

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**“ANÁLISE DE LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA MOLDADA POR FÔRMA FIXA E
USANDO PLACAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO – ESTUDO TEÓRICO E
EXPERIMENTAL”**

THIAGO BINDILATTI INFORSATO

SÃO CARLOS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**“ANÁLISE DE LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA MOLDADA POR FÔRMA FIXA E
USANDO PLACAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO – ESTUDO TEÓRICO E
EXPERIMENTAL”**

THIAGO BINDILATTI INFORSATO

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

Área de Concentração: Sistemas Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho.

São Carlos

2018

Bindilatti Inforsato, Thiago

Análise de laje alveolar protendida moldada por fôrma fixa e usando placas de poliestireno expandido – Estudo teórico e experimental / Thiago Bindilatti Inforsato. -- 2018.

224 f. : 30 cm.

Tese (doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: Roberto Chust Carvalho

Banca examinadora: Maria Cristina Vidigal de Lima; Fernando Menezes de Almeida Filho; Rodrigo Gustavo Delalibera; Daniel Domingues Loriggio
Bibliografia

1. Laje alveolar. 2. Falha por ancoragem. 3. Processo produtivo. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



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 Thiago Bindilatti Inforsato, realizada em 18/06/2018:



Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho
UFSCar



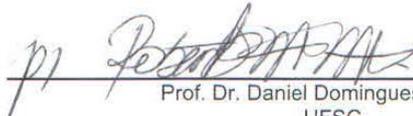
Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima
UFU



Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
UFSCar



Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera
UFU



Prof. Dr. Daniel Domingues Loriggio
UFSC

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Maria Cristina Vidigal de Lima, Rodrigo Gustavo Delalibera, Daniel Domingues Loriggio e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho

À minha esposa Thais, ao meu filho Miguel, ao meu pai Aparecido (in memoriam) e a minha mãe Ivanira, dedico este trabalho, com todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a oportunidade de vencer mais esta etapa em minha vida, sem a sua ajuda e presença, nada conseguiria fazer.

A minha esposa Thais, pela sua paciência nos momentos difíceis e compreensão, entendendo que estes sacrifícios valeram a pena, além de me apoiar com muito amor. Minha esposa guerreira, mãe exemplar, linda história de vida.

Ao meu filho Miguel, um presente de Deus em minha vida. Mesmo com pouca idade (5 anos) pode me dar força, amor e carinho para continuar em frente. Filho te amo!

Aos meus pais Aparecido (in memoriam) e Ivanira, que sempre me apoiaram e me deram suporte necessário para seguir o meu caminho. Pai infelizmente você partiu antes, mas o nosso sonho foi realizado. Obrigado!

Ao amigo e sócio, Andrey Monteiro Maciel, por todo apoio durante o andamento deste trabalho, em especial pelas contribuições técnicas, acompanhando de perto todo o desenvolvimento. Sua participação foi imprescindível.

Ao meu orientador e grande amigo Roberto Chust Carvalho, exemplo de profissional e de pessoa, pelo indispensável apoio e dedicação, durante esse período.

Aos professores Marcelo de Araújo Ferreira e Fernando Menezes de Almeida Filho, pelas suas preciosas sugestões e correções no exame de qualificação.

Aos professores Fernando Menezes de Almeida Filho, Maria Cristina Vidigal de Lima, Rodrigo Gustavo Delalibera e Daniel Domingues Loriggio, por terem participado do exame final, colaborando ainda mais para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos professores Hudson Chagas dos Santos e Daniel de Lima Araújo, por terem dedicado o seu tempo estando em prontidão na suplência da banca examinadora.

À PRETEC – Projeto e consultoria, pelas vezes em que precisei me ausentar das atividades do dia a dia para que este trabalho pudesse ser realizado.

A Tulipa Pré-fabricados, por ter aberto as portas da fábrica permitindo a coleta de informações e também pelo fornecimento das lajes, viabilizando assim o desenvolvimento desta pesquisa. Um agradecimento especial ao meu amigo de longa data Bernardus Hulshof.

À UFSCar, que me acolheu na graduação e pós-graduação, oferecendo condições para que eu pudesse ter acesso ao conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao laboratório de pesquisa NETPre - Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto, por ter oferecido toda a estrutura e apoio para a realização dos ensaios. A Bruna Catoia por todo o suporte para a realização e coleta de dados nos ensaios.

Por todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha vida durante os anos de DECiv e que certamente contribuíram para o meu crescimento. A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

INFORSATO, T. B. **Análise de laje alveolar protendida moldada por fôrma fixa e usando placas de poliestireno expandido – Estudo teórico e experimental.** 224f. Tese (Doutorado em Estrutura e Construção civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2018.

O uso da laje alveolar protendida está cada vez mais evidente e tem surgido inúmeros métodos alternativos para sua produção. Esses processos produtivos não utilizam equipamentos de moldagem ou extrusão. Neste trabalho, detalha-se o processo produtivo de laje alveolar moldada por fôrma fixa com a utilização de placas de poliestireno expandido (EPS), fazendo comparação com o processo de produção da laje alveolar executadas com máquinas. As lajes produzidas por fôrma fixa têm sido pouco estudadas, embora possam ser encontradas com certa frequência no mercado. Por este motivo desenvolve-se, neste trabalho, um resumo teórico das análises possíveis a serem usadas neste tipo de peça, recorrendo as normas brasileiras, estrangeiras e às recomendações da literatura técnica. Para corroborar com o emprego das análises e verificar o comportamento estrutural deste elemento desenvolveu-se um programa experimental seguindo, as prescrições de ensaios normativos de lajes alveolares. Neste programa foram realizados quinze ensaios com lajes de altura nominal de 150 mm e simplesmente apoiadas nas extremidades com o comprimento de 5,70 m. Doze deles foram feitos para estudo do esforço cortante e três para a estudo da flexão. Nos doze ensaios de esforço cortante variou-se a distância entre a extremidade da laje e o ponto de atuação da força aplicada. Em três destas lajes utilizou-se estribos nas extremidades. Completam a série de quinze ensaios, três realizados para a análise do comportamento à flexão com força concentrada. Pelos resultados observados conclui-se que, para os ensaios de força cortante, a ruptura da peça foi governada pela falha da ancoragem da armadura ativa. Nos ensaios à flexão os resultados obtidos coincidem com a teoria. Por fim, identifica-se que, em algumas situações, a espessura da capa da laje governa o comportamento estrutural do elemento. Desta forma estuda-se qual é a influência que uma capa de concreto moldado in-loco exercerá na capacidade de carga da laje alveolar moldada por fôrma fixa. Conclui-se que a utilização da capa de concreto minimiza possíveis diminuições da capacidade resistente ou de carregamento da laje alveolar moldada por fôrma fixa devido a movimentação do EPS durante o processo de fabricação.

Palavras-chaves: *Laje Alveolar, Falha por Ancoragem, Processo Produtivo, Fôrma Fixa.*

ABSTRACT

INFORSATO, T. B. **Analysis of prestressed hollow core slab cast into fixed formwork with eps void former – Theoretical and experimental study.** 224f. Tese (Doutorado em Estrutura e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2018.

The use of prestressed hollow core slabs has increased significantly and, consequently various productive methods have emerged. These methods do not employ machinery such as extruders or slip former machine. In this research, a production method for prestressed hollow core slab cast into fixed formwork with EPS void former has been detailed and compared with the production that employs machinery. Although there are many producers of hollow core slabs with EPS void former in the Brazilian market, there is still a lack of knowledge about this precast product. Therefore, this research presents a review and recommendations with possible theoretical analyses to be applied within the structural design of this type of precast element, which should also meet the design requirements of the Brazilian codes of practice for cast in situ and precast concrete structures, as well as existent recommendations for prestressed hollow core slabs within the international literature. In order to validate the analytical proposals for design, an experimental program has been carried out comprising standard tests for prestressed hollow core slabs in accordance with international codes of practice and technical literature. Within the experimental program, 15 slabs with heights of 150 mm and were tested under bending and shear forces for simply supported slabs with span of 5,70 meters, comprising 12 shear tests and 3 bending tests. For the shear tests, the length of the span between the applied point load and slab support was varied. Three of the shear tests were carried out for slabs employing transverse reinforcement, while the nine remaining slabs were tested without transverse reinforcement. Complementing the experimental program, three bending tests with concentrated load were also carried out. According to the observed experimental results, the failure mode of the slabs within the shear tests was governed by anchorage failure of the strands. For the bending tests, the experimental results were consistent with the usual bending theory for prestressed members. Finally, for some tested slabs, it has been identified the failure mode was governed by the position of the EPS forming a void within the slab transversal section, which affects the thickness of the top flange. Therefore, an additional study was carried out to evaluate the influence of the cast in place structural topping to increase the bending moment resistance of the prestressed hollow core slab

cast into fixed formwork with EPS void former. It is concluded that the use of the cast in place structural topping minimizes possible decreases in the resistant capacity of the prestressed hollow core slab cast into fixed formwork with EPS void former, during the manufacturing process.

Keywords: *Hollow Core Slabs, Anchorage Failure, Production Process, Fixed Formwork.*

ÍNDICE

RESUMO	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>ii</i>
ÍNDICE	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>vii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xii</i>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. USO DA LAJE ALVEOLAR MOLDADA POR FÔRMA FIXA	3
1.2. OBJETIVOS	6
1.3. JUSTIFICATIVA	7
1.4. METODOLOGIA	8
1.5. APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS	9
2. ASPECTOS SOBRE OS MECANISMOS DE RUPTURA	11
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1.1. MECANISMOS DE RUPTURA POR FLEXÃO	16
2.1.2. MECANISMOS DE RUPTURA POR FORÇA CORTANTE	17
2.1.3. MECANISMOS DE RUPTURA POR FALHA DE ANCORAGEM	18
2.2. ENSAIOS REALIZADOS NO NETPre 2007 A 2014	25
2.2.1. PESQUISAS ACADÊMICAS	26
2.2.2. PESQUISAS PÚBLICO PRIVADA	28
2.3. PESQUISAS CONSULTADAS	38
2.4. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO ALVÉOLO	41
3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	45
3.1. INTRODUÇÃO	45
3.2. ESTADO LIMITE DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES NORMAIS	48
3.3. ESTADO LIMITE DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES TANGENCIAIS	52
3.3.1. SEGUNDO A ABNT NBR 14861:2011	53
3.3.2. SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014	57
3.4. ANCORAGEM DA ARMADURA ATIVA	61

3.4.1.	SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014 _____	61
3.4.2.	SEGUNDO A EN 1992-1-1:2004 _____	63
3.4.3.	ESCORREGAMENTO DAS CORDOALHAS NAS EXTREMIDADES DA LAJE ALVEOLAR _____	67
4.	<i>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO</i> _____	68
4.1.	ENSAIOS PARA LAJES ALVEOLARES BIAPOIADAS _____	68
4.1.1.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE _____	69
4.1.2.	ENSAIO À FLEXÃO _____	71
4.2.	AVALIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E O MÓDULO DE ELASTICIDADE _____	72
4.2.1.	AVALIAÇÃO DA f_{ctm} A PARTIR DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO EXPERIMENTAL _____	72
4.2.2.	AVALIAÇÃO DO $E_{c,ef}$ A PARTIR DA FLECHA EXPERIMENTAL _____	74
5.	<i>PROCESSO DE PRODUÇÃO</i> _____	76
5.1.	INTRODUÇÃO _____	76
5.2.	ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO _____	78
5.2.1.	PREPARAÇÃO DA PISTA _____	79
5.2.2.	POSICIONAMENTO DOS CABOS DE PROTENSÃO _____	85
5.2.3.	LANÇAMENTO DO CONCRETO E PRODUÇÃO DAS LAJES _____	87
5.2.4.	MARCAÇÃO DAS LAJES, RECORTES E CURA _____	98
5.2.5.	LIBERAÇÃO DA PROTENSÃO E CORTE _____	103
5.2.6.	IÇAMENTO E ESTOCAGEM _____	105
6.	<i>PROGRAMA EXPERIMENTAL</i> _____	111
6.1.	METODOLOGIA DE ENSAIO _____	111
6.2.	INSTRUMENTAÇÃO _____	114
6.3.	DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS _____	115
6.4.	ESQUEMAS DOS ENSAIOS _____	121
7.	<i>ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS</i> _____	122
7.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS _____	123
7.1.1.	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE _____	123
7.1.2.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À TRAÇÃO _____	125
7.1.3.	ENSAIO A FORÇA CORTANTE SEM ESTRIBOS _____	126
7.1.4.	ENSAIO A FORÇA CORTANTE COM ESTRIBOS _____	128
7.1.5.	ENSAIO À FLEXÃO _____	129

7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS	130
7.2.1. TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO	131
7.2.2. ANCORAGEM DA ARMADURA ATIVA NA FABRICAÇÃO	138
7.2.3. ANÁLISE DOS ENSAIOS A FORÇA CORTANTE DAS LAJES SEM ESTRIBOS	140
7.2.4. ANÁLISE DOS ENSAIOS A FORÇA CORTANTE DAS LAJES COM ESTRIBOS	141
7.2.5. ANÁLISE DOS ENSAIOS À FLEXÃO	142
7.2.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS À ANCORAGEM	146
7.2.7. INFLUÊNCIA DA MOVIMENTAÇÃO DO EPS	155
7.2.8. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NA ALTURA DA LAJE	158
7.2.9. INFLUÊNCIA DA MOVIMENTAÇÃO DO ESP COM O USO DA CAPA	162
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
8.1. CONCLUSÕES	165
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	167
REFERÊNCIAS	169
ANEXO A – CONTROLE DE CORPO DE PROVA	174
APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS	176
APÊNDICE B – COEFICIENTE DE FLUÊNCIA E RETRAÇÃO	180
APÊNDICE C – PERDAS DE PROTENSÃO	185
APÊNDICE D – FLEXÃO EM LAJE ALVEOLARES	190
APÊNDICE E – CISALHAMENTO EM UNIDADES ALVEOLARES PROTENDIDAS	195
APÊNDICE F – RUPTURA POR ANCORAGEM	202

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1: Etapas de produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, e com utilização de EPS</i>	2
<i>Figura 1-2: Seção transversal de laje alveolar. Fabricante Fabcon</i>	4
<i>Figura 1-3: Etapas de produção de laje alveolar moldada por fôrma e com utilização de EPS. Fabricante Fabcon</i>	5
<i>Figura 1-4: Seções transversal de laje alveolar moldada com fôrma fixa, e com a utilização de EPS</i>	6
<i>Figura 1-5: Planta de uma laje alveolar moldada por fôrma fixa e com a utilização de EPS</i>	7
<i>Figura 1-6: Seção típica de laje tipo PI ou duplo T</i>	8
<i>Figura 2-1: Exemplo de laje alveolar de acordo com a EN 1168:2008</i>	11
<i>Figura 2-2: Seções transversais típicas de lajes alveolares</i>	12
<i>Figura 2-3: Seções transversais típicas de lajes alveolares</i>	12
<i>Figura 2-4: Exemplo de laje alveolar de acordo com a ABNT NBR 14861:2011</i>	13
<i>Figura 2-5: Exemplos de seções transversais de lajes alveolares e de geometria de alvéolos</i>	13
<i>Figura 2-6: Elemento de concreto protendido submetido à flexão e cisalhamento, a) Fissuras na nervura devidas ao cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão</i>	16
<i>Figura 2-7: Fissuras de tração que ocorrem na face superior da laje devido a protensão</i>	17
<i>Figura 2-8: Representação gráfica para as rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)</i>	18
<i>Figura 2-9: Transferência de esforços por aderência</i>	20
<i>Figura 2-10: Fissuras e forças ao redor de barra tracionada</i>	20
<i>Figura 2-11: Fendilhamento longitudinal do concreto</i>	21
<i>Figura 2-12: a) rupturas por fendilhamento, b) rupturas por arrancamento</i>	21
<i>Figura 2-13: Efeito Hoyer</i>	22
<i>Figura 2-14: Ancoragem da armadura ativa sob efeito de carregamento externo</i>	22
<i>Figura 2-15: Equilíbrio de tensões na fissuração</i>	23
<i>Figura 2-16: Perda de ancoragem devindo a fissuração</i>	23
<i>Figura 2-17: Fissuras típicas de explosão (bursting)</i>	24
<i>Figura 2-18: Fissuras típicas de separação do talão inferior (splitting)</i>	25
<i>Figura 2-19: Fissuras típicas de destacamento da alma (spalling)</i>	25
<i>Figura 2-20: Laje alveolar moldada por fôrma fixa, e utilização de EPS</i>	29
<i>Figura 2-21: a) Determinação da resistência à força cortante; b) Determinação da resistência à flexão</i>	29
<i>Figura 2-22: Arranjo para ensaio da força cortante (procedimento segundo EN-1168:2009)</i>	30
<i>Figura 2-23: Arranjo para ensaio à flexão (procedimento segundo CEB-FIP 1992)</i>	31
<i>Figura 2-24: Arranjos dos ensaios para resistência a força cortante</i>	33
<i>Figura 2-25: Arranjo para ensaio de flexão</i>	33
<i>Figura 2-26: Vista do ensaio de força cortante</i>	34
<i>Figura 2-27: Vista do ensaio de flexão</i>	34
<i>Figura 2-28: Arranjo do ensaio para resistência a força cortante</i>	36
<i>Figura 2-29: Vista do ensaio de força cortante</i>	36
<i>Figura 2-30: Arranjo do ensaio para flexão</i>	37

<i>Figura 2-31: Vista do ensaio de flexão</i>	38
<i>Figura 2-32: Seção transversal de projeto – Protótipo A</i>	41
<i>Figura 2-33: Seção transversal de projeto – Protótipo B</i>	42
<i>Figura 2-34: Esquema de ensaio (CEB FIP:1992 / EN 1168:2008)</i>	42
<i>Figura 3-1: Laje alveolar moldada por fôrma fixa com extremidade maciça e utilização de estribos</i>	47
<i>Figura 3-2: Laje alveolar moldada por fôrma fixa e com utilização de estribos</i>	47
<i>Figura 3-3: Deformação da seção após protensão</i>	50
<i>Figura 3-4: Deformação da seção após peso próprio</i>	50
<i>Figura 3-5: Deformação da seção após peso próprio e protensão</i>	50
<i>Figura 3-6: Seção transversal no estado limite de descompressão e limite último</i>	51
<i>Figura 3-7: Viga representada segundo a treliça clássica de Ritter–Mörsch</i>	57
<i>Figura 3-8: Viga representada segundo a treliça generalizada</i>	59
<i>Figura 3-9: Transferência da protensão em elementos pré-tracionados, parâmetros de comprimento</i>	63
<i>Figura 3-10: Tensões na zona de ancoragem de elementos pré-tracionados: (1) na liberação da armadura, (2) no estado limite último</i>	66
<i>Figura 4-1: Desenho esquemático do ensaio de força cortante</i>	70
<i>Figura 4-2: Possibilidades de arranjos para ensaio de força cortante em laje alveolar</i>	70
<i>Figura 4-3: Ensaio para a determinação da resistência do concreto a tração na flexão e da tensão de protensão do aço</i>	71
<i>Figura 4-4: Desenho esquemático do ensaio à flexão</i>	72
<i>Figura 4-5: Utilização de sensores LVDT para indicação de leitura da flecha durante o ensaio de flexão</i>	74
<i>Figura 5-1: Vista superior típica de laje alveolar moldada por fôrma fixa com a interrupção do EPS</i>	76
<i>Figura 5-2: Vista da extremidade da laje alveolar moldada por fôrma e interrupção do EPS</i>	77
<i>Figura 5-3: Esquema de pista de protensão com aderência inicial</i>	77
<i>Figura 5-4: Utilização de EPS para a forma do alvéolo</i>	78
<i>Figura 5-5: Fôrma contendo tubos de plástico preenchidos por ar comprimido</i>	78
<i>Figura 5-6: Fôrma contendo tubos de aço</i>	79
<i>Figura 5-7: Fôrma para produção de laje alveolar</i>	80
<i>Figura 5-8: Chave de cisalhamento em laje alveolar</i>	80
<i>Figura 5-9: Laterais metálicas para laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	81
<i>Figura 5-10: Seções nas juntas entre lajes com transmissão de força cortante</i>	81
<i>Figura 5-11: Tampas extremas para produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	82
<i>Figura 5-12: Fixação das tampas extremas nas fôrmas laterais</i>	82
<i>Figura 5-13: Laje alveolar com o comprimento da pista</i>	83
<i>Figura 5-14: Aplicação de desmoldante com pulverizador</i>	83
<i>Figura 5-15: Proteção das cordoalhas durante a aplicação do desmoldante</i>	83
<i>Figura 5-16: Aplicação de desmoldante por meio de equipamento</i>	84
<i>Figura 5-17: Posicionamento dos sarrafos</i>	84
<i>Figura 5-18: Bobina de cordoalha</i>	85
<i>Figura 5-19: Cabeceira metálica com as furações para as cordoalhas e locação dos crivos</i>	86

<i>Figura 5-20: Tampas extremas com furações para passagem da cordoalha</i>	86
<i>Figura 5-21: Extremidade de laje alveolar moldada por fôrma fixa com armaduras de reforço</i>	87
<i>Figura 5-22: Equipamentos de protensão para cabos isolados</i>	87
<i>Figura 5-23: Equipamentos para fabricação de laje alveolar: a) extrusora b) moldadora</i>	88
<i>Figura 5-24: Concreto vibrado na produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	89
<i>Figura 5-25: Usina de produção de concreto</i>	89
<i>Figura 5-26: Caçamba para auxílio do transporte de concreto</i>	90
<i>Figura 5-27: Concreto sendo lançado por etapas</i>	90
<i>Figura 5-28: Equipamento desenvolvido para vibração e regularização de camada de concreto</i>	91
<i>Figura 5-29: Equipamento sendo transferindo para a próxima laje</i>	91
<i>Figura 5-30: EPS distribuído ao longo da pista de protensão para posterior posicionamento</i>	92
<i>Figura 5-31: Posicionamento do EPS sobre a primeira camada de concreto</i>	92
<i>Figura 5-32: Dispositivo para fixação do EPS</i>	93
<i>Figura 5-33: Gancho para auxílio na fixação do EPS</i>	93
<i>Figura 5-34: Posicionamento do gancho em “U”</i>	94
<i>Figura 5-35: Concretagem da nervura e da borda superior da laje</i>	95
<i>Figura 5-36: Espalhamento do concreto</i>	95
<i>Figura 5-37: a) adensamento do concreto nas nervuras e da borda superior da laje b) remoção das “barras” de fixação do EPS</i>	96
<i>Figura 5-38: Equipamento para dar acabamento a parte superior da laje</i>	96
<i>Figura 5-39: Método utilizado para aferir a altura da laje</i>	97
<i>Figura 5-40: Acabamento rugoso na parte superior da laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	97
<i>Figura 5-41: Exemplo de paginação de pavimento com lajes alveolares</i>	98
<i>Figura 5-42: Execução de recorte em laje alveolar</i>	99
<i>Figura 5-43: Posicionamento da armadura de reforço em laje alveolar</i>	100
<i>Figura 5-44: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa com recorte</i>	100
<i>Figura 5-45: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa em tira</i>	101
<i>Figura 5-46: Laje alveolar moldada por fôrma fixa, com posicionamento de armadura antes da concretagem e extremidade em chanfro</i>	101
<i>Figura 5-47: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa com larguras diferentes, em uma mesma pista de protensão</i>	102
<i>Figura 5-48: Cura com lona térmica</i>	102
<i>Figura 5-49: Método de cura simples para posterior saque e movimentação da laje</i>	103
<i>Figura 5-50: Seção de laje alveolar com recorte longitudinal</i>	104
<i>Figura 5-51: a) Corte no sentido transversal. b) Corte no sentido longitudinal</i>	105
<i>Figura 5-52: Laje alveolar moldada por fôrma fixa já produzida com o recorte</i>	105
<i>Figura 5-53: Posicionamento do balancim para a movimentação da laje alveolar</i>	106
<i>Figura 5-54: Cordoalhas dobradas para serem utilizadas como alças de içamento</i>	106
<i>Figura 5-55: Posicionamento das alças de içamento</i>	107
<i>Figura 5-56: Parta exposta da alça de içamento</i>	107

