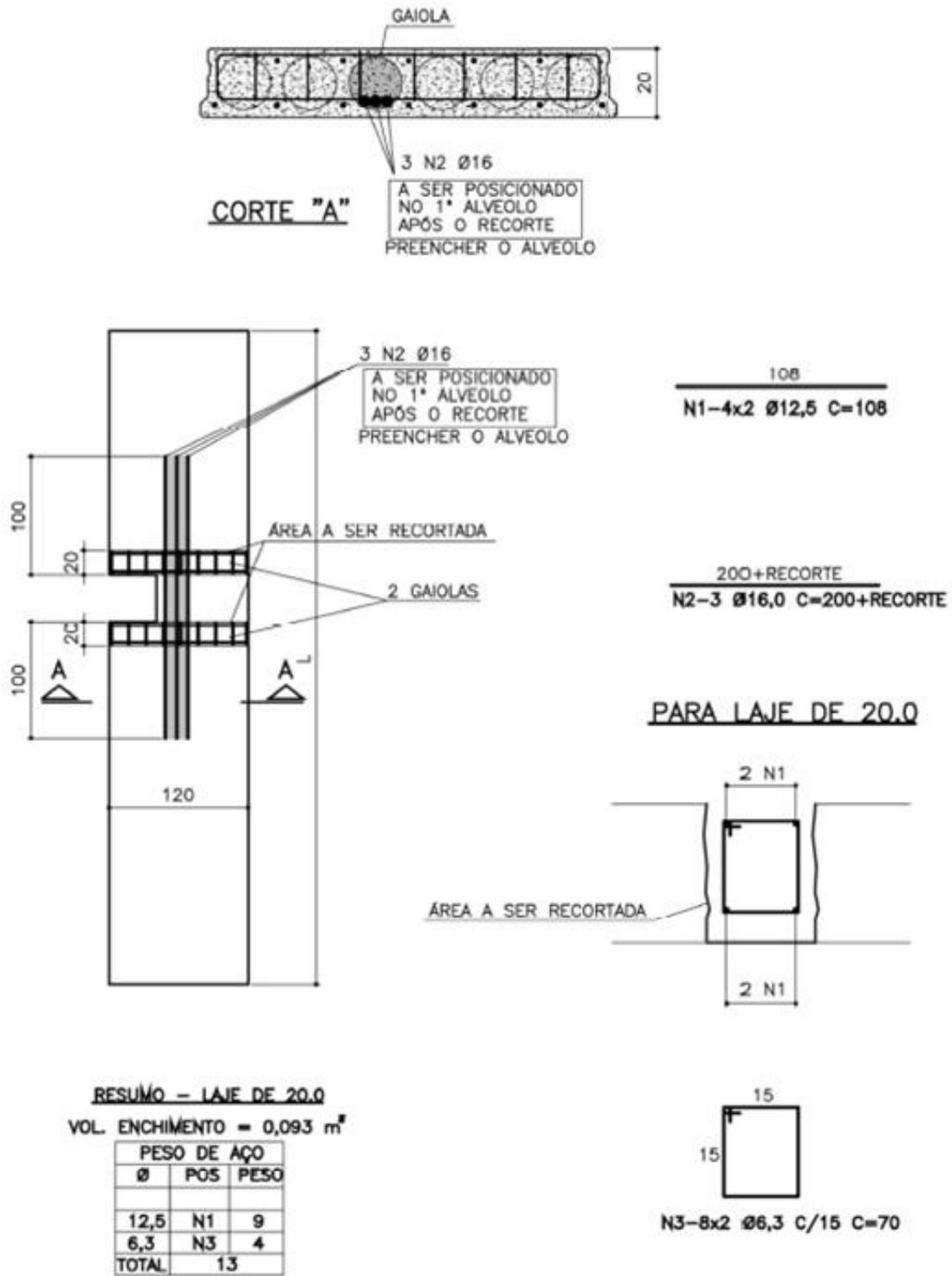
Fonte: MUNTE 2007.

Reforço para abertura lateral laje de altura 265 mm:



Fonte: MUNTE 2007.