<i>Figura 5-57: Movimentação de laje alveolar moldada por fôrma fixa, pelas alças de içamento</i>	107
<i>Figura 5-58: Indicação dos pontos de apoio para estocagem das lajes</i>	108
<i>Figura 5-59: Ruptura da laje devido ao mau posicionamento dos apoios</i>	108
<i>Figura 5-60: Estocagem de laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	109
<i>Figura 6-1: Paquímetro digital</i>	112
<i>Figura 6-2: Apoio para os ensaios das lajes alveolares moldadas por fôrma fixa</i>	112
<i>Figura 6-3: Regularização da superfície das lajes na região de contato com a viga de transmissão</i>	113
<i>Figura 6-4: Rótula entre a viga de transmissão e a célula de carga</i>	113
<i>Figura 6-5: Transdutor (LVTD) para medição dos deslocamentos</i>	114
<i>Figura 6-6: Posição das chapas metálicas</i>	114
<i>Figura 6-7: Posição dos transdutores sobre cada extremidade</i>	115
<i>Figura 6-8: Sistema de aquisição de dados</i>	115
<i>Figura 6-9: Seção transversal de projeto</i>	116
<i>Figura 6-10: Seção transversal experimental</i>	116
<i>Figura 6-11: Seção transversal construída considerando os valores médios das grandezas medidas.</i>	119
<i>Figura 6-12: Seção transversal da laje L02SE</i>	119
<i>Figura 7-1: Configuração de carregamento</i>	122
<i>Figura 7-2: Força no atuador versus deslocamento</i>	126
<i>Figura 7-3: Força no atuador versus deslocamento – $L1 = 60\text{cm}$</i>	127
<i>Figura 7-4: Força cortante versus deslocamento – $L1 = 37,5\text{cm}$ (2,5h)</i>	127
<i>Figura 7-5: Força no atuador versus deslocamento – $L1 = 30,0\text{cm}$ (2,0h)</i>	128
<i>Figura 7-6: Força no atuador versus deslocamento</i>	129
<i>Figura 7-7: Força no atuador versus deslocamento</i>	130
<i>Figura 7-8: Critério para definir o comprimento experimental</i>	131
<i>Figura 7-9: Diferença do comprimento experimental com comprimento de projeto</i>	132
<i>Figura 7-10: Critério para definir a altura experimental da laje</i>	132
<i>Figura 7-11: Diferença da altura experimental com a altura de projeto</i>	133
<i>Figura 7-12: Diferença da altura experimental com a altura de projeto</i>	133
<i>Figura 7-13: Critério para definir a espessura da alma experimental da laje</i>	134
<i>Figura 7-14: Diferença da espessura da alma experimental com a espessura de projeto</i>	135
<i>Figura 7-15: Diferença da espessura da alma experimental com a espessura de projeto</i>	135
<i>Figura 7-16: Diferença do somatório da espessura da alma experimental com o somatório da espessura da alma de projeto</i>	136
<i>Figura 7-17: Movimentação da EPS durante a produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa</i>	137
<i>Figura 7-18: Estrangulamento da alma da extremidade esquerda da laje L04A</i>	137
<i>Figura 7-19: Escorregamento da cordoalha</i>	138
<i>Figura 7-20: Topadores e a extremidade das lajes após o corte da cordoalha</i>	139
<i>Figura 7-21: Fissuração da laje L06B. a) nas laterais b) na parte inferior</i>	141
<i>Figura 7-22: Fissuração da laje L04. a) nas laterais. b) na parte inferior. Fissuração da laje L06. c) nas laterais. d) na parte inferior</i>	144

<i>Figura 7-23: Fissuração da laje L05. a) nas laterais. b) na parte inferior</i>	145
<i>Figura 7-24: Diagrama de corpo livre do mecanismo básico de resistência à força cortante</i>	146
<i>Figura 7-25: Deformação longitudinal devido ao momento fletor, força cortante, esforço axial e a protensão</i>	147
<i>Figura 7-26: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L01SE b) L01CE</i>	149
<i>Figura 7-27: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L02SE b) L02CE c) L03SE d) L03CE e) L04A f) L04B g) L06A h) L06B</i>	149
<i>Figura 7-28: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L05A b) L05B</i>	150
<i>Figura 7-29: Esquema para cálculo do encurtamento experimental da cordoalha</i>	151
<i>Figura 7-30: Escorregamento das cordoalhas após o ensaio de força cortante</i>	152
<i>Figura 7-31: Ruptura por fendilhamento no ensaio da laje L04A</i>	152
<i>Figura 7-32: Seção transversal de projeto</i>	153
<i>Figura 7-33: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 01. b) seção transversal com o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 02</i>	156
<i>Figura 7-34: Quebra da laje L05 durante a movimentação para descarte</i>	157
<i>Figura 7-35: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 03. b) seção transversal com o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 04</i>	159
<i>Figura 7-36: Interferência da régua vibratória com a alça de içamento</i>	161
<i>Figura 7-37: Variação da inclinação da régua vibratória com o topo da laje</i>	162
<i>Figura 7-38: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 05. b) seção transversal com o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 06</i>	162
<i>Figura 8-1: Controle do corpo de prova</i>	174
<i>Figura 8-2: Controle do corpo de prova</i>	175
<i>Figura 8-3: Seção transversal da laje alveolar moldada por fôrma fixa.</i>	176
<i>Figura 8-4: Tela do programa de cálculo dos coeficientes de fluência e retração.</i>	180
<i>Figura 8-5: Esquema para o cálculo da seção resistente da seção transversal.</i>	192
<i>Figura 8-6: Variação linear do efeito da protensão.</i>	199
<i>Figura 8-7: Esquema estrutural considerado para determinação do $M_{Sd,máx}$.</i>	199
<i>Figura 8-8: Esquema estrutural considerado para o ensaio da laje L04A.</i>	202

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1-1: Sistemas de produção de lajes alveolares.....</i>	<i>4</i>
<i>Tabela 2-1: Tolerâncias de fabricação de lajes alveolares.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 2-2: Resultados experimentais referentes aos ensaios da força cortante.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 2-3: Resultados experimentais referentes aos ensaios à flexão.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2-4: Comparação de resultados experimentais x teóricos nos ensaios de força cortante.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2-5: Comparação de resultados experimentais x teóricos nos ensaios de flexão.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2-6: Comparação de resultados experimentais x teóricos nos ensaios de flexão.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2-7: Comparação de resultados experimentais e valores teóricos (ABNT NBR 14861:2011).....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 2-8: Comparação de resultados experimentais x teóricos nos ensaios de flexão.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 2-9: Esquemas dos ensaios.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 2-10: Valores de resistente à flexão calculados (conforme ABNT NBR 6118:2014) e valores de ensaios laboratoriais.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 2-11: Valores de cortante resistente calculados (conforme ABNT NBR 6118:2014) e valores de ensaios laboratoriais.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 3-1: Tensão no aço σ_{sd} (MPa).....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 6-1: Características geométricas das lajes alveolares moldadas por fôrma fixa.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 6-2: Coeficiente fluência, retração, perdas inicial e final.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 6-3: Características do esquema dos ensaios de força cortante.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 6-4: Características do esquema dos ensaios de flexão.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 7-1: Determinação dos módulos de elasticidade do concreto.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabela 7-2: Determinação da resistência média do concreto à tração, a partir do momento de fissuração experimental.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 7-3: Resultados para as lajes sem estribos ensaiadas a força cortante.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 7-4: Resultados para as lajes com estribos ensaiadas a força cortante.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 7-5: Resultados para as lajes ensaiadas à flexão.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 7-6: Forças cortantes experimentais e teóricas, momento fletor experimental e de fissuração para lajes sem estribos ensaiadas a força cortante.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 7-7: Forças cortantes experimentais e teóricas, momento fletor experimental e de fissuração para lajes com estribos ensaiadas a força cortante.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabela 7-8: Resultados experimentais e teóricos, referentes à flexão.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabela 7-9: Parâmetros para a determinação da perda por ancoragem.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabela 7-10: Exemplos comparativos, variáveis: f_{cj}, f_{ck}, intensidade de protensão, para o ponto de aplicação da carga a 2,5h.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabela 7-11: Exemplos comparativos, variáveis: f_{cj}, f_{ck}, intensidade de protensão, para o ponto de aplicação da carga a 600 mm.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabela 7-12: Comparativos das características geométricas da laje Seção 01 e Seção 02.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabela 7-13: Comparativos dos momentos resistentes da laje Seção 01 e Seção 02.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabela 7-14: Comparativos das características geométricas da laje Seção 01 e Seção 02.....</i>	<i>159</i>

<i>Tabela 7-15: Comparativos dos momentos resistentes da laje Seção 03 e Seção 04.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabela 7-16: Comparativos dos momentos resistentes entre as lajes Seção 01 e Seção 03.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 7-17: Comparativos dos momentos resistentes entre as lajes Seção 02 e Seção 04.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 7-18: Comparativos das características geométricas da laje Seção 05 e Seção 06.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabela 7-19: Comparativos dos momentos resistentes da laje Seção 05 e Seção 06.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabela 8-1: Alongamento no ato da protensão.</i>	<i>178</i>
<i>Tabela 8-2: Tensão no aço σ_{sd} (MPa).</i>	<i>192</i>
<i>Tabela 8-3: Propriedades da laje alveolar e dos esforços do ensaio.....</i>	<i>202</i>

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do uso de lajes alveolares em concreto protendido que na fabricação não se usa máquinas extrusoras e tampouco máquinas moldadoras. As normas internacionais e a brasileira *ABNT NBR 14861:2011 – Lajes alveolares protendidas de estruturas de concreto pré-fabricadas - Requisitos e procedimentos* tratam de lajes que são executadas com equipamentos de extrusão ou que executam a moldagem dos alvéolos (ambas aqui para frente designadas como lajes alveolares). No caso da norma brasileira, houve uma expressiva contribuição do grupo do NETPre-UFSCar na sua redação, tendo-se inclusive feito inúmeros ensaios visando a validação de procedimentos, expressões e teorias estrangeiras (principalmente europeias e americanas). A grande maioria dos ensaios foram realizados em lajes alveolares. Devido ao alto custo de implantação de fábricas deste tipo de laje alveolares é cada vez maior o emprego de técnicas alternativas (descritas mais adiante) para obter produto similar às lajes alveolares. Embora a norma não especifique claramente que o texto é aplicável apenas às executadas com máquinas é fácil de imaginar que o comportamento de lajes executadas com outras técnicas possa apresentar diferenças. Como a geometria, o grau de compactação, aderência entre as cordoalhas e o concreto, os tipos de agregados e a consistência do concreto influenciam no comportamento, é justo pensar que pelo menos uma série de ensaios deve ser feitos com lajes executadas com procedimentos alternativos para verificar a aplicabilidade dos preceitos da ABNT NBR 14861:2011. A laje alveolar produzida sem equipamentos é denominada neste trabalho como laje alveolar moldada por fôrma fixa ou laje alveolar com fôrma fixa.

Trata-se de um estudo exploratório, de muita importância para o meio técnico e para o setor da construção industrializada tendo em vista que o uso de lajes alveolares moldada por fôrma fixa tem sido cada vez maior. É importante validar em laboratório especializado por meio de ensaios se a capacidade de carga especificada em projeto é realmente atendida ou até mesmo superior. No meio técnico, o dimensionamento e as verificações desta laje moldada por fôrma fixa são aferidos pelas equações apresentada na ABNT NBR 14861:2011 que tem como base estudo e ensaios aplicados somente em laje alveolar.

As grandes vantagens das lajes alveolares são a velocidade e eficiência de produção, além do concreto com alto grau de compactação e com baixo fator água /cimento. Porém, há um ponto fraco neste tipo de peça: a resistência relativamente pequena ao cortante. Isto se dá

porque não é possível, em virtude do processo produtivo, empregar armadura transversal passiva ou mesmo confeccionar trechos maciços próximos do apoio. Assim, basicamente, a resistência ao cortante é função da resistência à tração do concreto. Desta forma para situações em que pode haver cargas concentradas de alta intensidade próximas ao apoio a eficiência destas lajes cai. Estas situações correspondem a lajes de ponte, pavimentos industriais em que há o uso de empilhadeiras, pavimentos de pátios de portos onde a intensidade das ações é elevada e outras situações. Soma-se a estas questões a necessidade de um capital alto para implantar a fábrica e, conseqüentemente, a existência de alta demanda para o produto (volume grande de compra).

As lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, em geral, necessitam de mais tempo ou maior número de unidades produtoras instaladas para manter uma produção. Devido à maneira de execução, o concreto apresenta características distintas se comparado os dois processos. Em geral, tem grande trabalhabilidade podendo ser até auto adensável. Diferente das lajes tradicionais, a laje alternativa permite facilmente a incorporação de trechos maciços, assim como, o uso de armadura transversal, sendo são mais indicadas para as situações descritas no final do parágrafo anterior. Na Figura 1-1 são apresentadas algumas imagens das etapas do processo produtivo da laje alveolar moldada por fôrma fixa, que se utiliza poliestireno expandido para a confecção do alvéolo. Neste trabalho chama-se poliestireno expandido de EPS, a partir deste ponto. No Capítulo 5 o processo produtivo é todo explicitado fazendo as comparações com o processo produtivo de laje alveolar.

Figura 1-1: Etapas de produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, e com utilização de EPS



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2017)]

Além disto, há mais facilidade de se montar unidades produtoras próximas ao local de emprego, ou seja, é possível usar “fábricas móveis” como ocorreu na construção de parte de um estádio para a Copa do Mundo do Brasil (Arena Corinthians). É necessária utilização de fôrmas para a viabilidade do processo produtivo, diferentemente das lajes alveolares.

1.1. USO DA LAJE ALVEOLAR MOLDADA POR FÔRMA FIXA

Os pavimentos compostos por lajes alveolares protendidas pré-fabricados são largamente difundidos no mundo inteiro. O benefício em utilizar tal elemento para a composição de um pavimento está no baixo custo da mão de obra utilizada em canteiro, peso próprio reduzido devido a presença de vazios, alta qualidade final, um baixo consumo de concreto e se comparado com a laje maciça de concreto, principalmente, o fato de ser pré-moldado. Além disso, não necessita nem de fôrmas e nem escoramento gerando maior rapidez e economia de materiais em canteiro.

A indústria de pré-fabricado busca atender as demandas da sociedade, oferecendo, com seus produtos: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis ao trabalho. A utilização das estruturas pré-fabricadas permite obter significativa eficiência estrutural, com elementos mais esbeltos. Além disso, garante o uso otimizado dos materiais, com a redução de desperdício de recursos.

Segundo CATOIA (2011), os elementos para os pisos estão entre os produtos pré-moldados mais antigos. As primeiras lajes alveolares foram desenvolvidas na década de 1950, quando evoluíram as técnicas de protensão em longas pistas. Por mais de 30 anos os tipos de unidades produzidas pouco mudaram.

De acordo com PCI (2010) uma laje alveolar é um elemento de concreto protendido (pré-tração) com vazios contínuos proporcionando a redução de peso e, conseqüentemente, custo. Como benefício os vazios permitem passagem de tubulações e são usados principalmente como sistemas de pisos ou coberturas. As lajes alveolares também têm aplicações como painel de fechamento e lajes de pontes.

São disponíveis hoje sete métodos para a produção de lajes alveolares (PCI 2010). Como cada sistema de produção é patenteado. Os fabricantes geralmente desenvolvem o

processo de produção de acordo com suas experiências, com tem apoio técnico dos produtores dos equipamentos e de uma rede de associados. A Tabela 1-1 apresenta as setes classificações para o desenvolvimento dos alvéolos.

Tabela 1-1: Sistemas de produção de lajes alveolares

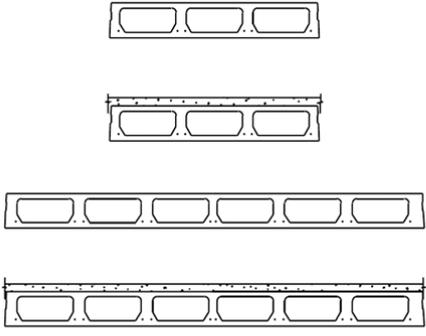
Fabricante	Tipo de máquina	Tipo de concreto / Slump	Forma do alvéolo
Dy-core	Extrusora	Seco / baixo	Circular
Dynaspan	Deslizante	Úmido / normal	Circular
Elematic	Extrusora	Seco / baixo	Tubo circular
Flexicore	Fôrma fixa	Úmido / normal	Mangueiras pneumáticas
Spancrete	Deslizante	Seco / normal	Tubo
SpanDeck	Deslizante	Úmido / normal	Agregado de enchimento
Ultra-Span	Extrusora	Seco / baixo	Rosca sem fim

[Fonte: adaptado PCI Tabela 1.1 (2010)]

Na Figura 1-2 pode ser visto uma seção de laje alveolar produzida com a utilização de EPS, cujo fabricante é a empresa Fabcon e está situado em Savage Minnesota. Em seu portal www.fabcon-usa.com estão disponíveis alguns vídeos do processo produtivo destas lajes. Na Figura 1-3 podem ser vistos algumas etapas da produção desta laje.

Figura 1-2: Seção transversal de laje alveolar. Fabricante Fabcon

Nome comercial: SpanDeck®
Organização de Licenciamento: Fabcon, Associado, Savage, Minnesota

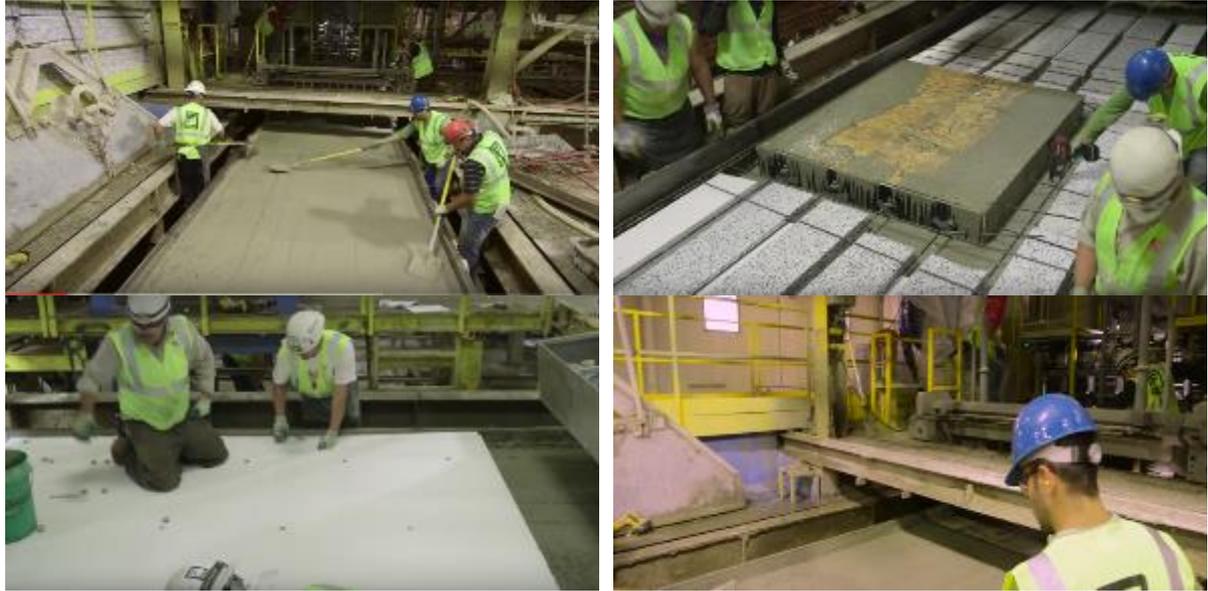


Seção largura x espessura (cm)	Sem capa				Com capa		
	A (m²)	γ_{cg} (m)	I (m⁴)	w (m³)	γ_{cg} (m)	I (m⁴)	w (m³)
122 x 20,32	0,1587	0,095250	6,722E-04	7,057E-03	0,140970	1,162E-03	8,243E-03
122 x 30,48	0,1923	0,149098	2,269E-03	1,522E-03	0,203454	3,270E-03	1,607E-03
244 x 20,32	0,3077	0,094742	1,345E-03	1,420E-03	0,140462	2,349E-03	1,672E-03
244 x 30,48	0,3792	0,148844	4,541E-03	3,051E-02	0,202692	6,539E-03	3,226E-03

Nota: Todas as seções não estão disponíveis de todos os produtores. Verifique a disponibilidade com os fabricantes locais.

[Fonte: PCI Tabela 1.1 (2010)]

Figura 1-3: Etapas de produção de laje alveolar moldada por fôrma e com utilização de EPS. Fabricante Fabcon



[Fonte: site www.fabcon-usa.com (2016)]

Em paralelo ao crescente mercado para a utilização de lajes produzidas com equipamentos, surgiu a oportunidade para alguns pré-fabricantes desenvolverem alguns sistemas de lajes que seguem o mesmo princípio da laje alveolar, ou seja, a retirada da massa de concreto onde o mesmo não tem contribuição de resistência à flexão.

Dentre as tecnologias para a fabricação destas lajes, destacam-se:

- A produção de laje cujo alvéolo é formado por tubos metálicos, que após o endurecimento do concreto o tubo é sacado.

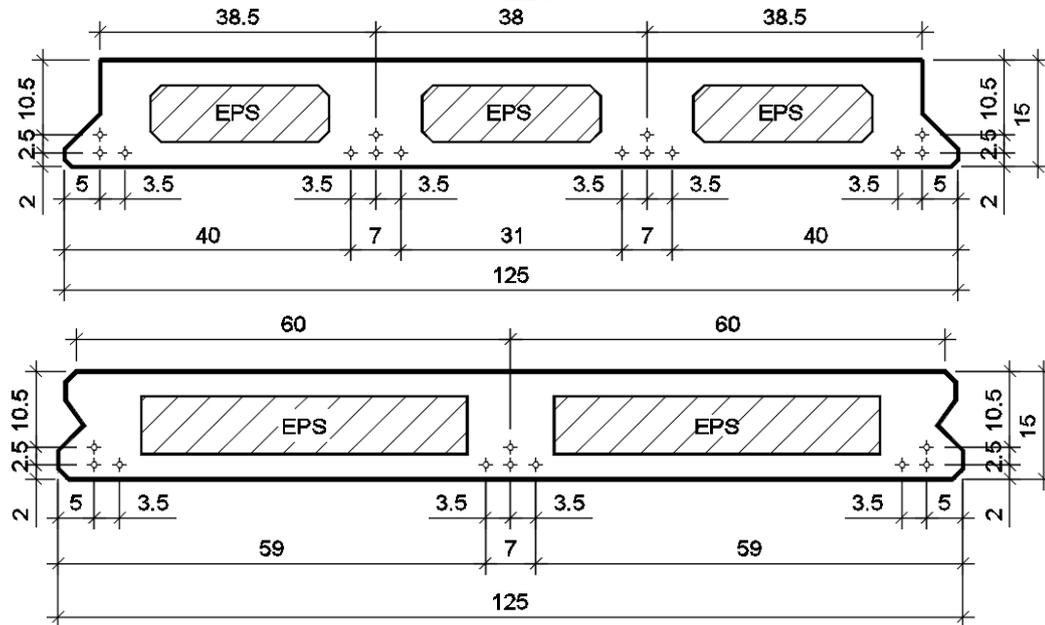
- Utilização de mangueiras de borracha com a utilização de ar comprimido; após o endurecimento do concreto é aplicada uma sucção na mangueira para que haja o descolamento junto a superfície de contato. Esta mangueira de borracha é reutilizada para as concretagens posteriores.

- Uso de EPS (poliestireno expandido) de forma usualmente retangular. Este EPS fica permanentemente embutido dentro do elemento. Esse sistema produtivo permite uma grande variedade de seções transversais para a laje alveolar, pois é perfeitamente possível a confecção das mais variadas formas do EPS.

Apresenta-se na Figura 1-4 duas seções transversais de laje alveolar moldada por fôrma fixa, e com utilização de EPS para a formação dos alvéolos. Como pode ser visto para

uma mesma altura de laje (15cm) as seções das lajes são distintas entre sim. As características das lajes utilizadas para os ensaios estão de acordo com a primeira laje da Figura 1-4.

Figura 1-4: Seções transversal de laje alveolar moldada com fôrma fixa, e com a utilização de EPS



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados]

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho podem ser agrupados como:

- Caracterizar o comportamento estrutural de um produto, previsto na norma brasileira, denominado laje alveolar moldada por fôrma fixa, usada comercialmente, cujos ensaios não se tem notícias;
- Descrever as principais semelhanças e divergências no processo produtivo da laje alveolar moldada por fôrma fixa com a laje alveolar;
- Usar ensaios padrões de lajes alveolares, verificando se os mesmos se aplicam a este tipo de laje. (o manual FIP (1992) e a norma EN 1168:2008);
- Verificar se esta técnica aplicada ao processo produtivo influencia no comportamento estrutural, para os mecanismos de flexão, cisalhamento e ancoragem.

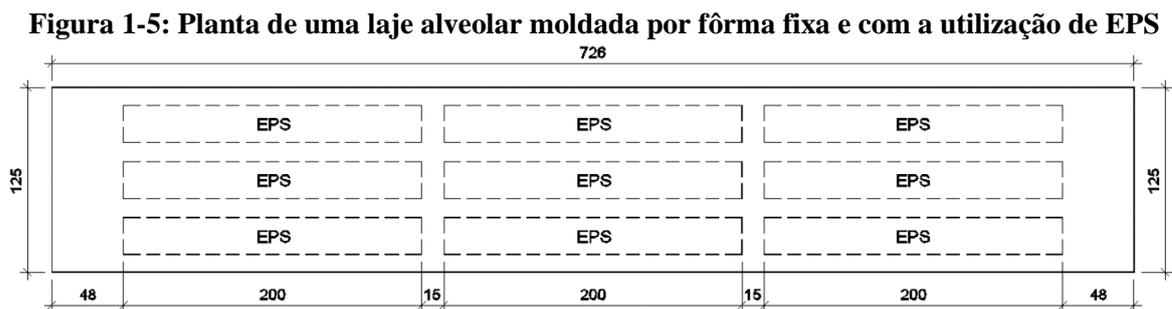
- Validar os procedimentos de cálculo da ABNT NBR 14861:2011 e ABNT NBR 6118:2014, por meio da comparação dos resultados obtidos nos ensaios, com os cálculos analíticos;
- Realizar um estudo teórico, com emprego de equacionamento existente na literatura técnica, a fim de aprofundar o conhecimento quanto ao comportamento dessas lajes.

1.3. JUSTIFICATIVA

A grande utilização de lajes alveolares protendidas com processos alternativos já justificaria os ensaios que serão feitos. Há ainda a possibilidade de se propor ensaios específicos para este tipo de produto.

A laje alveolar moldada por fôrma fixa corresponde a um elemento pré-moldado extremamente versátil, que pode ser aplicado nos principais tipos de sistemas construtivos encontrados no país, sejam em edificações de alvenaria, de concreto ou de aço.

Este sistema alternativo de produção de lajes permite o posicionamento de armadura frouxa e a interrupção do EPS, obtendo assim uma região maciça nas extremidades proporcionando, conseqüentemente, um aumento na capacidade resistente a força cortante. A Figura 1-5 apresenta a planta de um exemplo de laje alveolar moldada por fôrma fixa.



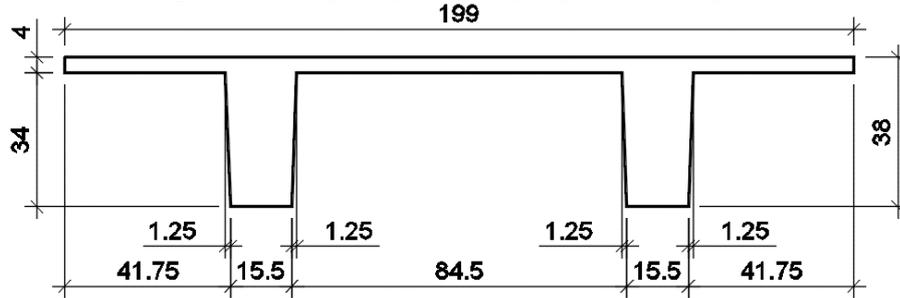
[Fonte: próprio autor]

Atualmente, as lajes alveolares estão situadas entre os elementos pré-moldados mais utilizados no mundo, principalmente na Europa Ocidental e na América do Norte, cuja técnica de execução é bem desenvolvida.

De acordo com SIRTOLI (2015) as lajes alveolares são o carro chefe das empresas e é a peça pré-fabricada que possui maior produção. Na maioria dos casos, as fábricas antes de

iniciarem uma linha de produção de laje alveolar, produziam a laje tipo PI ou duplo T (ver Figura 1-6) que podem ser somente armadas ou protendidas. Esse tipo de laje perdeu força por diversos fatores comparando com as alveolares, pela execução e produção ser mais lenta, maior custo de produção, maior volume de concreto e, conseqüentemente, maior preço. O acabamento inferior também não é sempre aceito, pois apresenta uma superfície que não é plana.

Figura 1-6: Seção típica de laje tipo PI ou duplo T



[Fonte: próprio autor]

A laje alveolar moldada por fôrma fixa também está sendo difundida pelo fato de não ser necessário o investimento financeiro em equipamento (moldadora e extrusora) para a produção das mesmas. Isso tem atraído pequenos e até mesmo grandes pré-fabricantes.

Há relatos de empresas de grande porte que possui o sistema produtivo de laje alveolar produzida com equipamento, que também desenvolveram pistas menores para a produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa. O objetivo desta pista de produção alternativa é atender a demanda remanescente, por exemplo, para finalizar a fabricação das lajes de uma determinada obra onde resta apenas a produção de 3 ou 4 lajes, ou seja, a quantidade de lajes a ser produzidas não contemplaria toda a extensão da pista de protensão disponível. Essa pequena quantidade de peças é perfeitamente viável de ser produzidas de forma alternativa. Se o fabricante não dispôr deste recurso, as lajes remanescentes seriam produzidas na pista de protensão disponível, o que impactaria em um maior custo produtivo, principalmente relacionado com as cordoalhas, pois a pista não seria totalmente preenchida, gerando desperdício.

1.4. METODOLOGIA

A técnica ou processo aplicado para que possa chegar aos objetivos propostos para esta pesquisa é fundamentado em um estudo teórico-experimental. O trabalho é dividido em

quatro partes: revisão bibliográfica, estudos analíticos, análise experimental e comparação entre as formulações analíticas e os resultados experimentais.

A primeira fase da pesquisa foi composta por uma revisão da literatura, abrangendo, principalmente, os seguintes temas: teoria do concreto protendido, cálculo de laje alveolar e laje alveolar moldada por forma fixa, considerações sobre o processo produtivo, padronização dos ensaios de lajes alveolares, não só através dos artigos publicados, mas também dos principais códigos nacionais e internacionais.

A segunda fase da pesquisa contempla os cálculos teóricos. Esses estudos incluem: cálculo da laje alveolar moldada por forma fixa (força cortante e flexão).

A terceira fase da pesquisa foi composta pelos experimentos. Os ensaios foram realizados no laboratório NETPre-UFSCar, que conta com equipamentos e experiência em estudos de lajes alveolares.

A quarta fase constituiu na comparação entre os resultados obtidos pelas formulações teóricas (cálculos analíticos) e os resultados encontrados nos ensaios experimentais. Com isso foi possível verificar se as equações inicialmente desenvolvidas para as lajes alveolares também satisfazem as lajes alveolares moldadas por forma fixa.

Os ensaios foram planejados de acordo com as recomendações normativas e a experiência do NETPre-UFSCar.

✓ Ensaios de força cortante: Para avaliar a resistência das lajes alveolares ao cisalhamento (entende-se aqui que o cisalhamento é oriundo apenas de esforço cortante não tendo a participação de cisalhamento oriundo de momento torçor) utiliza-se o ensaio padrão no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN 1168:2008.

✓ Ensaios de flexão: O ensaio pode ser feito, de acordo com o manual FIP (1992), que recomenda uma laje com vão equivalente de 3m, sendo a força aplicada no meio do vão.

1.5. APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Após a apresentação deste primeiro capítulo, de caráter introdutório, este trabalho é composto por mais oito capítulos a seguir.

No *Capítulo 2 (ASPECTOS SOBRE OS MECANISMOS DE RUPTURA)* apresenta-se os conceitos básicos sobre os mecanismos de ruptura das lajes alveolares, uma breve revisão bibliográfica e alguns resultados de ensaios realizados.

No *Capítulo 3 (PRESCRIÇÕES NORMATIVAS)*, apresenta-se as principais recomendações normativas necessárias para desenvolvimento deste trabalho, tais como: prescrições da ABNT NBR 14861:2011, ABNT NBR 6118:2014 e EN 1992-1-1:2004, valores da resistência de aderência, comprimento básico de ancoragem, comprimento de transferência, escorregamento da cordoalha.

No *Capítulo 4 (ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO)*, trata das características dos ensaios a força cortante e ao momento fletor, e a caracterização dos materiais a partir do resultados experimentais.

No *Capítulo 5 (PROCESSO DE PRODUÇÃO)*, são apresentadas as principais etapas do processo produtivo de laje alveolar produzida por fôrma fixa destacando as semelhanças e as diferença do processo produtivo de laje alveolar.

No *Capítulo 6 (PROGRAMA EXPERIMENTAL)*, apresenta-se as informações das características dos elementos que foram utilizados para a realização dos ensaios.

No *Capítulo 7 (ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS)*, apresenta os resultados dos ensaios a as suas respectivas análises.

No *Capítulo 8 (CONSIDERAÇÕES FINAIS)*, é apresentada a conclusão do trabalho e algumas sugestões para pesquisa futuras.

Em seguida são indicadas, em ordem alfabética, as referências bibliográficas, que incluem as obras consultadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

No final, encontram-se os apêndices.

Nos apêndices A, B, C, D, E e F são apresentados exemplos de cálculo, sendo referentes a características geométrica no apêndice A, coeficiente de fluência e retração no apêndice B, perdas de protensão no apêndice C, à flexão nas unidades alveolares protendidas moldadas por fôrma no apêndice D, e a força cortante no apêndice E, e ruptura por ancoragem no apêndice F.

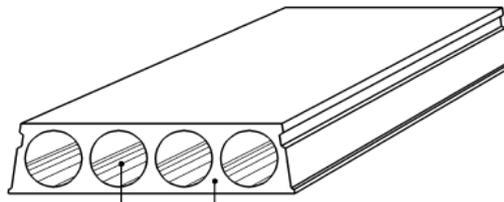
2. ASPECTOS SOBRE OS MECANISMOS DE RUPTURA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca de algumas possibilidades de ruptura das lajes alveolares.

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A definição de laje alveolar segundo a EN 1168:2008 é uma peça de concreto protendido (pré-tração) de largura constante, composta pelo talão superior e inferior, interligados pela nervura, constituídos por alvéolos longitudinais cuja seção transversal é constante e apresenta o eixo vertical simétrico, conforme representado na Figura 2-1. De acordo com a definição da norma europeia não se faz nenhuma menção quanto a ausência de armadura transversal, diferentemente da norma brasileira.

Figura 2-1: Exemplo de laje alveolar de acordo com a EN 1168:2008

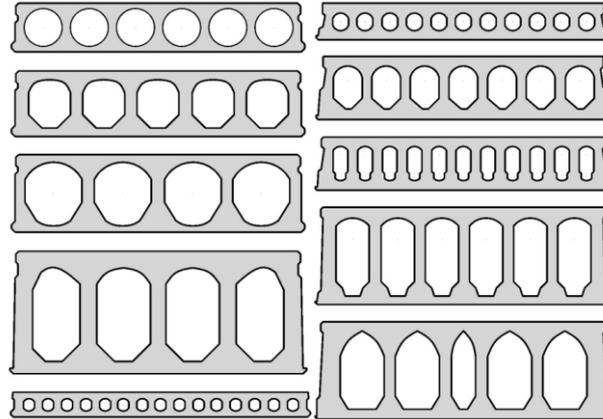


[Fonte: EN 1168:2010 – Figura 1]

De acordo com CEB-FIB (2016), as lajes alveolares são normalmente utilizadas em pavimentos com apoios unidirecionais. Podem ser usadas em balanço, com continuidade e como painéis de fechamento. As lajes são protendidas (pré-tração) com predominância na borda inferior, ocasionalmente, na borda superior, constituídas de fios individuais ou cordoalhas, sem qualquer armadura de cisalhamento. Os arranjos de protensão podem variar muito dependendo do sistema de produção praticadas por cada fabricante. Os alvéolos têm como um dos objetivos reduzir o peso próprio. Os elementos estão disponíveis em alturas diferentes para satisfazer as várias necessidades de desempenho quanto aos vãos e carregamentos. As alturas mais comuns são 150, 200, 250, 300 e 400 mm; outras alturas disponíveis em alguns países são de 265, 320, 450 e 500 mm. As seções transversais típicas estão apresentadas na Figura 2-2. A porcentagem

de vazios (volume de vazios para o volume total da laje maciça de mesma altura) está entre 30% e 50%.

Figura 2-2: Seções transversais típicas de lajes alveolares



[Fonte: FIB-CEB:2016 – Figura 2.1-1]

As lajes alveolares são produzidas em fábricas bem desenvolvidas com tecnologias avançadas e que exigem pouco trabalho de acordo com ASSAP (2002). São produzidas de forma contínua, protendidas e com utilização de máquinas de moldagem ou extrusão, centrais de concreto com controle automático das dosagens dos materiais, e baixa relação água/cimento. A utilização de processo de cura é outro componente essencial. A Figura 2-3 apresenta alguns modelos de seções transversais típicas de lajes alveolares de acordo com ASSAP (2002).

Figura 2-3: Seções transversais típicas de lajes alveolares

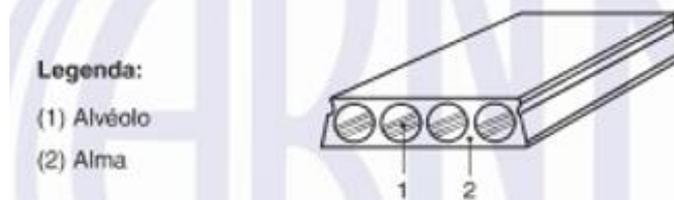


[Fonte: ASSAP (2002) – Figura 1.1]

Segundo a ABNT NBR 14861:2011 a definição para laje alveolar é uma peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas

condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária, com ausência de armadura transversal de cisalhamento. A seção transversal é alveolar, com a presença de almas de concreto e alvéolos, conforme representado na Figura 2-4.

Figura 2-4: Exemplo de laje alveolar de acordo com a ABNT NBR 14861:2011

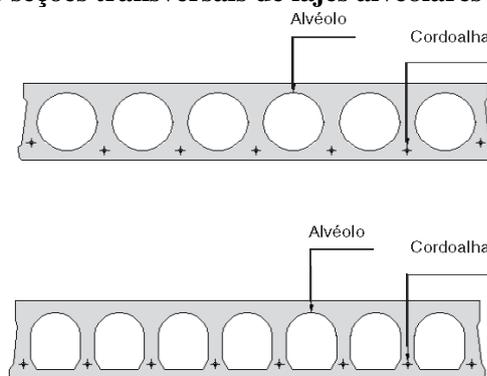


[Fonte: ABNT NBR 14861:2011 – Figura 1]

Na definição de laje alveolar descrita destaca-se que o processo produtivo de produção deve ser industrial, sob rigorosas condições de controle e qualidade e por ausência de armadura transversal. No capítulo 5 é apresentado o processo produtivo da laje alveolar moldada por fôrma fixa, onde são discutidas as principais semelhanças e divergências entre os dois processos produtivos.

A ABNT NBR 14861:2011 cita que a geometria de alvéolos deve ser definida em projeto, conforme o fabricante e seus equipamentos utilizados. A Figura 2-5 mostra exemplos de geometria de alvéolos que podem ser adotados. As duas seções transversais apresentadas são características de lajes produzidas por equipamentos, a primeiro por extrusora e a segundo por moldadora.

Figura 2-5: Exemplos de seções transversais de lajes alveolares e de geometria de alvéolos



[Fonte: ABNT NBR 14861:2011 – Figura 3]

A ABNT NBR 14861:2011 no *Capítulo 11 – Métodos de produção das lajes alveolares* destaca no item *11.1 – Generalidades*, que as lajes alveolares podem ser moldadas

por fôrmas fixas ou produzidas por equipamentos, como máquinas extrusoras ou moldadoras. As etapas de produção a serem atendidas são as identificadas nos itens 11.2 a 11.10 desta mesma norma, sendo que as peculiaridades de cada método, quando necessário, encontram-se descritas nas próprias etapas.

As principais etapas descritas são:

- ✓ Generalidades;
- ✓ Planejamento de produção;
- ✓ Preparação e protensão das cordoalhas;
- ✓ Concretagem;
- ✓ Cura;
- ✓ Corte;
- ✓ Liberação da protensão;
- ✓ Verificação do escorregamento de cordoalhas;
- ✓ Superfície e fissuras;
- ✓ Lançamento, transporte e armazenamento;

Cada etapa citada é devidamente detalhada, porém pode ser visto que a maioria das observações estão diretamente aplicadas às lajes alveolares e cita que as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa devem seguir as mesmas recomendações. Por exemplo, na etapa concretagem no item 11.4.2 destaca o item das tolerâncias dimensionais (tolerâncias apresentadas na tabela 1 da NRB 14861:2011). Na Tabela 2-1 mostra-se todas as tolerâncias permitidas para a produção de lajes alveolares, essas tolerâncias para o processo de lajes alveolares moldadas por fôrma fixa podem ser impraticáveis, pois cada fabricante desenvolve a própria tecnologia de produção baseada em experiências. Não existe uma padronização para este processo, diferentemente das lajes alveolares que pelo fato de se utilizar equipamentos, as margens para alternativas de produção são mais restritivas.

Tabela 2-1: Tolerâncias de fabricação de lajes alveolares		
Dimensões		Tolerâncias mm
Comprimento (L)	$L \leq 5$ m	± 10
	$5 \text{ m} < L \leq 10$ m	± 15
	$L > 10$ m	± 20
Altura da laje (h)	$h \leq 150$ mm	-5, +10
	$h \geq 250$ mm	± 15
	$150 \text{ mm} < h < 250$ mm	Interpolação linear
Espessura da alma	b_w	- 10 e + 15
	Σb_w	- 20 ^a
Recortes/vazios		± 20
Posição de chapas metálicas ou furos para fixação (d)		± 15
Posição do cabo de protensão (vertical e horizontal) (e)		± 10
Esquadro de cantos		± 5
Esquadro diagonal	$L \leq 10$ m	± 15
	$L > 10$ m	± 2 mm por metro
Planicidade (b no plano)	$L \leq 5$ m	± 3 mm
	$L > 5$ m	$\pm L/1000$
Distorção	Largura ≤ 1 m	± 3 mm a cada 30 cm
	Largura > 1 m	± 10 mm
Linearidade (b)		$\pm L/1000$
Alinhamento transversal (j)		$\pm L/500$
onde L é o comprimento do elemento pré-moldado e demais dimensões são representadas na Figura 2.		
^a 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 – Tabela 1]		

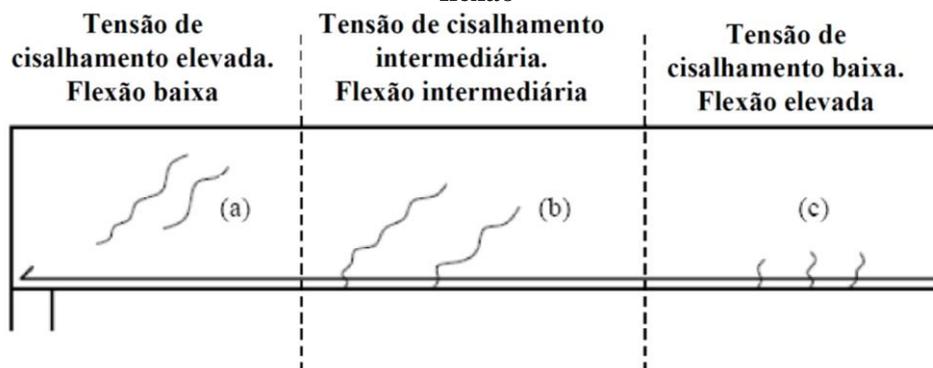
De forma geral, as lajes alveolares podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura, podem ocorrer mais do que um dos mecanismos próximo ao colapso da peça.