Reforço para abertura lateral laje de altura 200 mm:

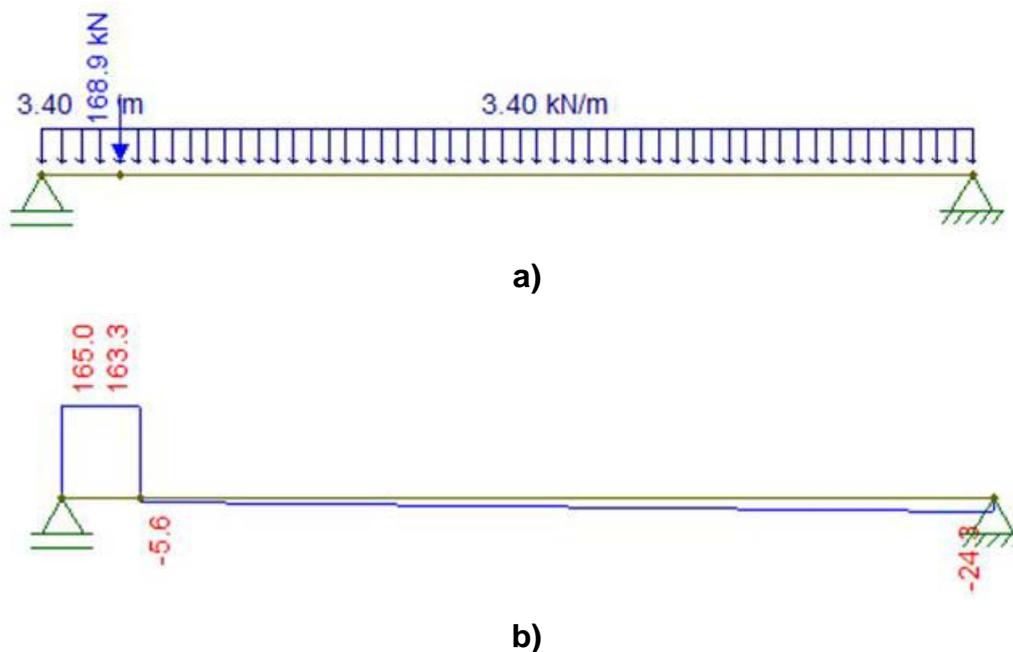


Fonte: MUNTE 2007.

## Anexo 5

Exemplo de esquema estático das lajes para determinação da resistência ao esforço cortante por meio do carregamento de ensaio.

Figura iv: Imagem do programa FTOOL: a) esquema estático; b) diagrama de esforço cortante.



Fonte: O AUTOR.

## Anexo 6

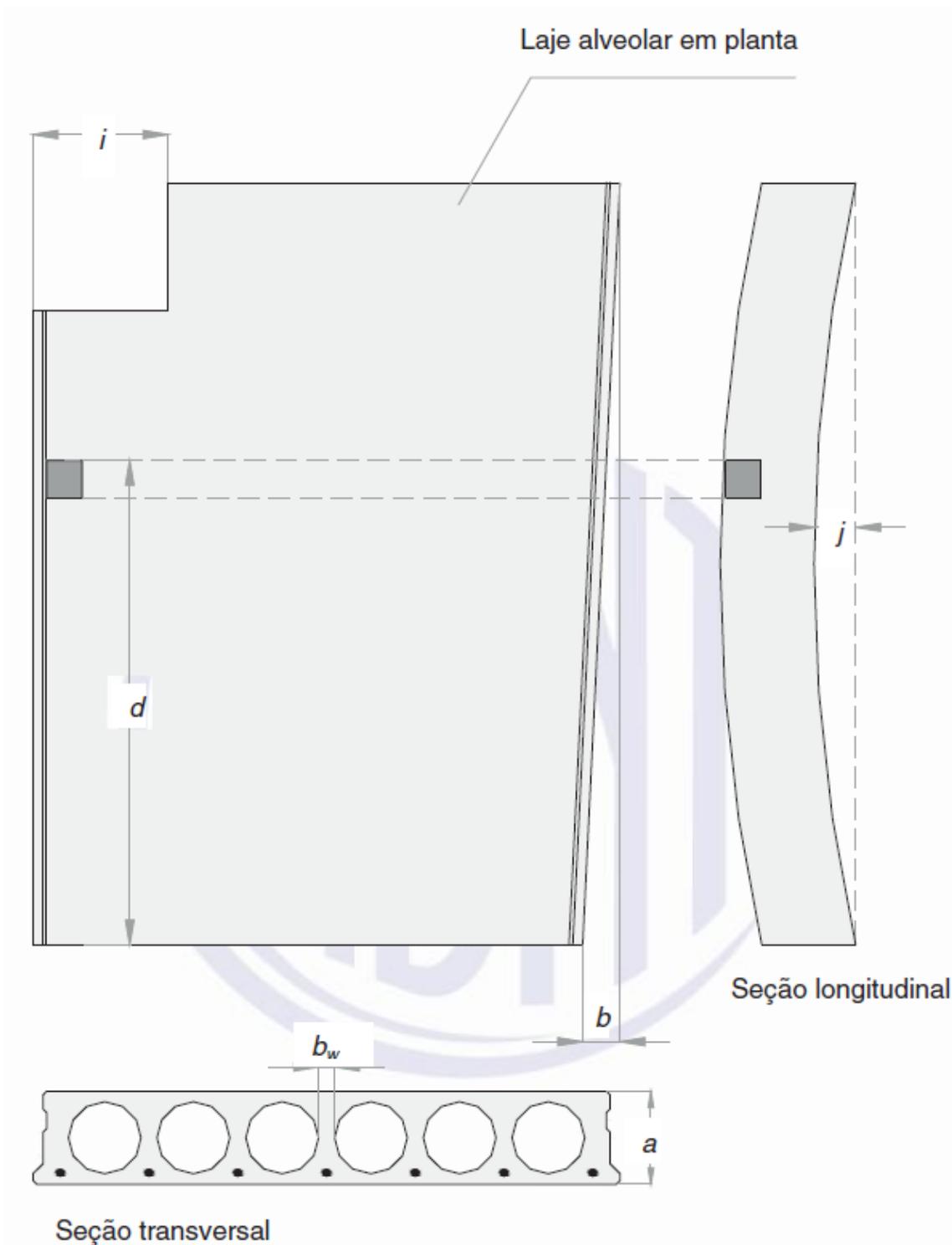
Tolerâncias de fabricação de lajes alveolares segundo a ABNT NBR 14861:2011.