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

Das situações listadas anteriormente, percebe-se que há diversos mecanismos que dependem da flexão, do cisalhamento devido a força cortante ou de ambos combinados. Isto fica mais claro quando se analisa um elemento biapoiado (no caso de concreto armado) como ilustrado na Figura 2-6, submetidos a esforços de flexão e cortante.

Pode-se perceber na Figura 2-6 que há três diferentes configurações de fissuras. Próximo ao apoio, onde o cisalhamento é maior e o momento quase nulo, as fissuras inclinadas de cisalhamento aparecerão na nervura quando a tensão de tração principal alcançar à resistência a tração do concreto no ponto crítico. No caso de carregamento distribuído, onde as regiões centrais da laje possuem momentos mais elevados e cisalhamento reduzido, é mais comum a incidência de fissura de flexão. Entretanto nas regiões intermediárias, as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento, onde a tensão de cisalhamento é mais elevada. Em geral, estas fissuras são denominadas fissuras de cisalhamento e flexão, pois de fato tem-se uma interação dos mecanismos de flexão e de cisalhamento, sendo que o mecanismo de ruptura nem sempre é bem definido, mas sim é o resultado da combinação de mecanismos.

Figura 2-6: Elemento de concreto protendido submetido à flexão e cisalhamento, a) Fissuras na nervura devidas ao cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão



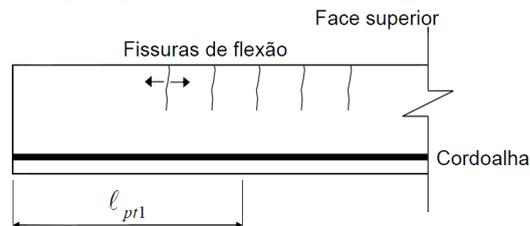
[Fonte: Rettne e Edekling (2006)]

2.1.1. MECANISMOS DE RUPTURA POR FLEXÃO

Segundo PAJARI (1989) e RETTNE e EDEKLING (2006) os mecanismos de ruptura na flexão em lajes alveolares podem estar associados aos seguintes mecanismos isolado ou por combinação deles:

✓ Ruptura por tração na face superior da laje devida a protensão, ruptura em vazio, caracterizada pelo aparecimento de fissuras junto à borda superior e próximas ao apoio Figura 2-7; este tipo de ruptura não ocorre durante um ensaio, pois deve ocorrer na liberação da protensão na fábrica.

Figura 2-7: Fissuras de tração que ocorrem na face superior da laje devido a protensão



[Fonte: Rettne e Edekling (2006) apud Catoia (2009)]

- ✓ Ruptura das cordoalhas por tração devida à solicitação por flexão.
- ✓ Ruptura do concreto à compressão devida à solicitação por flexão.

Para o caso do ensaio de flexão por meio da aplicação de um carregamento concentrado, é preciso se ter certeza de que a seção onde ocorre a ruptura seja do tipo (c) Figura 2-6. Caso contrário, ocorrerá a interação de cisalhamento e flexão.

2.1.2. MECANISMOS DE RUPTURA POR FORÇA CORTANTE

Rupturas por cisalhamento, que na realidade são ruínas ocasionadas pela combinação de força cortante e momentos fletores, são caracterizadas por pequenas flechas e falta de ductilidade. Às vezes há pequeno aviso antes da ruptura ocorrer, e isso torna a ruptura por cisalhamento particularmente indesejável.

De acordo com YANG (1994) os mecanismos de falha devido ao cisalhamento são os seguintes:

- ✓ Falha da nervura por tração devida ao cisalhamento;
- ✓ Falha por compressão no concreto devida ao cisalhamento;
- ✓ Falha por escorregamento devido ao cisalhamento ao longo de uma fissura inclina;
- ✓ Falha de ancoragem dos cabos.

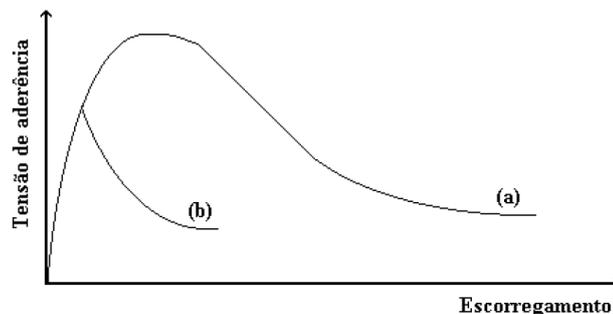
De acordo com MACIEL¹ (2017), existem alguns modos de ruptura por força cortante encontrados na literatura quando se trata de lajes alveolares, sendo que os que mais se destacam são: mecanismo de ruptura por flexo-cortante, que ocorre em regiões previamente fissuradas por flexão; e o mecanismo de ruptura por tração diagonal, que se desenvolve antes da ocorrência de fissuras de flexão.

Para um estudo mais detalhado sobre os mecanismos de ruptura à força cortante de lajes alveolares recomenda-se a leitura dos seguintes trabalhos: MARQUESI (2014) e MACIEL¹ (2017).

2.1.3. MECANISMOS DE RUPTURA POR FALHA DE ANCORAGEM

Existem, basicamente, dois modos de ruptura relacionados à perda da aderência: a ruptura por arrancamento, e a ruptura por fendilhamento. A Figura 2-8 apresenta o gráfico característico para os dois tipos de ruptura, em que a letra (a) corresponde a arrancamento e a letra (b), a fendilhamento.

Figura 2-8: Representação gráfica para as rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)



[Fonte: adaptado Dumêt (2003)]

Pela Figura 2-8, percebe-se que a ruptura por arrancamento é mais dúctil que a por fendilhamento, e mobiliza uma tensão de aderência maior, para peças semelhantes.

Segundo DUMÊT (2003), existe uma grande variedade de modos de ruptura associados a esses dois, especialmente quando a peça é posta em serviço e passam a atuar as solicitações normais e tangenciais. O tipo de ruptura que uma peça irá sofrer é influenciado por vários fatores: o tipo de armadura (barra, fio ou cordoalha), o tipo de conformação superficial da armadura (lisa ou nervurada), o diâmetro da barra, a existência ou não de armaduras de

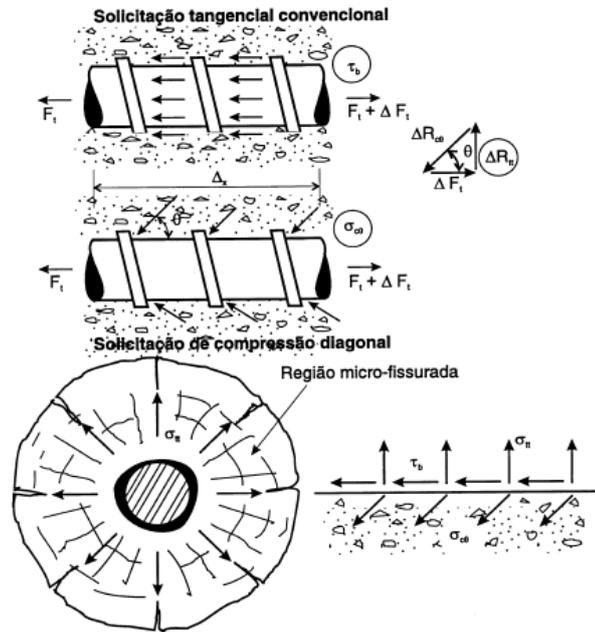
confinamento, a distância entre barras de uma mesma camada, o cobrimento, a tensão na armadura, a qualidade do concreto, e a condição superficial da barra, entre outros. Esses fatores que, obviamente, influenciam na aderência das peças de concreto armado e protendido. Na literatura técnica, porém, existem várias discordâncias sobre a maior ou menor influência desses fatores na aderência, chegando mesmo, em alguns casos, a conclusões contrárias. Isso se deve, principalmente, ao fato de que os parâmetros de ensaio, os materiais utilizados e as condições ambientais apresentam variações muito grandes de uma pesquisa para a outra, o que dificulta a generalização dos resultados.

De maneira geral, quando uma barra começa a ser solicitada, inicialmente a aderência é mantida pelas forças coesivas provindas da adesão. Essa parcela, porém, é rapidamente destruída, seja devido a pequenos escorregamentos localizados, seja pela redução do diâmetro da armadura (efeito de Poisson), por conta do aumento da tensão. Passam, então a agir as forças de atrito. A partir do momento que o concreto começa a fissurar, as forças de atrito vão sendo reduzidas e a aderência passa a ser função, praticamente, da aderência mecânica proveniente da irregularidade da superfície das barras.

Para as barras lisas, como a aderência mecânica não fornece grande ajuda, a barra vai perdendo a aderência à medida que vão sendo destruídas as forças de atrito. Esse processo leva, normalmente, a uma ruptura por arrancamento da barra.

Já para as barras nervuradas, como a aderência passa a ser governada pela aderência mecânica, quando começa a diminuir a aderência por atrito, as nervuras agem como pontos de apoio de bielas comprimidas, que impedem o deslocamento relativo da barra. Em contrapartida, aparecem tensões de tração perpendiculares às bielas, que geram um anel de tensão ao redor da armadura, como mostra a Figura 2-9.

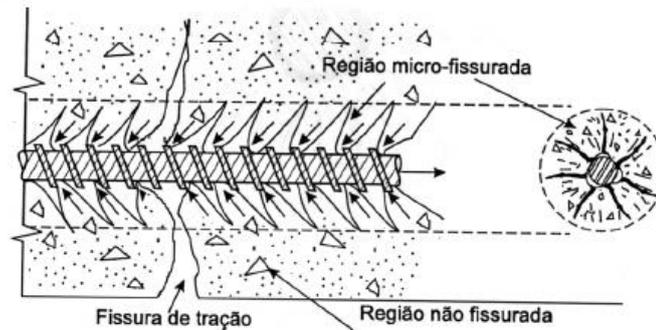
Figura 2-9: Transferência de esforços por aderência



[Fonte: adaptado Fusco (1995)]

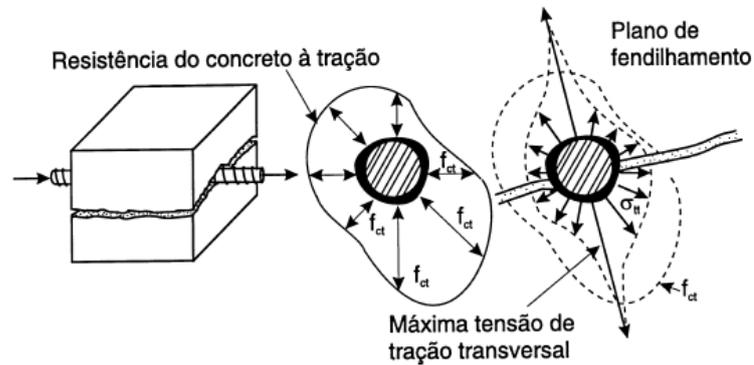
À medida que vai aumentando a força da armadura, vai havendo uma pulverização do concreto ao redor da barra, devido à compressão exercida pelas nervuras (Figura 2-10).

Figura 2-10: Fissuras e forças ao redor de barra tracionada



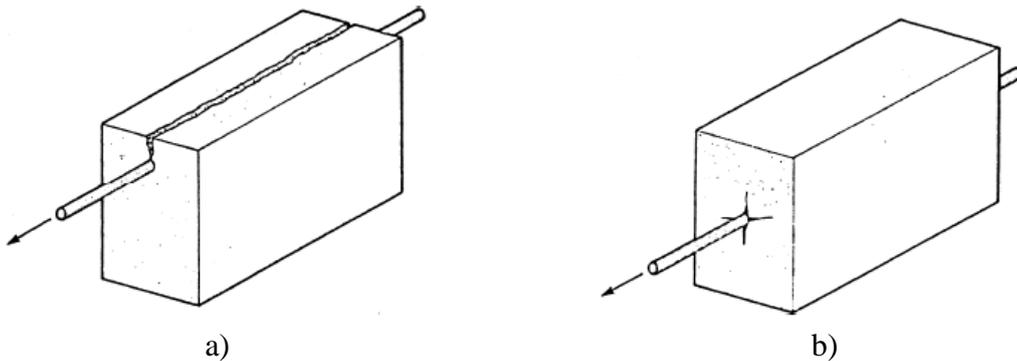
[Fonte: adaptado Fusco (1995)]

Para as barras de alta aderência (nervuradas), antes que ocorra a pulverização total do concreto, a barra escorregue (deixando um buraco no concreto com o diâmetro igual à soma do diâmetro da barra mais duas vezes a altura das nervuras), dá-se o fendilhamento da peça, devido às altas tensões de tração (Figura 2-11).

Figura 2-11: Fendilhamento longitudinal do concreto

[Fonte: adaptado Fusco (1995)]

Esses dois modos de ruptura apresentam padrões de fissuração distintos, como mostra a Figura 2-12.

Figura 2-12: a) rupturas por fendilhamento, b) rupturas por arrancamento

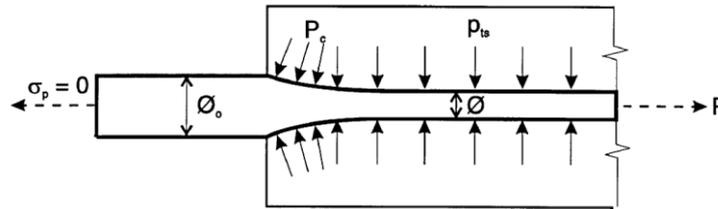
[Fonte: Collins & Mitchell (1997) apud Dumêt (2003)]

As cordoalhas apresentam um comportamento próprio, devido à forma helicoidal dos fios. Se for permitido o giro da cordoalha, enquanto ela vai perdendo a aderência, sua ruptura será por arrancamento, pois não serão mobilizadas tensões radiais de tração. Se o giro for impedido, seja por uma ancoragem externa, seja pelo efeito Hoyer, a cordoalha gera tensões radiais de tração, podendo apresentar o fendilhamento.

Vale ressaltar que a descrição anterior é característica, principalmente, do comportamento durante ensaios de arrancamento. Quando a peça é posta em serviço, esses comportamentos são afetados, em maior ou menor grau, pelos diversos fatores citados no início deste item, podendo inclusive levar ao fendilhamento de barras lisas, ou ao arrancamento de barras nervuradas. Outro aspecto que influencia na aderência é o cisalhamento, pois as fissuras diagonais de cisalhamento estão intimamente associadas ao fendilhamento.

O efeito Hoyer nada mais é do que a manifestação do efeito de Poisson nas extremidades das peças protendidas. A diminuição da tensão na cordoalha, devida às perdas de protensão, também podem causar efeito semelhante (Figura 2-13).

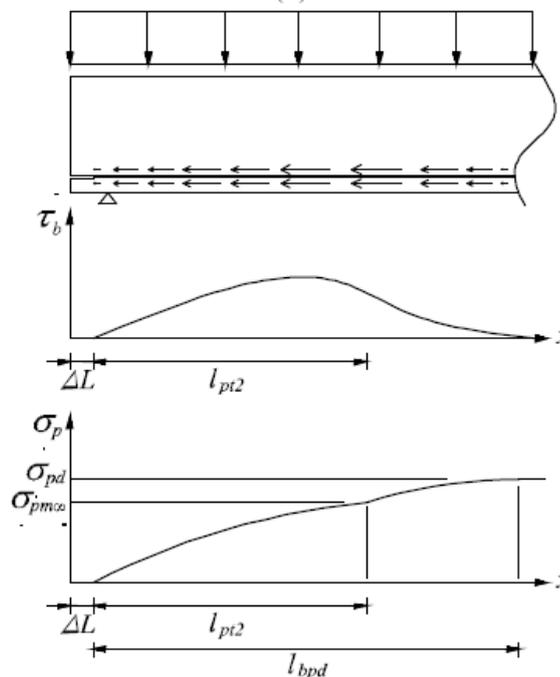
Figura 2-13: Efeito Hoyer



[Fonte: adaptado de Fusco (1995)]

Quando a laje é colocada em situação de carga, devido ao acréscimo de tensão na armadura, ocorre um efeito contrário ao efeito Hoyer decorrente da redução do diâmetro do cabo e conseqüentemente, uma redução na tensão de aderência. Nesse caso, é necessário um comprimento de ancoragem (l_{bpd}) maior para que se possa suportar aos esforços de protensão e as variações de tensão provocadas por carregamentos externos (ver Figura 2-14).

Figura 2-14: Ancoragem da armadura ativa sob efeito de carregamento externo



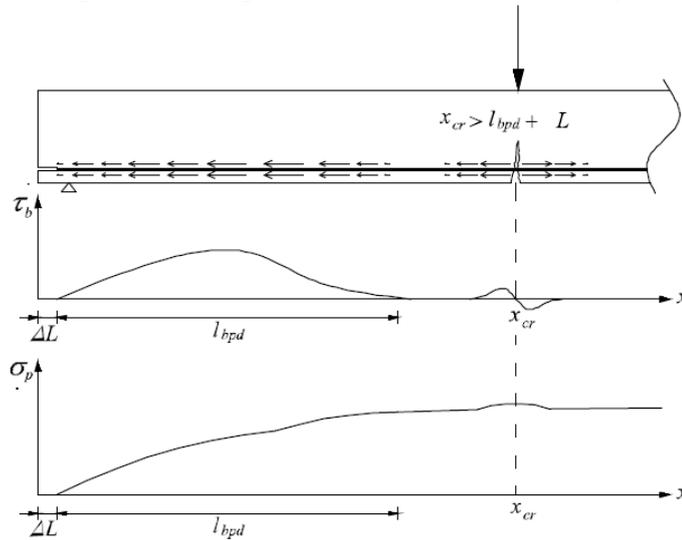
[Fonte: adaptado de Araújo (2011)]

No item 3.4 são definidas algumas das variáveis aqui apresentadas.

As ocorrências de fissuras de flexão nas proximidades do apoio, na região de ancoragem, causam perturbações nas tensões e a ancoragem é comprometida. Então surgem mecanismos complementares responsáveis por redistribuir os esforços de modo a conservar o equilíbrio.

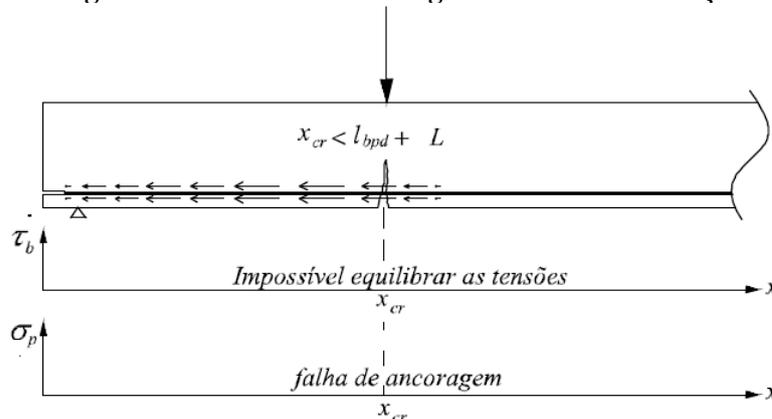
Nos casos usuais das peças pré-tracionadas a variação de tensão na armadura próxima às regiões de ancoragens é muito pequena. Contudo, havendo fissuras de flexão próximas a essas regiões, as variações de tensões serão mais representativas e o comprimento disponível até o apoio deverá ser suficiente para o equilíbrio de tensões (Figura 2-15). Caso contrário, a perturbação de tensões ocasionada pela fissuração não será equilibrada e acarretará a perda de ancoragem e ruína da peça. (Figura 2-16).

Figura 2-15: Equilíbrio de tensões na fissuração



[Fonte: adaptado de Araújo (2011)]

Figura 2-16: Perda de ancoragem devido a fissuração

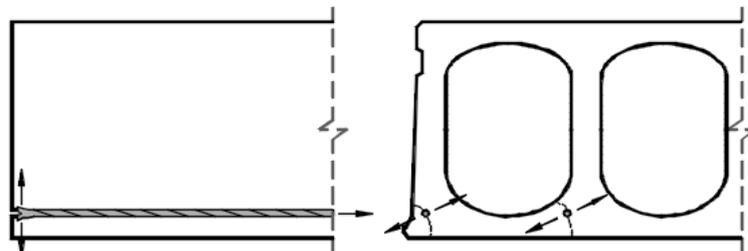


[Fonte: adaptado de Araújo (2011)]

Alguns tipos mais comuns de fissuras devido a concentração de tensões em zonas de ancoragem são classificados na literatura em inglês, porém, com alguma precisão estes termos podem ser traduzidos para o português como: explosão (*bursting*), separação (*splitting*) e destacamento (*spalling*). De forma geral, essas fissuras costumam ocorrer concomitantemente ao momento da liberação da protensão, quando o concreto ainda não atingiu toda a sua capacidade resistente, mas podem ser agravados posteriormente quando ocorre o carregamento externo. Estes fenômenos, porém, podem ocorrer de forma isolada ou até mesmo simultânea, conforme o caso.

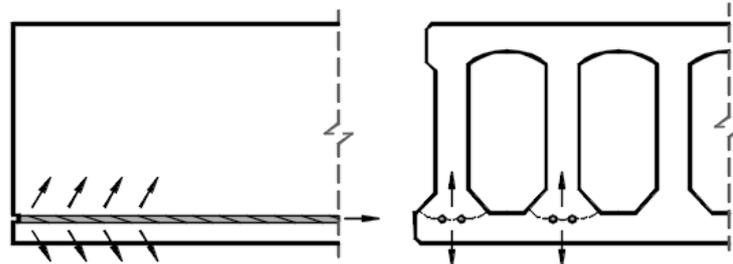
A explosão (*bursting*) surge do escorregamento do cabo para o interior da laje no momento da protensão, quando a massa de concreto ao redor da armadura é insuficiente para absorver as tensões radiais. Há então uma propagação da fissura para o interior do concreto na vizinhança da armadura e, conseqüentemente, um acréscimo de escorregamento (ver Figura 2-17).

Figura 2-17: Fissuras típicas de explosão (*bursting*)



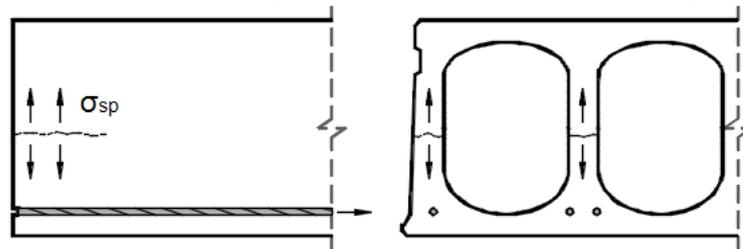
[Fonte: adaptado de ASSAP (2002)]

O fenômeno de separação (*splitting*) é proveniente de tensões de tração tangenciais oriundas da introdução da força de protensão dentro do comprimento de ancoragem, que ao atingir a resistência a tração do concreto, podem induzir ocorrência de fissuras capazes de se propagar entre cordoalhas quando estas estão muito próximas umas das outras, levando a uma ruptura generalizada que, em estágios mais avançados, podem promover a separação do talão inferior em relação ao restante da seção transversal (ver Figura 2-18).

Figura 2-18: Fissuras típicas de separação do talão inferior (splitting)

[Fonte: adaptado de ASSAP (2002)]

Por último, o destacamento (spalling) é um fendilhamento da alma do perfil que ocorre acima da linha de eixo dos cabos, na altura correspondente à menor espessura das nervuras, onde normalmente as tensões cisalhantes decorrentes da introdução de protensão são maiores, provocando assim um destacamento da metade superior em relação ao restante da seção (ver Figura 2-19).

Figura 2-19: Fissuras típicas de destacamento da alma (spalling)

[Fonte: adaptado de ASSAP (2002)]

Para um estudo mais detalhado sobre os mecanismos de ruptura por ancoragem, recomenda-se a leitura dos seguintes trabalhos: DUMÊT (2003) e ARAÚJO (2011).

2.2. ENSAIOS REALIZADOS NO NETPre 2007 A 2014

O Núcleo de Estudo e tecnologia em Pré-Moldados de Concreto – NETPre vem realizando uma série de ensaios em seu laboratório contribuindo para o avanço científico dos estudos das lajes alveolares, disseminando assim o conhecimento no campo dos sistemas construtivos pré-fabricados de concreto. O NETPre está situado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

A partir de um Convênio de Colaboração Tecnológica com a ABCIC (Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto), foi construído em 2005 na UFSCar o primeiro laboratório no Brasil dedicado às Estruturas Pré-Moldadas de Concreto.

Ao longo desses anos, o NETPre apresentou participação ativa nas revisões das normas da ABNT, colaborando com a revisão da ABNT NBR-9062:2017 e atuou na coordenação da ABNT NBR-14861:2011. Além disso, o grupo tem representado o setor das fábricas no Brasil, através da ABCIC, junto ao Comitê Pré-fabricados da FIB e interagido em vários comitês técnicos do PCI (Precast Concrete Institute – USA).

2.2.1. PESQUISAS ACADÊMICAS

FERNANDES (2007) apresenta os procedimentos para o ensaio padrão de apoio para avaliar a resistência ao cisalhamento de elementos de laje alveolar pré-fabricadas em concreto protendido, seguindo as recomendações da FIB. Apresentam discussões de como estes ensaios podem ser empregados no ambiente fabril em uma empresa de pré-fabricados, a fim de garantir a qualidade do produto. São feitas sugestões para padronização destes ensaios no Brasil. Foram realizados ensaios de força cortante com quatro tipologias de painéis de lajes alveolares, dos quais foram ensaiados cinco painéis por grupo. A avaliação e implantação de métodos de ensaio de força cortante, conforme as recomendações FIB (1992), para efeito de controle de qualidade, em elementos de laje alveolar pré-fabricadas de concreto protendido, demonstrou-se perfeitamente possível.

COSTA (2009) investiga os procedimentos de ensaios para avaliação de desempenho de lajes alveolares, com base nas referências internacionais, que no caso são encontradas nos boletins técnico da FIB (FIP-CEB) e na norma europeia EN-1168:2005. Procurou-se apresentar possíveis recomendações para adequações e aplicação destes procedimentos para a realidade brasileira. No estudo foram abordadas metodologias experimentais para três finalidades diferentes: a) Ensaios para pesquisa; b) Ensaios para avaliação de desempenho do produto; c) Ensaios para controle de qualidade de elementos de laje. Foram apresentados exemplo de aplicação dos procedimentos com base nos resultados de um programa experimental realizado pela NETPre.

Foram apresentados resultados de ensaios de força cortante e de flexão, onde foram avaliados elementos de laje sem capa, com capa, com e sem preenchimento de alvéolos. Os

resultados foram validados com base na comparação com resultados obtidos por modelos teóricos. Quanto a padronização de procedimentos de ensaios, verificou-se que o procedimento de ensaio para esforço cortante é adequado para avaliar as lajes produzidas no Brasil. Entretanto, o procedimento recomendado para ensaios de flexão, com a utilização de elementos curtos, mostrou-se inadequado devido a grande interação entre os mecanismos de flexão e de cisalhamento. A partir da validação experimental, foi recomendou-se uma relação mínima entre o comprimento e a altura da laje para garantir que o mecanismo crítico ocorra por flexão, sendo a relação do vão x altura da laje igual ou maior que 30.

CATOIA (2011) analisa o comportamento de lajes alveolares protendidas de uso corrente no Brasil (pequenas alturas e alta protensão) quanto ao cisalhamento em região fissurada por ação do momento fletor, para diferentes situações: sem e com capa e com preenchimento parcial de alvéolos. Estudou-se equacionamento disponíveis na literatura técnica, envolvendo as recomendações da norma brasileira ABNT NBR 6118:2003, do ACI-318:2008 e da EN 1992-1-1 (2004). Foram feitas comparações com resultados experimentais obtidos a partir de inúmeros ensaios de lajes alveolares protendidas. Foram realizados ao todo 96 ensaios, 31 para a determinação da capacidade resistente à flexão e 65, ao cisalhamento, sendo selecionados modelos de lajes com grande emprego no mercado brasileiro.

MARQUESI (2014) apresenta os principais códigos normativos acerca da resistência à força cortante em elementos sem armadura transversal especificamente, lajes alveolares protendidas. Os dois mecanismos condicionantes à ruptura por força cortante em lajes alveolares são: flexo-cortante e tração diagonal. Quanto à flexo-cortante, considerações foram feitas sobre a resistência a tração de concretos de alta resistência e propôs a consideração da influência da protensão na resistência à força cortante de forma variável. Em relação a tração diagonal, foi proposto o coeficiente β para considerar a forma indireta a influência dos esforços cisalhantes devido a introdução da protensão. Foram analisados 49 experimentos internacionais para a validação do coeficiente β e conclui-se que os modelos modificados por este coeficiente apresentam melhores resultados. Foram realizados 15 experimentos variando o comprimento de apoio e todas as rupturas foram por tração diagonal.

SANTOS (2014) analisa a continuidade de lajes alveolares. De forma comum as lajes são consideradas como simplesmente apoiadas. Investigou-se o comportamento de pavimentos formados por lajes alveolares com continuidade, com armadura na capa. Foram ensaiados três modelos em escala real, submetidos a um carregamento transversal, distribuído

de forma linear. Os estudos teóricos consideraram uma simulação numérica com elementos de viga e a formula de Branson para descrever o comportamento não linear físico do material. Além disso, avaliou-se os principais códigos normativos nacionais e internacionais, no que diz respeito à ruptura por cisalhamento da seção transversal e da interface laje-capa. Os resultados da análise experimental indicaram que o modelo 1 rompeu por cisalhamento da seção transversal, com o mecanismo de tração diagonal do concreto. O modelo 2 apresentou ruptura por cisalhamento da interface. No modelo 3, a ruptura foi por flexão. O comportamento dos modelos ensaiados foi governado pela fissuração da capa na região de momento negativo. A análise teórica com elementos de barra representou de forma satisfatória o comportamento dos modelos ensaiados.

PINHEIRO (2014) tendo em vista o reduzido volume de pesquisas nacionais sobre o tema, desenvolveu um estudo teórico-experimental das diferentes técnicas de preenchimento de alvéolos de lajes alveolares e seu comportamento quando submetidas a ensaios à força cortante. Como consequência do processo de fabricação deste tipo de laje e do método de preenchimento dos alvéolos, falhas no preenchimento idealizado devido ao comportamento distinto dos materiais e técnicas inadequadas são comumente constatadas. Ao todo foram ensaiadas 9 lajes alveolares e cada laje foi ensaiada nas duas extremidades, totalizando assim 18 ensaios. Foi possível observar que grande parte dos modelos apresentam valores experimentais de resistência à força cortante superiores aos valores teóricos, mostrando que as formulações normativas atuais convergem para valores seguros. Modelos que fizeram uso do preenchimento de alvéolos com um material de maior resistência a compressão demonstraram-se com eficiência superior em comparação a preenchimentos de menor resistência a compressão. As lajes que obtiveram ruptura tipicamente à força cortante apresentaram valores de resistência superiores aquelas com ruptura combinada de flexão com escorregamento de cordoalha ou ruptura por torção.

2.2.2. PESQUISAS PÚBLICO PRIVADA

Laboratório de pesquisa NETPre-UFSCar também realiza ensaios privados com o objetivo de validar produtos produzidos pela indústria de acordo com as normas vigentes e no auxílio de desenvolvimento de novos produtos, isso é possível devido a parceria público privada. Dentre as acessórias devolvidas é relacionado alguns resultados que contribuem para

este trabalho. É feito uma seleção dos ensaios realizados priorizando as lajes de pequenas alturas (menor que 200 mm).

NETPre (2012) foi realizada a avaliação de desempenho estrutural de elementos de lajes alveolares protendidas produzidas por fôrma fixa, conforme pode ser visto Figura 2-20. Essas lajes foram retiradas da linha de produção da indústria que seria utilizada para um estádio de futebol.

Figura 2-20: Laje alveolar moldada por fôrma fixa, e utilização de EPS



[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]

Para a realização de ambos os ensaios à flexão e à força cortante foram empregados dois (02) atuadores com células de carga de capacidade de 1000 kN, cada atuador, e dois (02) transdutores de deslocamento linear com curso de 100 mm, para as medidas de força aplicada e deslocamento vertical, respectivamente. Na Figura 2-21 são apresentadas as fotos dos ensaios realizados.

Figura 2-21: a) Determinação da resistência à força cortante; b) Determinação da resistência à flexão



a)

b)

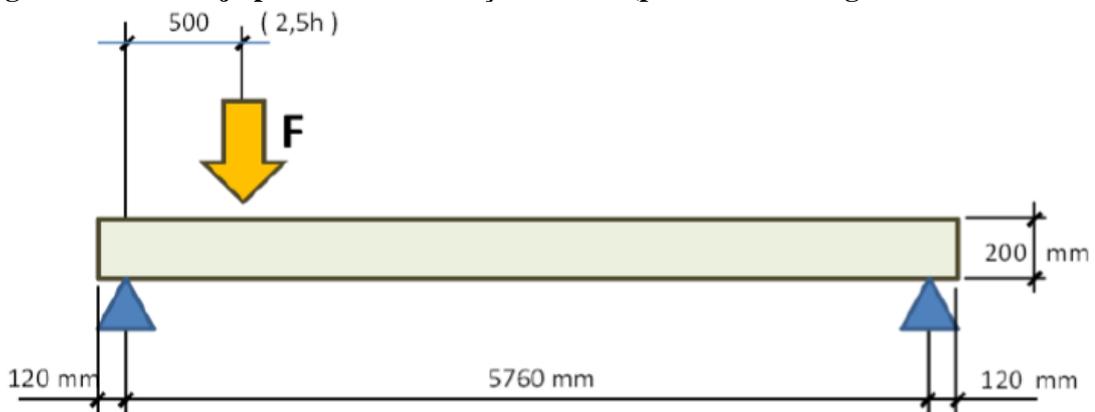
[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]

Foram realizados 03 ensaios à flexão e 03 ensaios de resistência à força cortante de elementos de laje com 6 metros de comprimento e 200 milímetros de altura. O comprimento adotado para as lajes ensaiadas (6 metros) foi baseado nas recomendações das pesquisas experimentais desenvolvidas pelo NETPre-UFSCar. Tal comprimento garante uma boa representação da escala de projeto. Além disso, tem-se a diminuição de possíveis efeitos de torção nos ensaios de resistência à força cortante, bem como a diminuição da possível interação flexão-cisalhamento nos ensaios à flexão com força concentrada no meio do vão, garantindo que a condição crítica ocorra por flexão.

Com relação aos comprimentos dos apoios, estabeleceu-se uma distância de 120 mm da face externa da laje até o centro do apoio. Esta distância foi compatível com o comprimento de apoio empregado no projeto (dado fornecido por projetista).

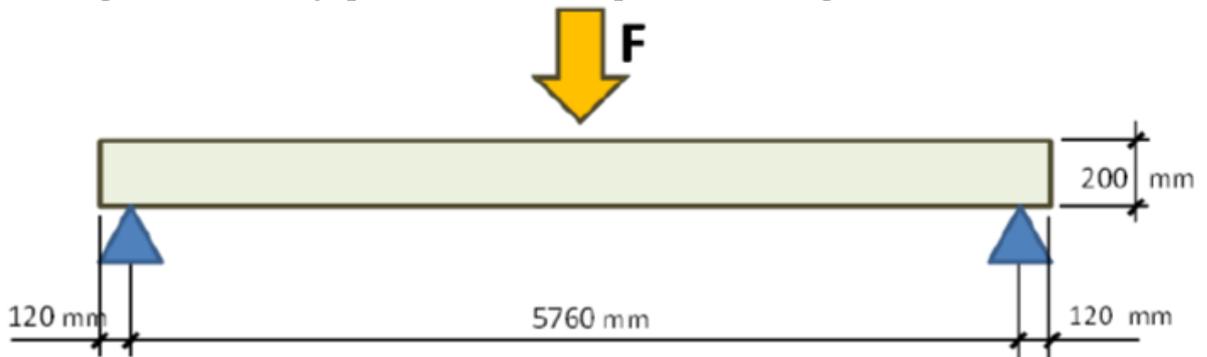
Para determinar a resistência a força cortante, com ponto de aplicação da carga concentrada a $2,5h$ do apoio (h = espessura da laje), conforme arranjo de ensaio apresentado na Figura 2-22. Para a realização dos ensaios de resistência à flexão, foi utilizado três pontos de carga concentrada conforme pode ser visto na Figura 2-23.

Figura 2-22: Arranjo para ensaio da força cortante (procedimento segundo EN-1168:2009)



[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]

Figura 2-23: Arranjo para ensaio à flexão (procedimento segundo CEB-FIP 1992)



[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]

Considerando valores característicos para a resistência à força cortante, segundo modelo de cálculo adotado na ABNT NBR14861:2011, obteve-se uma resistência de $V_{Rk} = 127$ kN, para a seção transversal numa região entre a aplicação da carga e o apoio. Descontando os esforços solicitantes provenientes do peso próprio da laje ensaiada, a previsão teórica é que esta resistência teórica seja atingida para uma carga última da ordem de $P_{u,prev} = 128$ kN. Na Tabela 2-2 são apresentadas as comparações dos resultados experimentais com o valor teórico previsto.

Tabela 2-2: Resultados experimentais referentes aos ensaios da força cortante			
Modelos	$P_{u,prev}$ (kN)	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,prev}$
Modelo 01	128	131,21	1,03
Modelo 02	128	97,89	0,76
Modelo 03	128	159,98	1,25
Valor médio		129,70	1,01

[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]

Conforme pode ser observado, os resultados experimentais excederam as previsões teóricas para os modelos 01 (103%) e 03 (125%), respectivamente. Entretanto, o resultado experimental atingiu apenas 76% do valor teórico previsto para o modelo 02. Isto ocorreu, muito provavelmente, em função de uma movimentação ocorrida em uma das placas de isopor durante a concretagem da laje, levando ao estrangulamento de uma das nervuras.

É de extrema importância a verificação do posicionamento correto das placas de isopor, antes e durante a concretagem, sendo que quando for identificado visualmente algum estrangulamento significativo de uma nervura (provavelmente por mau posicionamento do isopor), tal laje deverá ser avaliada pelo controle da qualidade ou por projetista, podendo inclusive ser descartada.

Considerando valores característicos para a resistência à compressão e à tração do concreto, com base nas propriedades fornecidas, obteve-se um momento de fissuração no meio da laje $M_{cr} = 87$ kN.m, para a seção transversal no meio do vão. Descontando os esforços solicitantes provenientes do peso próprio da laje ensaiada, tem-se uma previsão teórica para uma carga de $P_{cr,prev} = 51$ kN no início da fissuração. Além disso, obteve-se um momento resistente (para valores característicos) da ordem de $M_{Rk} = 118$ kN.m, o qual descontado o efeito do peso próprio, seria compatível para uma carga aplicada última da ordem de $P_{u,prev} = 72$ kN. Na Tabela 2-3 são apresentadas as comparações dos resultados experimentais com o valor teórico previsto. Conforme se observa, todos os resultados experimentais excederam as previsões teóricas de cálculo, com base no que podemos afirmar que as lajes atenderam aos critérios de desempenho da resistência de flexão no ELU.

Tabela 2-3: Resultados experimentais referentes aos ensaios à flexão					
Modelos	$P_{cr,prev}$ (kN)	$P_{cr,exp}$ (kN)	$P_{u,prev}$ (kN)	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,prev}$
Modelo 04	51	54,2	72	78,5	1,09
Modelo 05	51	55,7	72	73,3	1,02
Modelo 06	51	57,7	72	85,4	1,19
Valor médio	51	55,8	72	79,0	1,10
[Fonte: NETPre-UFSCar (2012)]					

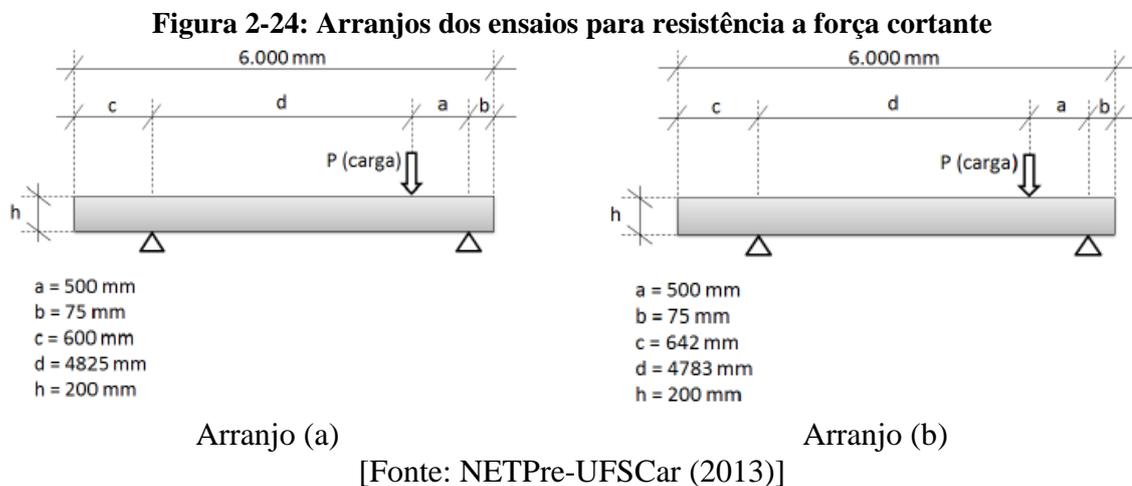
Com base nos resultados experimentais e na comparação com valores teóricos de cálculo, foi possível verificar que as lajes ensaiadas atenderam aos requisitos de desempenho tanto para a resistência à flexão quanto para a resistência à força cortante, estando de acordo com critérios de cálculo adotados na ABNT NBR-14861:2011.

Para o caso da avaliação da resistência à flexão, todos os resultados experimentais excederam as previsões teóricas, sendo que as configurações fissuradas das lajes foram consistentes com o mecanismo resistente de ruptura por flexão no ELU.

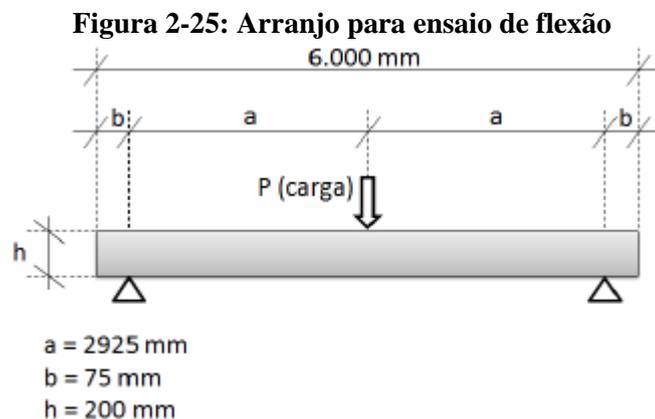
Para o caso da avaliação da resistência à força cortante, os resultados experimentais de 02 modelos excederam as previsões teóricas, onde as configurações fissuradas foram consistentes com o mecanismo resistente de ruptura por força cortante em região fissurada por flexão (região entre o apoio e a o ponto de aplicação da carga). Um terceiro modelo ensaiado apresentou uma resistência experimental inferior ao valor último teórico em função de problemas de posicionamento das placas de isopor, o que ocasionou o estrangulamento de uma das nervuras da laje, formando uma região fragilizada.

NETPre (2013) foi feito a avaliação de desempenho estrutural de lajes alveolares protendidas H20 (Lajes com 200 mm de altura, 6,0 m de comprimento, com armadura ativa de 8 x 9,5 mm cordoalhas com protensão inicial de 80 kN por cabo) por meio de ensaios destrutivos. Estas lajes foram produzidas por meio de máquina moldadora. Os ensaios visaram a verificação de três parâmetros principais: a) resistência à força cortante; b) resistência à flexão; c) verificação do momento de fissuração.

Para os ensaios de resistência à força cortante foram ensaiados 02 protótipos (elementos de laje com altura de 200 mm e com 6,0 m de comprimento), seguindo o arranjo de ensaio apresentado na Figura 2-24.



Para os ensaios de resistência à flexão foram ensaiados 02 protótipos (elementos de laje com altura de 200 mm com 6,0 m de comprimento), seguindo o arranjo de ensaio apresentado na Figura 2-25



Nas Figura 2-26 e Figura 2-27 são apresentadas vistas gerais dos ensaios de força cortante e à flexão.

Figura 2-26: Vista do ensaio de força cortante

Carga concentrada sobre viga rígida



Ruptura típica no cisalhamento



[Fonte: NETPre-UFSCar (2013)]

Figura 2-27: Vista do ensaio de flexão

Carga concentrada sobre viga rígida



Ruptura típica na flexão



[Fonte: NETPre-UFSCar (2013)]

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios de força cortante (apresentados na Tabela 2-4) foram comparados com os valores teóricos de cálculo, considerando as resistências efetivas do concreto e do aço (sem coeficientes de minoração da resistência), medidas efetivas das lajes ensaiadas.