Figura v: Tolerâncias de fabricação de lajes alveolares.

Dimensões		Tolerâncias mm
Comprimento ( $L$ )	$L \leq 5$ m	$\pm 10$
	$5 \text{ m} < L \leq 10$ m	$\pm 15$
	$L > 10$ m	$\pm 20$
Altura da laje ( $h$ )	$h \leq 150$ mm	$- 5, + 10$
	$h \geq 250$ mm	$\pm 15$
	$150 \text{ mm} < h < 250$ mm	Interpolação linear
Espessura da alma	$b_w$	$- 10$ e $+ 15$
	$\Sigma b_w$	$- 20^a$
Recortes/vazios ( $i$ )		$\pm 20$
Posição de chapas metálicas ou furos para fixação ( $d$ )		$\pm 15$
Posição do cabo de protensão (vertical e horizontal) ( $e$ )		$\pm 10$
Esquadro dos cantos		$\pm 5$
Esquadro diagonal	$L \leq 10$ m	$\pm 15$
	$L > 10$ m	$\pm 2$ mm por metro
Planicidade ( $b$ no plano)	$L \leq 5$ m	$\pm 3$ mm
	$L > 5$ m	$\pm L/1\ 000$
Distorção	Largura $\leq 1$ m	$\pm 3$ mm a cada 30 cm
	Largura $> 1$ m	$\pm 10$ mm
Linearidade ( $b$ )		$\pm L/1\ 000$
Alinhamento transversal ( $j$ )		$\pm L/500$
onde $L$ é o comprimento do elemento pré-moldado e demais dimensões são representadas na Figura 2.		
<sup>a</sup> Convém atender à limitação da tolerância para a soma das larguras das almas entre alvéolos (tolerância de $\Sigma b_w \leq 20$ mm).		

Fonte: ABNT NBR 14861:2011.

Figura vi: Desenho ilustrativo das tolerâncias de fabricação de lajes alveolares.



Fonte: ABNT NBR 14861:2011.

## Anexo 7

A Figura vii apresenta os valores de cobrimento de armadura para determinados níveis de agressividade, segundo a ABNT NBR 6118:2014.

**Figura vii: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento da armadura para um desvio de produção  $\Delta c$  de 10mm.**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

**Fonte: ABNT NBR 6118:2014.**

## Anexo 8

A Figura viii apresenta os valores limites para o deslocamento de lajes e vigas, segundo a ABNT NBR 6118:2014.

**Figura viii: Limites para deslocamentos.**

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ( $\psi_1 = 0,30$ )	$H/1700$ e $H_f/850^e$ entre pavimentos <sup>f</sup>
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400^g$ e 15 mm

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Figura viii: Limites para deslocamentos (continuação).

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$\ell/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$\ell/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		
<p><sup>a</sup> As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.</p> <p><sup>b</sup> Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que <math>\ell/350</math>.</p> <p><sup>c</sup> O vão <math>\ell</math> deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.</p> <p><sup>d</sup> Rotação nos elementos que suportam paredes.</p> <p><sup>e</sup> <math>H</math> é a altura total do edifício e <math>H_i</math> o desnível entre dois pavimentos vizinhos.</p> <p><sup>f</sup> Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando <math>H_i</math> representa o comprimento do lintel.</p> <p><sup>g</sup> O valor <math>\ell</math> refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.</p> <p>NOTAS</p> <p>1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão <math>\ell</math> suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.</p> <p>2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor <math>\ell</math> é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.</p> <p>3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.</p> <p>4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.</p>				

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.