Na Tabela 2-4 estão apresentadas as relações entre as resistências experimentais e teóricas, onde se observa que as resistências experimentais foram superiores aos valores teóricos previstos. Portanto, o requisito de desempenho para a resistência à força cortante foi satisfatório em ambos os modelos ensaiados.

Modelos	$P_{u,prev}$ (kN)	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,prev}$
Modelo 01	146,7	156	1,06
Modelo 02	146,7	161	1,10
[Fonte: NETPre-UFSCar (2013)]			

Nos gráficos dos ensaios de flexão foram identificadas as cargas aplicadas onde ocorreram o abatimento das curvas Força x Deslocamento para a obtenção do valor teórico estimado para a carga de fissuração no ensaio de flexão. Na Tabela 2-5 estão apresentadas as relações entre as resistências experimentais e teóricas.

Modelos	$P_{cr,prev}$ (kN)	$P_{cr,exp}$ (kN)	$P_{cr,exp}/P_{cr,prev}$
Modelo 01	52,1	56	1,07
Modelo 02	52,1	60	1,15
[Fonte: NETPre-UFSCar (2013)]			

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios de flexão (apresentados na Tabela 2-6) foram comparados com os valores teóricos de cálculo, considerando as resistências efetivas do concreto e do aço e as medidas efetivas das lajes.

Modelos	$P_{u,prev}$ (kN)	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,prev}$
Modelo 01	72,6	80	1,10
Modelo 02	72,6	85	1,17
[Fonte: NETPre-UFSCar (2013)]			

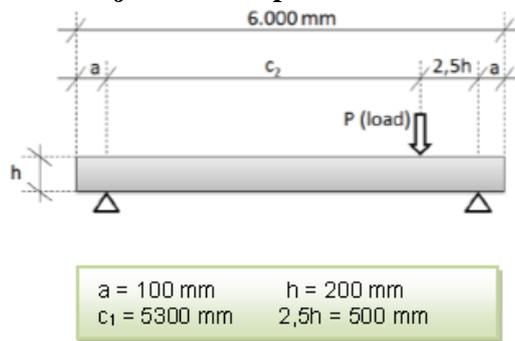
Com base nas comparações entre resultados experimentais com os valores teóricos apresentados, todas as lajes ensaiadas apresentaram desempenho estrutural que atenderam satisfatoriamente aos critérios da ABNT NBR14861:2011 em relação a resistência à força cortante e à resistência ao momento fletor último, respectivamente. No caso dos ensaios para avaliação da resistência à força cortante, os protótipos ensaiados apresentaram um mecanismo de resistência última associado à ruptura por força cortante em região fissurada por flexão (mecanismo de cisalhamento em região onde o momento de descompressão foi ultrapassado durante o ensaio).

NETPre (2014) foi realizado outro ensaio de desempenho estrutural de lajes alveolar produzida por máquina moldadora com altura de 200 mm e largura de 1245 mm. Foram

realizados ensaios destrutivos em 6 protótipos de lajes alveolares, sendo 3 ensaios para avaliar a capacidade resistente à força cortante com lajes de 6 m de comprimento e 3 ensaios para avaliar a capacidade à flexão, com lajes de 6,5 m de comprimento.

Para os ensaios de resistência à força cortante nas lajes alveolares, foi empregado o arranjo de ensaio conforme indicado na Figura 2-28. As distâncias indicadas nessa figura foram necessárias para a determinação da força cortante na seção de aplicação da força e no apoio próximo.

Figura 2-28: Arranjo do ensaio para resistência a força cortante



[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

Na Figura 2-29 é possível observar a configuração dos ensaios de força cortante. O ensaio é realizado com a aplicação de uma força por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 100 toneladas, diretamente em uma viga rígida de transferência de força, capaz de transferir a força aplicada uniformemente ao longo da largura da laje. Também na Figura 2-29 é possível observar um exemplo de ruptura por tração devido ao cisalhamento.

Figura 2-29: Vista do ensaio de força cortante

Carga concentrada sobre viga rígida



Ruptura típica no cisalhamento



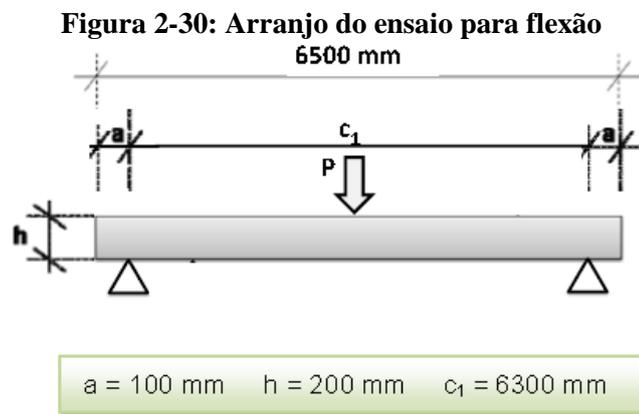
[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

Na Tabela 2-7 estão apresentadas as relações entre as resistências experimentais e teóricas, onde se observa que as resistências experimentais foram superiores aos valores teóricos previstos. Portanto, o requisito de desempenho para a resistência à força cortante foi satisfatório. Considerando a Tabela 2-7, a segurança dos dados é garantida uma vez que todos os valores para a relação $V_{u,exp} / V_{R,teor}$ são superiores a 1,0.

Tabela 2-7: Comparação de resultados experimentais e valores teóricos (ABNT NBR 14861:2011)					
Modelos	$V_{Ru,exp}$ (kN)	V_{Rd} (NBR14861) (kN)	$V_{Rd,teor}$ (NBR14861) (kN)	$V_{Ru,exp}/V_{Rd}$	$V_{Ru,exp}/V_{R,teor}$
Modelo 01	173,30	98	131	1,77	1,32
Modelo 02	138,70	98	131	1,41	1,06
Modelo 03	161,52	98	131	1,65	1,23

[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

Para os ensaios de flexão, foi empregado o arranjo de ensaio conforme indicado na Figura 2-30. As distâncias indicadas nessa figura foram necessárias para a determinação do momento máximo, na seção de aplicação da força.



[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

Na Figura 2-31 é possível observar a configuração dos ensaios de flexão. O ensaio é realizado com a aplicação de uma força por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 100 toneladas, diretamente em uma viga rígida de transferência de força, capaz de transferir a força aplicada uniformemente ao longo da largura da laje. Também na Figura 2-31 é possível observar um exemplo típico de fissuração devido à flexão.

Figura 2-31: Vista do ensaio de flexão

Carga concentrada sobre viga rígida



Ruptura típica na flexão



[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

Os resultados dos ensaios à flexão estão apresentados na Tabela 2-8, onde está relacionado as resistências experimentais e teóricas, pode ser observado que as resistências experimentais foram superiores aos valores teóricos previstos.

Tabela 2-8: Comparação de resultados experimentais x teóricos nos ensaios de flexão

Modelos	$M_{R,teor}$ (kN.m)	$M_{Ru,exp}$ (kN.m)	$M_{Ru,exp}/M_{R,teor}$
Modelo 04	80	102,58	1,28
Modelo 05	80	102,00	1,28
Modelo 06	80	109,55	1,37

[Fonte: NETPre-UFSCar (2014)]

2.3. PESQUISAS CONSULTADAS

São apresentadas as pesquisas consultadas que contribuem para o melhor conhecimento científico para o comportamento das lajes alveolares protendidas.

ANTUNES (2011) investigou a influência do preenchimento dos alvéolos na resistência ao cisalhamento de lajes alveolares por meio de ensaios em modelos físicos e de modelagens computacionais. As variáveis estudadas no programa experimental são a presença de capa estrutural e o preenchimento dos alvéolos, que na pesquisa foi mantido constante e

igual a um terço dos alvéolos da laje. Já nas modelagens computacionais, as variáveis são o valor da força de protensão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto da laje, a presença da capa estrutural e o preenchimento dos alvéolos.

Dos resultados dos ensaios conclui-se que o preenchimento de um terço dos alvéolos, até uma distância aproximada de 50 cm da extremidade da laje, não aumentou a resistência ao cisalhamento da laje alveolar. Por outro lado, a presença da capa de concreto aumentou a resistência ao cisalhamento da laje alveolar, desde que seja evitada a ruptura da interface entre a laje e a capa de concreto.

Da comparação desses resultados com os obtidos do emprego de equacionamentos existentes nas normas nacionais e internacionais para lajes maciças e lajes alveolares, conclui-se que essas equações avaliaram bem a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares sem capa, entretanto superestimaram a resistência das lajes alveolares com capa de concreto ou com alvéolos preenchidos.

ARAUJO (2011) traz uma contribuição teórica para o projeto estrutural de lajes alveolares protendidas com relação aos efeitos dependentes do tempo e a região do apoio. O modelo reológico utilizado foi fundamentado no método do coeficiente característico de envelhecimento, permitiu a análise de barras considerando o comportamento dependente do tempo do concreto e do aço por meio das funções de relaxação. Com isso, foi possível analisar os efeitos construtivos e o comportamento em diferentes etapas da vida útil das lajes alveolares isostáticas que são unidas para formar uma estrutura contínua com seção transversal composta. As análises dos resultados mostraram que a utilização de lajes alveolares com continuidade longitudinal é uma solução eficiente, mas requer verificações adicionais de projeto devido ao processo construtivo. Como contribuição para o estudo da região dos apoios, apresenta-se, por um lado, resultados de modelos numéricos não lineares, considerando a aderência entre a armadura e o concreto, e por outro lado, uma metodologia analítica para verificação da resistência à força cortante, baseada na Modified Compression Field Theory (MCFT) (estudo da teoria de compressão modificada) e nos conceitos de segurança do Eurocode 2. Os modelos numéricos representaram bem o comportamento de ensaios experimentais e clarificaram a distribuição de tensões na região de apoio. Os resultados obtidos com a metodologia analítica proposta para a verificação da resistência à força cortante alcançou os melhores resultados quando comparada com as normas CSA A23.3 e o Eurocode 2, utilizando um banco de dados

com 129 ensaios experimentais de lajes alveolares. Além disto, a metodologia proposta é adequada para aplicações de projeto, visto sua simplicidade.

FRANÇA (2012), estudou o comportamento das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a esforços de força cortante. Para isso, foram feitos ensaios de força cortante das lajes alveolares com altura de 265 mm com e sem capa de concreto de 50 mm, sem preenchimento de alvéolos, com dois alvéolos preenchidos e com três alvéolos preenchidos com concreto.

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

Os valores da força cortante última obtida nos ensaios foram comparados com os valores das forças cortantes resistentes teóricas calculadas de acordo com a ABNT NBR 6118:2003 e com a ABNT NBR 14861:2011. Ao calcular-se a força cortante resistente através das equações apresentadas na ABNT NBR 14861:2011, verificou-se que esta norma está muito mais rigorosa no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do que a ABNT NBR 6118:2003. Devido à esta grande diferença nos resultados calculados, mesmo para lajes sem preenchimento de alvéolos, a consultou a comissão que elaborou a ABNT NBR 14861:2011 e verificou que há um erro no texto da norma, pois o coeficiente α foi considerado em duplicidade (α e 0,15).

Durante os ensaios realizados, confirmou-se que o preenchimento dos alvéolos com concreto contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares. Mas para o caso das lajes de 265 mm de altura, deve ser limitada a quantidade a no máximo dois alvéolos preenchidos, pois a maioria dos resultados para lajes com três alvéolos preenchidos foi menor, confirmando que a recomendação da ABNT NBR 14861:2011 é coerente com a prática.

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

As contribuições desta pesquisa são: aumento da quantidade de resultados de ensaios com lajes de espessura 265 mm realizados no Brasil, obtenção de resultados de ensaios da força cortante com alvéolos concretados após a liberação da força de protensão, obtenção de

resultados de ensaios da força cortante em lajes alveolares com alvéolos concretados e com capa de concreto armada com tela soldada, comparação de resultados de ensaios de força cortante com valores teóricos calculados através da nova revisão da norma ABNT NBR 14861:2011, aplicação de modelos de bielas e tirantes em lajes alveolares protendidas; correção da duplicidade do fator α apresentada na ABNT NBR 14861:2011.

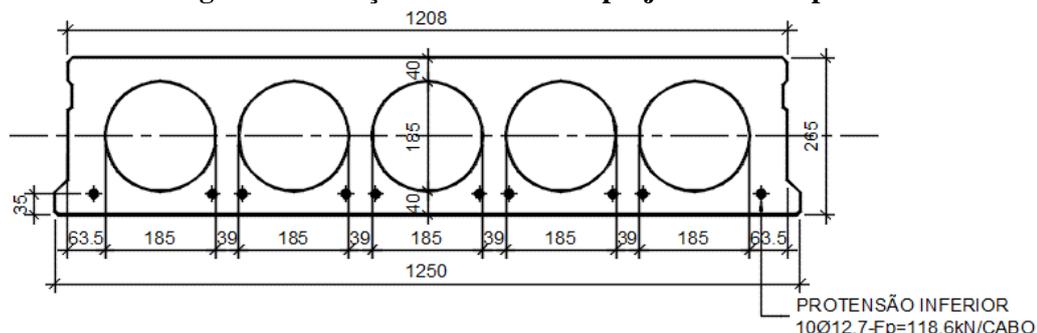
2.4. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO ALVÉOLO

MACIEL¹ (2017) destaca que atualmente existem dois modos de ruptura consagrados no meio acadêmico e que foram descritos em diversas publicações nacionais e internacionais, sendo eles: tração diagonal e flexo-cortante. O primeiro trata de cisalhamento em regiões com pouca ou nenhuma influência da flexão, cujos modelos analíticos tem por base a Resistência dos Materiais. O segundo modo de ruptura trata de regiões com grande influência da flexão, e devido a sua complexidade, os modelos analíticos utilizados são em geral, baseados em conceitos teóricos, mas calibrados por parâmetros extraídos de ensaios.

A seção transversal da laje alveolar pode ser discretizada em faixas a onde é possível a determinação do ponto crítico, que define a capacidade máxima resistente a força cortante da laje, a partir de então é verificar a influência da forma do alvéolo na capacidade resistente a força cortante. Para melhor compreensão do assunto, recomenda-se a leitura de MACIEL¹ (2017).

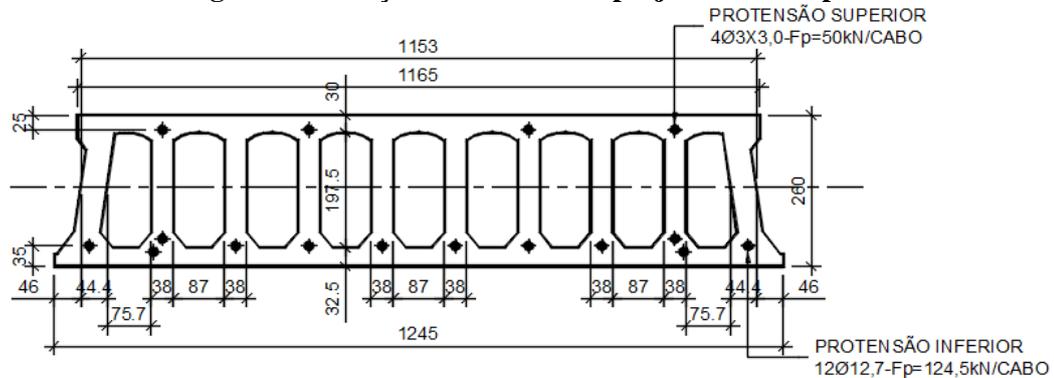
É desenvolvido por MACIEL² (2017) um estudo que analisa duas seções transversais de lajes alveolares comumente encontradas no mercado nacional, porém o Protótipo A tem altura de 265 mm e alvéolos circulares, conforme pode ser visto na Figura 2-32, já o Protótipo B tem altura de 260 mm e alvéolos misto, conforme pode ser visto na Figura 2-33.

Figura 2-32: Seção transversal de projeto – Protótipo A



[Fonte: adaptado MACIEL² (2017)]

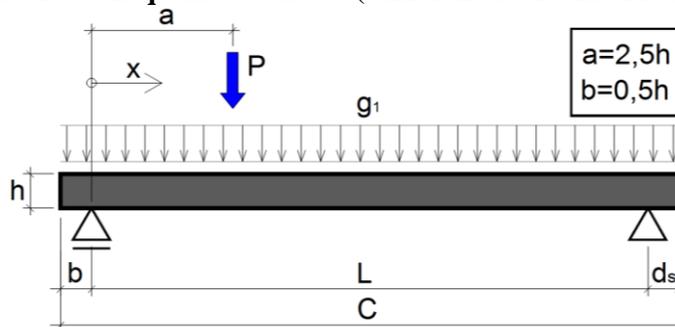
Figura 2-33: Seção transversal de projeto – Protótipo B



[Fonte: adaptado MACIEL² (2017)]

A Figura 2-34 apresenta as características dos ensaios para avaliação de desempenho de lajes alveolares de acordo FIP (1992) e EN 1168:2008, que recomenda a aplicação da carga a uma distância de $2,5h$ (ou 600 mm; o maior entre eles). A Tabela 2-9 contém as características dos ensaios utilizados para o Protótipo A e Protótipo B.

Figura 2-34: Esquema de ensaio (CEB FIP:1992 / EN 1168:2008)



[Fonte: adaptado MACIEL² (2017)]

Tabela 2-9: Esquemas dos ensaios						
Protótipo	$h_{nominal}$ (mm)	C (mm)	L (mm)	a (mm)	b (mm)	d_s (mm)
Protótipo A	265	6000	5467,5	662,5	132,5	400
Protótipo B	260	6000	6280	660	110	110

[Fonte: adaptado MACIEL² (2017)]

Para avaliar a aplicabilidade do modelo analítico normativo para as lajes analisadas neste trabalho, na Tabela 2-10, são apresentados os momentos atuantes e resistentes calculados para a seção crítica.

Tabela 2-10: Valores de resistente à flexão calculados (conforme ABNT NBR 6118:2014) e valores de ensaios laboratoriais					
Protótipo	h_{nominal} (mm)	M_a (kN.m)		M_r (kN.m)	
		(1)	(2)	(1)	(2)
Protótipo A	265	132,3	138,2	212,6	203,4
Protótipo B	260	156,0	162,9	239,4	244,2
Protótipo A – Alvéolo circular. Protótipo B – Alvéolo misto. (1) Seção transversal de projeto (2) Seção transversal real					
[Fonte: adaptado MACIEL ² (2017)]					

Da Tabela 2-10, para ambos os protótipos não deve ocorrer fissuração na seção crítica e, portanto, o modelo normativo brasileiro não é adequado na avaliação destes elementos. No entanto, resta saber também se esse modelo fornece valores que atendem os critérios de segurança. Para tanto, foram calculadas as cortantes resistentes ($V_{R,cal}$) conforme ABNT NBR 6118:2014 e comparados os valores calculados com os respectivos valores obtidos nos ensaios ($V_{R,exp}$), para ambos os protótipos considerando ora dados geométricos de projeto, ora valores obtidos em laboratório.

Tabela 2-11: Valores de cortante resistente calculados (conforme ABNT NBR 6118:2014) e valores de ensaios laboratoriais							
Protótipo	h_{nominal} (mm)	V_{R,exp} (kN)	V_{R,cal} (kN)			V_{R,exp}/V_{R,cal}	
			(1)	(2)	Diferença	(1)	(2)
Protótipo A	265	233	163,4	172,2	5,4%	1,43	1,35
Protótipo B	260	244	264,2	259,7	1,7%	0,92	0,94
Protótipo A – Alvéolo circular. Protótipo B – Alvéolo misto. (1) Seção transversal de projeto (2) Seção transversal real							
[Fonte: adaptado MACIEL ² (2017)]							

Na Tabela 2-11 é possível destacar que o modelo normativo apresenta desempenho satisfatório para o Protótipo A (alvéolos circulares), porém, para o Protótipo B (alvéolos mistos), a segurança do modelo foi comprometida já que os valores calculados, seja para o perfil de projeto ($V_{R,cal} = 264,2\text{kN}$), ou para o perfil real ($V_{R,cal} = 259,7\text{kN}$), superam o valor de ensaio ($V_{R,exp} = 244\text{kN}$), o que torna o modelo não recomendável para lajes com características semelhantes.

A relação $V_{R,exp}/V_{R,cal}$ calculada para ambos os protótipos permitem afirmar que o desempenho do modelo analítico normativo varia com o tipo de elemento analisado, o que não é desejável para um modelo normativo.

Através destes ensaios é possível concluir que o modelo de cálculo preconizado pela normalização brasileira não é o mais adequado para avaliar a capacidade resistente, já que o modo de ruptura por força cortante identificado em laboratório foi o de tração diagonal para ambos os elementos ensaiados. Esse modo de ruptura tende a ocorrer em lajes de alturas maiores que 250 mm. CATOIA (2011) realizou uma série de ensaios com lajes de 200 mm de altura e a ruptura ocorreram em regiões fissuradas, cujo mecanismo é contemplado pela norma nacional.

3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

3.1. INTRODUÇÃO

A seguir são apresentadas algumas recomendações normativas para o cálculo da resistência à força cortante. Em elementos estruturais sem armadura transversal considera-se a ABNT NBR 14861:2011 já para os elementos estruturas protendidos com a utilização de armadura transversal aplica-se as recomendações da ABNT NBR 6118:2014. Nesta última norma citada também contempla as equações para a verificação da capacidade resistente de lajes sem armadura para força cortante.

As formulações das duas normas são semelhantes exceto pela utilização do parâmetro α na parcela referente a tensão no centro de gravidade $\sigma_{cp,1,lx} = \frac{N_{p,lx}}{A_c} \cdot \alpha$. Este valor de α não aparece em nenhuma norma a não ser a Brasileira. O valor de V_{Rd1} de cada uma delas é diferente, sendo que numericamente o valor dado pela formulação da ABNT NBR 14861:2011 seria menor.

FRANÇA (2012) ao calcular a força cortante resistente através das equações apresentadas na ABNT NBR 14861:2011, verificou que esta norma é muito mais rigorosa no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do que a ABNT NBR 6118:2014. Devido à esta grande diferença nos resultados calculados, mesmo para lajes sem preenchimento de alvéolos. A autora consultou a comissão que elaborou a ABNT NBR 14861:2011 e verificou que há um erro no texto da norma, pois o coeficiente α foi considerado em duplicidade (α e 0,15). A ABNT emitirá em breve uma emenda da ABNT NBR 14861:2011 com as correções necessárias, segundo destaca a autora.

No emprego das lajes alveolares, quando é necessário vencer vãos maiores ou suportar cargas mais elevadas, algumas alternativas são avaliadas para tal situação, tais como: a utilização de arranjos com maior número de cordoalhas, aumento da resistência do concreto, aumento da altura da laje e, ainda, pode-se realizar o preenchimento de alvéolos nas extremidades da peça pré-moldada.

O preenchimento dos alvéolos pode ser realizado com o intuito de melhorar a resistência da laje alveolar ao cisalhamento. CATOIA (2011) constata que a adoção da prática de preenchimento de alvéolos é corrente e considerada como eficiente para até dois alvéolos.

Pesquisas realizadas pelo Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto – NETPre contribuíram para as formulações da ABNT NBR 14861:2011 para se determinar a capacidade do acréscimo de carga para as lajes alveolares que tenham os seus alvéolos preenchidos.

Os alvéolos podem ser preenchidos na pista, juntamente com a moldagem lajes alveolares, ou na obra. Quando o preenchimento é realizado na pista, geralmente é empregado o mesmo concreto usado na fabricação dos elementos e esse procedimento é feito antes da liberação da protensão. Assim, nesse caso, a seção transversal é formada pelo perfil da laje mais a região dos alvéolos preenchidos, receberá o efeito da protensão quando dada a liberação dos cabos. Tal efeito afeta o cálculo desses elementos. Quando o preenchimento é realizado na obra, os concretos são diferentes, tanto na idade quanto na resistência e, nesse caso, a liberação da protensão é realizada quando a seção ainda é simples.

CATOIA (2011) observa que para os casos em que os alvéolos são preenchidos em obra, maiores cuidados são necessários para garantir boa aderência entre o concreto do preenchimento e o da laje alveolar.

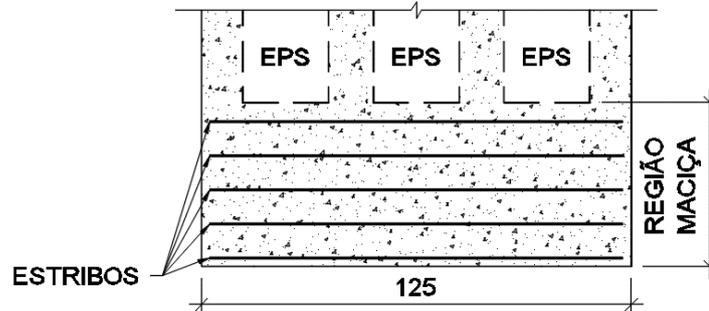
A ABNT NBR 14861:2011 contempla a possibilidade de preenchimento de alvéolo em pista e em obra nas suas formulações. Em ambos os casos é permitido o preenchimento de apenas dois alvéolos e pode ser considerado, a contribuição de 50% da largura do alvéolo.

Ensaio realizado por FRANÇA (2012) confirmaram que o preenchimento dos alvéolos com concreto contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares. Mas para o caso das lajes de 26,5cm de altura, deve ser limitada a quantidade a no máximo dois alvéolos preenchidos, pois a maioria dos resultados para lajes com três alvéolos preenchidos foi menor, confirmando que a recomendação da ABNT NBR 14861:2011 é coerente com a prática.

Nas lajes alveolares moldada por fôrma fixa é possível a interrupção do EPS e também, se necessária, a utilização de estribos para aumento da capacidade resistente. Essa interrupção do EPS pode ser feita em toda a largura da laje, conforme pode ser visto na Figura 3-1. Outra possibilidade é de prolongar o EPS até o final da laje e utilizar estribos, conforme

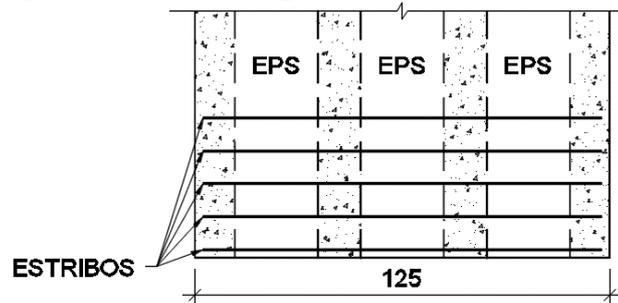
pode ser visto na Figura 3-2. Neste aspecto, a laje alveolar moldada por fôrma fixa apresenta grande versatilidade de soluções visando o acréscimo de capacidade de carga.

Figura 3-1: Laje alveolar moldada por fôrma fixa com extremidade maciça e utilização de estribos



[Fonte: próprio autor]

Figura 3-2: Laje alveolar moldada por fôrma fixa e com utilização de estribos



[Fonte: próprio autor]

Nas situações apresentadas na Figura 3-1 e Figura 3-2 a ABNT NBR 14861:2011 não contempla essas análises, pois, por definição, laje alveolar é caracterizada pela ausência de armadura transversal de cisalhamento. Para análise desses elementos utiliza-se as recomendações da ABNT NBR 6118:2014, gerando uma eficiência muito maior que a alveolar, cujo preenchimento de alvéolos nunca é aproveitado integralmente.

Durante a produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa já são confeccionadas as extremidades maciças utilizando desta forma o mesmo concreto da laje, não havendo assim a existência de juntas entre os dois concretos.

Cabe destacar conforme apresentado em MARQUESI (2014) o Eurocode 2 (EC2), o ACI 318:2011 e a EN1168:2008 (norma europeia para lajes alveolares) fazem distinção entre cisalhamento devido à força cortante em regiões fissuradas e não fissuradas por flexão. No

entanto, a norma brasileira de lajes alveolares, ABNT NBR 14861:2011, apresenta única formulação para esta verificação.

3.2. ESTADO LIMITE DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES NORMAIS

De acordo com ARAÚJO (2007), o estado limite último em peças protendidas, no que se refere às solicitações normais, pode ser verificado com os mesmos procedimentos de cálculo utilizado no concreto armado, distinguindo-se apenas no fato que a armadura de protensão possui um alongamento prévio. Tomando-se como referência o estado fictício no qual se considera o concreto sem tensões, estado de neutralização, a armadura ativa apresentará uma deformação inicial denominada “pré-alongamento”.

Quando se projeta uma peça de concreto armado ou protendido, deve-se garantir a segurança no estado limite último assim como verificar as condições de serviço, então além das verificações no estado limite último é preciso verificar a estrutura em seu funcionamento, ou seja, em serviço ou uso.

Essas verificações correspondem aos estados limites de serviço de fissuração e deformação excessiva. Não basta uma estrutura ter segurança à ruptura é preciso que funcione adequadamente, e que tenha durabilidade compatível ao que foi projetada.

A fissuração excessiva de uma peça em concreto protendido pode comprometer significativamente sua durabilidade. Embora não seja a única causa, ou condição necessária, pode-se dizer que, quando de sua ocorrência, há grande risco de haver uma degradação rápida do concreto superficial e da armadura. Outros fatores, como: porosidade do concreto, cobertura insuficiente da armadura, presença de agentes agressivos etc., contribuem ou podem ser determinantes na durabilidade da estrutura. Examinados esses fatores, o engenheiro de estruturas deve evitar que a peça sofra fissuração excessiva, devida à flexão, detalhando adequadamente a armadura na seção transversal e, se for o caso, aumentando a sua quantidade.

Assim, em relação à questão de fissuração, em geral, deseja-se evitar situações em que a fissuração do concreto possa causar uma diminuição na vida útil da estrutura. O uso de fator água cimento (A/C) adequado, resistência mínima do concreto e cobrimentos mínimos adequados para armadura também fazem parte das prescrições de se evitar a corrosão da

armadura e, portanto, a diminuição da vida útil da estrutura. Portanto, a adoção de resistência mínima de concreto, cobrimento mínimo para armadura e verificação de estados de fissuração se complementam dando condição, junto com as boas técnicas de confecção da estrutura, que haja garantia de uma vida útil mínima. A questão do estado limite de deformação excessivo está ligada realmente as questões de estética e funcionamento adequado.

Já o dimensionamento no estágio limite último de colapso em concreto protendido pouco difere do efetuado em peças de concreto armado. As hipóteses que uma seção transversal deve obedecer tanto em concreto armado quanto em protendido estão descritas no item 17.2.2 da norma ABNT NBR 6118:2014.

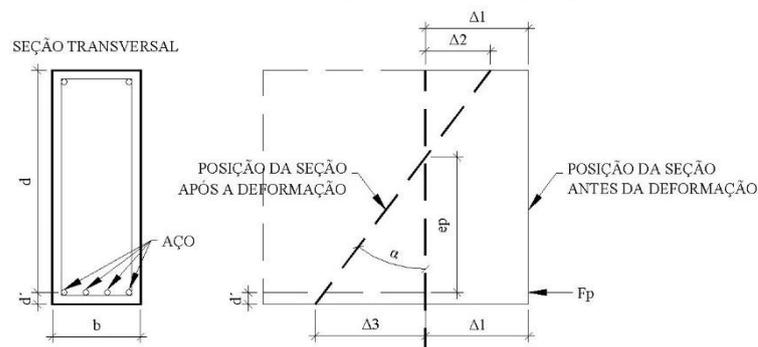
De acordo INFORSATO (2009), em peças fletidas em protendido é sempre possível resolver o problema de estados limites de duas maneiras. A primeira pressupõe que a condição de colapso é a que conduz à maior quantidade de armadura longitudinal e, desta forma, dimensiona-se, a armadura no estágio III e verifica-se a condição de fissuração com o número de cabos já determinado. No segundo raciocínio, considera-se que a condição de utilização de fissuração é a mais desfavorável e através da limitação das tensões normais na seção transversal, determina-se o número de cabos necessários em serviço verificando-se, em seguida, o estado limite último.

Considerando o primeiro caso, o problema que se deve resolver é o seguinte: Dada a seção transversal, a posição do centro de gravidade da armadura de protensão (quando não conhecido será arbitrado), as características dos materiais (aço e concreto), momentos atuantes, qual deve ser a seção de armadura longitudinal de protensão que satisfaça à ruptura. Considerando o esforço de protensão como interno, a questão pode ser tratada como de flexão simples e o efeito de protensão entra só no equilíbrio do momento fletor. Trata-se de um procedimento aproximado, porém adotado largamente na prática.

Para utilizar este procedimento é necessário conhecer o valor da tensão na armadura (σ_{pd}) na configuração do estado limite último sendo necessário fazer uma análise cuidadosa do que ocorre. Imaginando uma seção transversal retangular como a apresentada na Figura 3-3 e considerando inicialmente o efeito apenas da força de protensão F_p . Nesta situação a seção transversal sofre dois efeitos: um encurtamento $\Delta 1$ devido o efeito do normal F_p e uma rotação α , devido força de protensão atuando com uma excentricidade de e_p que causará as deformações $\Delta 2$ e $\Delta 3$ (fibra superior e junto a armadura de protensão) (Figura 3-3). Devido a ação do peso

próprio (Figura 3-4) haverá uma rotação β (contrária ao efeito da protensão) causando os deslocamentos $\Delta 4$ e $\Delta 5$. Na Figura 3-4 os dois efeitos são considerados resultando nos deslocamentos $\Delta 6$ e $\Delta 7$ que corresponderão as deformações específicas ϵ_c e $\epsilon_{cp,p+g1}$. Na Figura em questão considerou-se que as deformações específicas são de encurtamentos, mas poderiam, por exemplo, na fibra superior ocorrer um pequeno alongamento sem que houvesse fissuração no concreto.

Figura 3-3: Deformação da seção após protensão



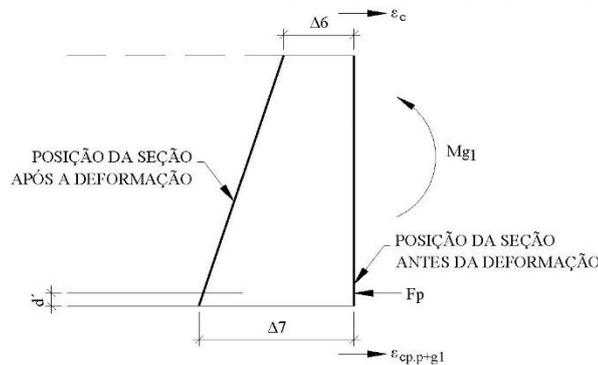
[Fonte: adaptado INFORSATO (2009)]

Figura 3-4: Deformação da seção após peso próprio



[Fonte: adaptado INFORSATO (2009)]

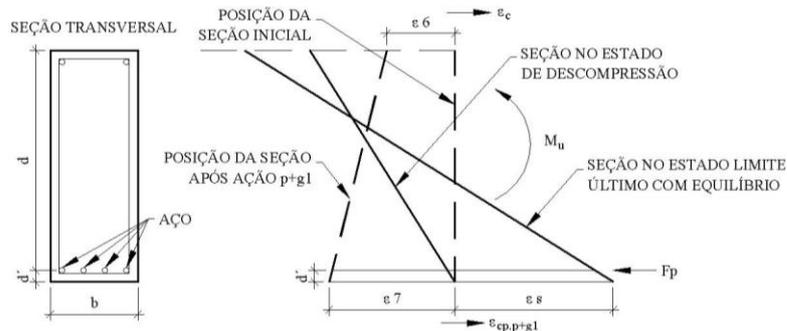
Figura 3-5: Deformação da seção após peso próprio e protensão



[Fonte: adaptado INFORSATO (2009)]

Após a execução da protensão e havendo igualdade entre deformação específica do concreto com o da armadura e considerando a atuação do momento último uma seção até encontrar uma situação de equilíbrio passará pelo estado limite de descompressão (Figura 3-6) como sendo aquele em que um ou mais pontos a tensão no concreto é nula e no restante da seção não haverá tensão de tração.

Figura 3-6: Seção transversal no estado limite de descompressão e limite último



[Fonte: adaptado INFORSATO (2009)]

Assim a deformação que armadura sofrerá até chegar no estado limite último em equilíbrio será, neste caso, composta de três parcelas: a) a distensão provocado pelo macaco já descontadas todas as perdas ou não (o que for mais desfavorável), b) a movimentação do concreto (já aderente a armadura) até que a tensão na fibra inferior, próxima a armadura ativa (a menos da distância d' no mesmo nível da armadura) seja nula ε_7 e 3) a deformação correspondente a ε_8 necessária para haver equilíbrio.

Finalmente, pode-se dizer que a tensão na armadura de protensão depende da efetivação da protensão (pré-alongamento) ε_p , a deformação para chegar-se ao estado de descompressão $\varepsilon_7(\varepsilon_{cp,p+g1})$ e a deformação que ocorre depois desta que é designada aqui simplesmente por ε_8 , que deve ser menor que 1% (evitar a deformação excessiva da armadura depois de estar em contato com o concreto ou aberturas de fissuras muito grandes).

O valor de ε_7 pode ser obtido pela expressão:

$$\varepsilon_7 = \varepsilon_{cp,p+g1} = \left(\frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p \cdot e_p^2}{I_c} - \frac{M_{gl} \cdot e_p}{I_c} \right) \cdot \frac{1}{E_c} \quad (3.1)$$

Onde:

N_p é o esforço normal de protensão na seção

M_{g1} – momento devido a ação do peso próprio na seção

e_p – excentricidade da armadura ativa

I_c , E_c – momento de inércia da seção e módulo de elasticidade do concreto respectivamente.

Esta parcela de deformação será diferente se a protensão não for suficiente para mobilizar todo o peso próprio da viga, mas por ser pequena e não ter a quantidade final de cabos, costuma ser desprezada nos cálculos usuais.

Para trabalhar com os aços de protensão vamos usar os resultados da publicação de VASCONCELOS (1980) dada na Tabela 3-1.

Cabe ainda ressaltar que a segurança à ruína deve existir mesmo na consideração mais desfavorável e, portanto, é preciso analisar a seção sob a ação do maior dos esforços atuantes e com a menor força de protensão, ou seja, após todas as perdas (no tempo “infinito”), não se esquecendo, porém, de verificar outras situações que não esta (situação em vazio, por exemplo).

Tabela 3-1: Tensão no aço σ_{sd} (MPa)

ϵ (‰)	5,25	6,794	7,438	8,167	9,000	9,962	10,00	12,50	15,00
CP175	1025	1264	1316	1344	1365	1368	1368	1378	1388
CP190	1025	1314	1411	1459	1482	1486	1486	1496	1507

ϵ (‰)	17,50	20,00	22,50	25,00	27,5	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00
CP175	1397	1407	1416	1426	1436	1445	1455	1464	1474	1484
CP190	1517	1527	1538	1548	1559	1569	1579	1590	1600	1611

Todo o equacionamento do cálculo da armadura longitudinal em elementos sob flexão simples pode ser visto em CARVALHO¹ (2014).

3.3. ESTADO LIMITE DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES TANGENCIAIS

Assim como no caso do estado limite último de solicitações normais, o estado limite último devido a solicitações tangenciais de peças protendidas é muito semelhante ao estudo

aplicado ao concreto armado, diferenciando-se apenas no fato da aplicação de protensão por meio de armaduras ativas. Neste trabalho serão tratados somente os devido ao esforço cortante em lajes, sendo que as demais solicitações tangenciais e outros tipos de elementos não serão objeto de estudo.

De acordo com LEONHARDT (1983) o efeito favorável da protensão está relacionado às tensões de compressão longitudinal produzidas pela protensão, que reduzem as tensões principais de tração (que ficam mais inclinadas com relação ao eixo da peça), de modo que a fissura de cisalhamento se configura com menor inclinação do que no caso do concreto armado.

3.3.1. SEGUNDO A ABNT NBR 14861:2011

O mecanismo de ruptura dado pela norma brasileira é a flexo-cortante, portanto relativa à regiões fissuradas por flexão, e é semelhante ao V_{Rd1} presente na ABNT NBR 6118:2014, exceto pela utilização do α conforme mencionado anteriormente. As expressões descritas a seguir limitam-se às situações de lajes alveolares sem capeamento estrutural e sem preenchimento de alvéolos.

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (3-2)$$

Em que,

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (3-3)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (3-4)$$

$$\rho_1 = \frac{A_p}{\sum b_{w,1} \cdot d} \quad (3-5)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \cdot \alpha \quad (3-6)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (3-7)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1, d \text{ em metros} \quad (3-8)$$

Sendo:

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

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

$f_{cj,d}$: é a resistência do concreto a compressão aos j dias (dia da realização do ensaio);

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

d : é a altura efetiva da seção da laje;

k : coeficiente;

ρ_1 : corresponde a taxa de armadura específica para a laje alveolar pré-moldada;

A_p : área da seção transversal da armadura protendida;

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

N_p : é a força de protensão final, depois de todas as perdas. A força no cabo é calculada para o comprimento l_x ;

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

α : é o fator de proporção de protensão introduzida na seção analisada;

l_x : é a distância da extremidade da laje até a seção analisada;

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

Para a situação da laje alveolar com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista, a resistência à força cortante deve ser calculada por:

$$V_{Rd1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (3-9)$$

Em que,

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (3-10)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (3-11)$$

$$\rho_2 = \frac{A_p}{\sum b_{w,2} \cdot d} \quad (3-12)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \cdot \alpha \quad (3-13)$$

Sendo:

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv} \quad (3-14)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (3-15)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1, d \text{ em metros} \quad (3-16)$$

Onde :

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

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

f_{cjd} : é a resistência do concreto a compressão aos j dias (dia da realização do ensaio);

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

d : é a altura efetiva da seção da laje;

k : coeficiente;

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

A_p : área da seção transversal da armadura protendida;

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

n : é a quantidade de alvéolos preenchidos;

A_{alv} : é a área da seção transversal do alvéolo, conforme sua geometria. Para alvéolo com seção circular, a área da seção deve ser calculada para equação: $A_{alv} = \frac{\pi \cdot b_{alv}^2}{4}$

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

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

N_p : é a força de protensão final, depois de todas as perdas. A força no cabo é calculada para o comprimento l_x ;

$A_{c,2}$: é a área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada mais a área da região dos alvéolos preenchidos;

α : é o fator de proporção de protensão introduzida na seção analisada;

l_x : é a distância da extremidade da laje até a seção analisada;

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

Para a situação da laje alveolar com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista, a resistência à força cortante deve ser calculada por:

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (3-17)$$

onde :

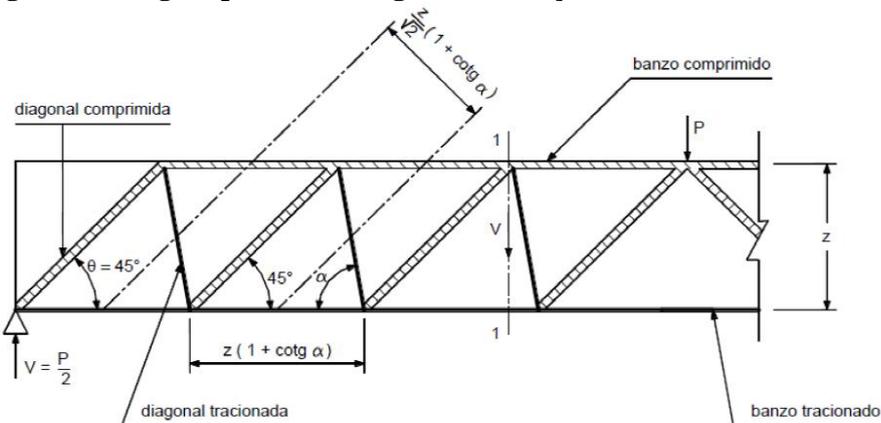
$V_{Rd1,a2}$: é a força resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.

3.3.2. SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014

O cisalhamento em peças protendidas pode ser analisado da mesma forma que em peças de concreto armado bastando considerar dois efeitos: a parcela de força normal que a protensão introduz e, quando os cabos são curvos, o efeito da força cortante oriunda da protensão. No caso da pré-tração basta considerar o efeito do normal, pois os cabos são retos. A norma ABNT NBR 6118:2014 prevê que o cálculo e verificações de cisalhamento podem ser feitas com analogia com modelos de treliça considerando duas situações, modelo tipo I e o modelo tipo II. No caso do modelo I a inclinação da biela é de 45° enquanto no modelo II pode variar de 30 a 45° . Desta forma é preciso antes de tudo definir qual o modelo é mais preciso para fazer as análises de peças protendida.

O modelo I admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e admite ainda que a parcela complementar V_c tenha valor constante, independentemente de V_{sd} . (Figura 3-7).

Figura 3-7: Viga representada segundo a treliça clássica de Ritter–Mörsch



[Fonte: Bastos (2015)]

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3-18)$$

Em que,

$$V_c = V_{c0} \cdot (1 + M_0/M_{sd,m\acute{a}x}) \leq 2V_{c0} \quad (3-19)$$

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (3-20)$$

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (3-21)$$

V_{RD3} : é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_c : é a parcela da força cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo em treliça;

V_{c0} : é o valor de referência para o V_c , quando $\theta = 45^\circ$;

f_{ctd} : é a resistência inferior a tração do concreto, com $\gamma_c = 1,4$;

b_w : largura total da somatória das nervuras da laje;

d : é a altura efetiva da seção da laje;

s : é o espaçamento entre elementos da armadura transversal A_{sw} , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural;

V_{sw} : é a parcela da força cortante resistida pela armadura transversal;

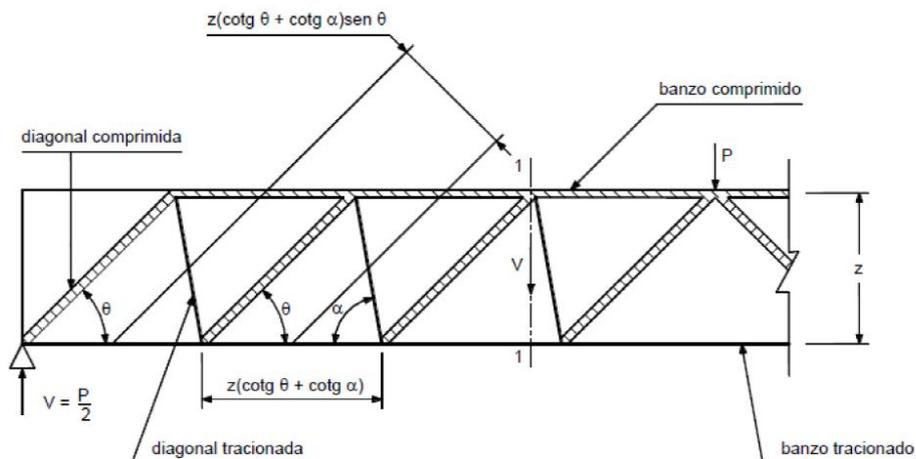
α : é o ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo-se tomar $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;

M_0 : é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão da borda da seção (tracionada por $M_{d,máx}$), provocada pelas forças normais de diversas origens concomitantes com V_{sd} , sendo essa tensão calculada com valores de γ_f e γ_p iguais a 1,0 e 0,9, respectivamente; os momentos correspondentes a essas forças normais não podem ser considerados no cálculo dessa tensão, pois são considerados em M_{sd} ; devem ser considerados apenas os momentos isostáticos de protensão.

$M_{sd,máx}$: é o momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise, que pode ser tomado como o de maior valor no semitramo considerado (para esse cálculo não se consideram os momentos isostáticos de protensão, apenas os hiperestáticos).

O modelo II admite diagonais de compressão inclinadas de θ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, com θ variável livremente entre 30° e 45° . Admite ainda que a parcela complementar V_c sofra redução com o aumento de V_{sd} (Figura 3-8).

Figura 3-8: Viga representada segundo a treliça generalizada



[Fonte: Bastos (2015)]

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3-22)$$

Em que,

$$V_c = V_{c1} \cdot (1 + M_0/M_{Sd,máx}) \leq 2V_{c1} \quad (3-23)$$

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (cotg\alpha + cotg\theta) \cdot sen\alpha \quad (3-24)$$

$V_{c1} = V_{c0}$ quando $V_{sd} \leq V_{c0}$;

$V_{c1} = 0$ quando $V_{sd} \leq V_{Rd2}$, interpolando-se linearmente para valores intermediários;

A ABNT NBR 6118:2014 (item 17.4.1) admite que o modelo de treliça seja associado a mecanismos resistentes complementares, desenvolvidos no interior do elemento estrutural e traduzidos por uma componente adicional V_c , que corresponde à “máxima força cortante que uma viga sem estribos pode resistir” – BASTOS (2015). Nas situações de flexão simples, o modelo de cálculo I considera essa parcela igual a V_{c0} e com valor constante que independe da força cortante de cálculo (V_{sd}). Para a mesma situação, no modelo de cálculo II, a parcela complementar V_c é variável e depende do valor de V_{sd} .

Nos dois modelos, a armadura transversal pode apresentar ângulo α de inclinação dos estribos variando entre 45° e 90° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, sendo usual a utilização de estribos com inclinação de 90° . Para CARVALHO¹ (2014), “a maneira de a peça resistir ao esforço cortante estará condicionada pela disposição adotada para

a armadura transversal”. Segundo DUARTE (2005), ângulos diferentes de $\alpha = 90^\circ$ não são usuais devido às dificuldades de montagem das armaduras e do controle do ângulo de estribos que não são verticais.

Apesar dos dois modelos considerarem que a viga tem comportamento análogo ao de uma treliça de banzos paralelos, percebe-se que cada modelo apresenta suas próprias condições de cálculo em virtude das diferentes considerações adotadas e, por consequência, podem apresentar diferentes valores para áreas das armaduras transversais.

MELLER (2016) analisa as diferenças obtidas no dimensionamento das armaduras de combate à força cortante em vigas de concreto armado, quando dimensionadas pelos dois modelos de cálculo, e estabelece parâmetros para a adoção do modelo mais econômico. A pesquisa consiste em calcular a área da armadura transversal (A_{sw}) em vigas, com variação das seções transversais, classes de concreto, valores da força cortante e do ângulo θ de inclinação das bielas de concreto comprimidas no intervalo de 30° à 45° , estabelecido para o modelo de cálculo II. Determina-se, ao final, qual combinação propicia a armadura mais econômica de combate ao cisalhamento. Chegando as conclusões:

✓ A adoção do modelo de cálculo II com ângulo θ de 30° resulta em menores áreas de aço da armadura transversal, correspondendo a aproximadamente 60% da área calculada com inclinação de 45° no mesmo modelo. Entretanto, ao adotar o ângulo θ de 30° , a força cortante máxima que pode ser resistida sem o esmagamento das bielas comprimidas de concreto (V_{Rd2}) é menor em relação aos outros ângulos, o que leva, em algumas situações, ao não atendimento da verificação de segurança ($V_{Sd} \leq V_{Rd2}$).

✓ A economia do modelo II, em relação ao modelo I, pode chegar a 30% ao adotar-se o ângulo θ de 30° . O aumento do ângulo de inclinação das bielas comprimidas no modelo II resulta em maiores valores de áreas de aço. Ao adotar ângulo θ compreendido entre 39° e 40° , os valores das áreas obtidas pelos dois modelos se igualam e, a partir desse ponto, ao aumentar o ângulo θ , a adoção do modelo de cálculo I proporciona maior economia, que pode chegar a 19% se comparado ao ângulo θ de 45° no modelo II.

✓ As relações entre as áreas de aço da armadura transversal obtidas pelos dois modelos independem da seção transversal da viga e do valor do esforço cortante a qual está submetida, ficando condicionada apenas à classe de concreto escolhida.

3.4. ANCORAGEM DA ARMADURA ATIVA

A transferência de tensões ocorre com os mecanismos de aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica. A aderência por adesão é devida às ligações físico-químicas, resultando em uma colagem na interface do aço com a nata de cimento e sua resistência é função da limpeza e rugosidade. A adesão é destruída por pequenos deslocamentos entre a armadura e o concreto e então não garante a ancoragem dos fios e cordoalhas. Após a destruição da adesão, inicia o mecanismo de atrito, que será função dos coeficientes de atrito das superfícies dos materiais aço e concreto e também função das tensões de compressão transversais devido aos carregamentos externos (principalmente próximo aos apoios) e da retração. O último mecanismo, aderência mecânica, é o mais efetivo e confiável. Esta aderência é devida a saliência na superfície da armadura, que funcionam como elementos de transmissão de esforços.

As ancoragens das armaduras ativas nas lajes alveolares são realizadas pela transferência de tensão de aço para o concreto, por meio de três mecanismos: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica.

3.4.1. SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014

O procedimento recomendado pela ABNT NBR 6118:2014 para o cálculo do comprimento de ancoragem de armaduras ativas, fios e cordoalhas, é apresentado a seguir:

- a) **Resistência de aderência de cálculo (f_{bpd}):** A resistência de cálculo para armaduras pré-tracionadas, deve ser obtido pela seguinte expressão:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd} \quad (3-25)$$

onde:

f_{bpd} : resistência de aderência de cálculo da armadura ativa;

η_{p1} e η_{p2} : coeficientes para o cálculo da tensão de aderência da armadura ativa;

$\eta_{p1} = 1,0$ para fios, 1,2 para cordoalhas de três e sete fios e 1,4 para fios dentados;

$\eta_{p2} = 1,0$ para situações de boa aderência e 0,7 para situações de má aderência;

f_{ctd} : é a resistência inferior a tração do concreto, considerando a idade do concreto na data de protensão para o cálculo do comprimento de transferência, com $\gamma_c = 1,4$.

b) **Comprimento de ancoragem básico (l_{bp})**: Este é o comprimento de ancoragem reta necessário para ancorar uma força limite em um fio ou cordoalha de protensão, dado abaixo:

- Para fios e isolados:

$$l_{bp} = \frac{\phi f_{pyd}}{4 f_{bpd}} \quad (3-26)$$

- Para cordoalhas de três ou sete fios:

$$l_{bp} = \frac{7\phi f_{pyd}}{36 f_{bpd}} \quad (3-27)$$

onde:

f_{bpd} : deve ser considerado a idade do concreto na data de protensão para o cálculo do comprimento de transferência e 28 dias para o cálculo do comprimento de ancoragem.

c) **Comprimento de transferência (l_{bpt})**: O comprimento de transferência é o comprimento necessário para transferir por aderência a força de protensão do fio ou cordoalha para o concreto, apresentado abaixo:

Se, no ato da protensão, a liberação do dispositivo de tração é gradual. Nesse caso, o comprimento de transferência deve ser calculado pelas expressões:

- Para fios dentados ou lisos:

$$l_{bpt} = 0,7 \cdot l_{bp} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (3-28)$$

- Para cordoalhas de três ou sete fios:

$$l_{bpt} = 0,5 \cdot l_{bp} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (3-29)$$

onde:

σ_{pi} : é a tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão.

Os valores encontrados acima deverão ser acrescidos em vinte e cinco por cento, caso a liberação da armadura de protensão não seja de forma gradual.

- d) **Comprimento de ancoragem necessário (l_{bpd}):** É o comprimento necessário para a ancoragem reta da força de protensão de cálculo que atua em um fio ou cordoalha. A equação abaixo estabelece o comprimento necessário.

$$l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bp} \cdot \frac{f_{pyd} - \sigma_{p\infty}}{f_{pyd}} \quad (3-30)$$

onde:

$\sigma_{p\infty}$: é a tensão na armadura ativa após todas as perdas de protensão ao longo do tempo.

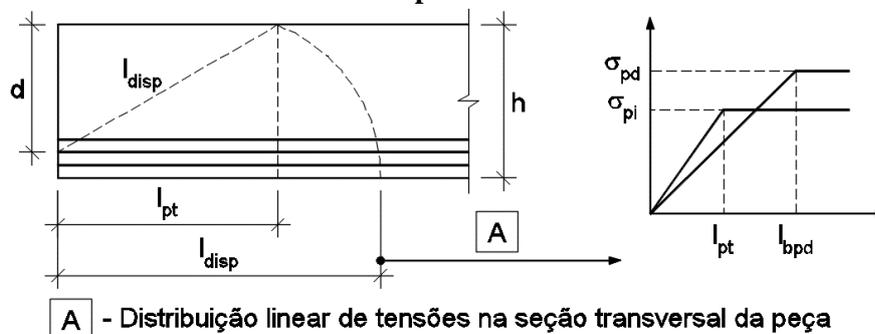
3.4.2. SEGUNDO A EN 1992-1-1:2004

Na região de ancoragem de cabos pré-tracionados, os seguintes parâmetros de comprimento devem ser considerados:

- Comprimento de transmissão, l_{pt} , sobre o qual a força de protensão (P_0) é totalmente transmitida para o concreto;
- Comprimento de dispersão, l_{disp} , sobre o qual as tensões no concreto dispersam gradualmente para uma distribuição linear através da seção de concreto;
- Comprimento de ancoragem, l_{bpd} , sobre o qual a força do cabo F_{pd} no estado limite último é totalmente ancorada no concreto.

A Figura 3-9 ilustra os parâmetros citado.

Figura 3-9: Transferência da protensão em elementos pré-tracionados, parâmetros de comprimento



[Fonte: adaptado de EN 1992-1-1:2004]

Onde:

σ_{pi} : é a tensão inicial de protensão na armadura;

σ_{pd} : é a tensão de cálculo de protensão na armadura.

a) **Transferência da protensão:** Na liberação dos cabos, a protensão pode ser suposta transferida para o concreto uma tensão constante de aderência, f_{bpt} , onde:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t) \quad (3-31)$$

Onde:

η_{p1} : é o coeficiente que considera o tipo de cabo e a situação de aderência na liberação;

$\eta_{p1} = 2,7$ para fios dentados;

$\eta_{p1} = 3,2$ para cordoalhas de 3 e 7 fios;

$\eta_1 = 1,0$ para condições de boa aderência;

$\eta_1 = 0,70$ se não há boa aderência, a menos que um valor maior possa ser justificado com alguma consideração de uma circunstância especial na execução.

$f_{ctd}(t)$: é o valor de projeto da resistência do concreto à tração, no instante da liberação da protensão.

$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot 0,7 \cdot f_{ctm}(t) / \gamma_c$. O valor recomentado para α_{ct} é 1,0.

O valor básico do comprimento de transmissão, l_{pt} , é dado por:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt} \quad (3-32)$$

Onde:

$\alpha_1 = 1,0$ para liberação gradual;

$\alpha_1 = 1,25$ para liberação repentina;

$\alpha_2 = 0,25$ para cabos com seção transversal circular;

$\alpha_2 = 0,19$ para cordoalhas de 3 e 7 fios;

ϕ : é o diâmetro nominal dos cabos;

σ_{pm0} : é a tensão no cabo imediatamente após a liberação da protensão.

O valor de cálculo do comprimento de transmissão pode ser obtido com o menor dos dois valores, dependendo da situação de cálculo:

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt} \quad (3-33)$$

$$l_{pt1} = 1,2 \cdot l_{pt} \quad (3-34)$$

Normalmente o valor mais baixo é utilizado para as verificações de tensões locais na liberação, e o valor mais alto para o estado limite último (cisalhamento, ancoragem, etc.).

As tensões no concreto podem ser admitidas com uma distribuição linear fora do comprimento de dispersão (Figura 3-9).

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \quad (3-35)$$

- b) **Ancoragem da força de tração para o estado limite último:** A ancoragem dos cabos deve ser checada nas seções onde as tensões de tração excedem $f_{ctk,0,05}$. A força no cabo deve ser calculada para a seção fissurada. Aonde a tensão de tração do concreto for menor que $f_{ctk,0,05}$, não é necessário a verificação da ancoragem.

A força de aderência para a ancoragem no estado limite último é:

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{cta} \quad (3-36)$$

Onde:

η_{p2} : é o coeficiente que considera o tipo de cabo e a situação de aderência na liberação;

$\eta_{p2} = 1,4$ para fios dentados;

$\eta_{p2} = 1,2$ para cordoalhas de 3 e 7 fios;

η_1 : é definido como no item anterior.

O comprimento total de ancoragem para ancorar um cabo com tensão σ_{pd} é:

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \alpha_2 \cdot \phi \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}) / f_{bpd} \quad (3-37)$$

Onde:

l_{pt2} : é o maior valor de cálculo do comprimento de transmissão;

α_2 : como definido no item anterior;

σ_{pd} : é a tensão no cabo correspondente à força de cálculo última;

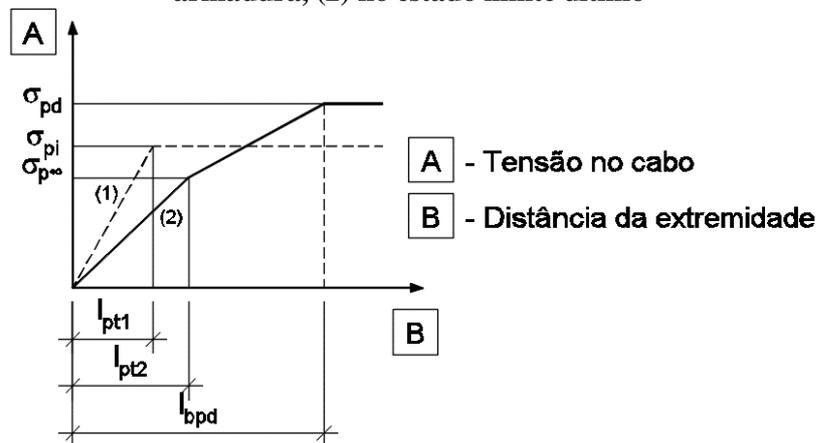
$\sigma_{pm\infty}$: é a protensão após as perdas totais.

$\eta_{p2} = 1,2$ para cordoalhas de 3 e 7 fios;

η_1 : é definido como no item anterior.

As tensões no cabo na zona de ancoragem estão ilustradas na Figura 3-10.

Figura 3-10: Tensões na zona de ancoragem de elementos pré-tracionados: (1) na liberação da armadura, (2) no estado limite último



[Fonte: adaptado de EN 1992-1-1:2004]

3.4.3. ESCORREGAMENTO DAS CORDOALHAS NAS EXTREMIDADES DA LAJE ALVEOLAR

No que se trata de escorregamento da armadura ativa, a norma brasileira ABNT NBR 14861:2011, item 7.9 (semelhante ao que se encontra na norma europeia EN1168:2008), diz que o escorregamento médio das cordoalhas nas extremidades das lajes alveolares, a ser considerado no cálculo das perdas de protensão, pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\Delta l_0 = 0,40 \cdot l_{pt2} \cdot \frac{\sigma_{cpo}}{E_p} \quad (3-38)$$

O escorregamento-limite das cordoalhas em cada extremidade das lajes alveolares é dado por:

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \cdot \Delta l_0 \quad (3-39)$$

Onde :

Δl_0 : é o escorregamento da cordoalha;

σ_{cpo} : é a tensão de protensão no instante da liberação da protensão;

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

E_p : módulo de elasticidade da armadura ativa.

Para a aceitação do escorregamento da cordoalha na produção, devem ser atendidos sete requisitos (11.8.1 a 11.8.7 ABNT NBR 14861:2011). De acordo com o item 11.8.5 se o escorregamento da cordoalha na extremidade da laje alveolar foi maior do que o valor-limite definido em projeto e permitido na documentação técnica enviada a produção, é recomendável que esta cordoalha seja desprezada e somente a quantidade restante de aço de protensão seja considerada efetiva, devendo passar pela reavaliação do projetista de estruturas.

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização das lajes alveolares têm como objeto validar a sua capacidade de carga. Segundo Van Acker (2007), quando iniciou-se a produção de lajes alveolares foi desenvolvido inicialmente o método produtivo e posterior pesquisa relacionadas ao dimensionamento. Por essa razão na década de 80 na Europa intensificou a padranização dos ensaios.

Os critérios normativos para os ensaios das laje alveolares serão os mesmos considerados para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa.

4.1. ENSAIOS PARA LAJES ALVEOLARES BIAPOIADAS

Os ensaios em lajes simplesmente apoiadas devem ser realizados de acordo com normas específicas. Com base no trabalho de COSTA (2009), são descritos os seguintes ensaios:

- ✓ Ensaio de força cortante;
- ✓ Ensaio de flexão;
- ✓ Ensaio com interação de força cortante e flexão.

COSTA (2009) descreve também procedimentos e medidas que devem ser tomados antes dos ensaios. São eles:

- ✓ Medidas preliminares. Efetuar medidas de geometria da seção transversal do elemento a ser ensaiado, tais como afundamento junto à face externa da cordoalha, dimensões dos alvéolos e etc... Além disso, anotar também alguma eventual imperfeição existente na peça, através de uma inspeção visual;
- ✓ Registro dos ensaios. Identificação da laje alveolar e marcação da instrumentação utilizada;
- ✓ Velocidade de aplicação do carregamento. De acordo com a FIP (1992) o carregamento deverá ser aplicado a uma taxa de 50 kN por minuto. Já a EN 1168:2008 recomenda aplicação de 10% da carga última por minuto;

✓ Condições de apoio. O apoio não poderá ter nenhuma obstrução ao deslocamento horizontal, para não introduzir esforços adicionais no elemento ensaiado.

4.1.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE

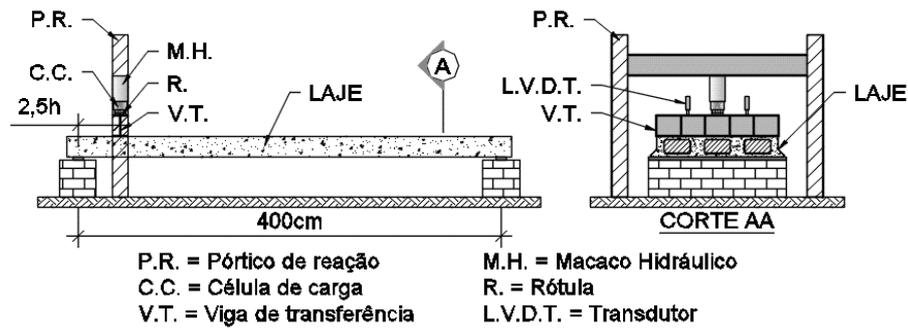
Para avaliar a resistência das lajes ao cisalhamento, pode-se utilizar o ensaio padrão presente no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN 1168:2005.

De acordo com CATOIA (2011), a resistência das lajes alveolares ao cisalhamento está totalmente relacionada com a resistência à tração do concreto, uma vez que esse tipo de laje não possui qualquer armadura transversal. Além disso, a resistência ao corte também é diretamente influenciada pela forma geométrica dos alvéolos, pela dosagem do concreto e pelo processo de produção. A resistência do concreto a tração é difícil de ser determinada a partir dos métodos tradicionais, e a influência da forma da seção transversal e do método de fabricação não pode ser determinada diretamente.

Os pontos apresentados anteriormente podem ser melhorados para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, pois, o processo de produção permite o posicionamento de armaduras complementares além das cordoalhas. O concreto apresenta uma relação água/cimento maior e com isso a sua resistência a tração pode ser mais elevada se comparado com um concreto mais seco. Para a determinação das resistências a tração e compressão do concreto podem ser utilizados os métodos convencionais, pois é possível a moldagens de corpos-de-prova. A utilização do EPS permite modelagens diferentes dos alvéolos para cada situação de projeto, conseqüentemente a laje alveolar moldada por fôrma fixa apresenta a característica de ser mais versátil.

A peça a ser ensaiada deve ser um elemento de largura real, com o vão de 4m ou 15h (h = altura da laje), prevalecendo a maior. A Figura 4-1 mostra um desenho esquemático do ensaio de força cortante. O ponto de aplicação de carga deverá ser o maior valor entre 2,5h, sendo h a altura da laje ou 600mm.

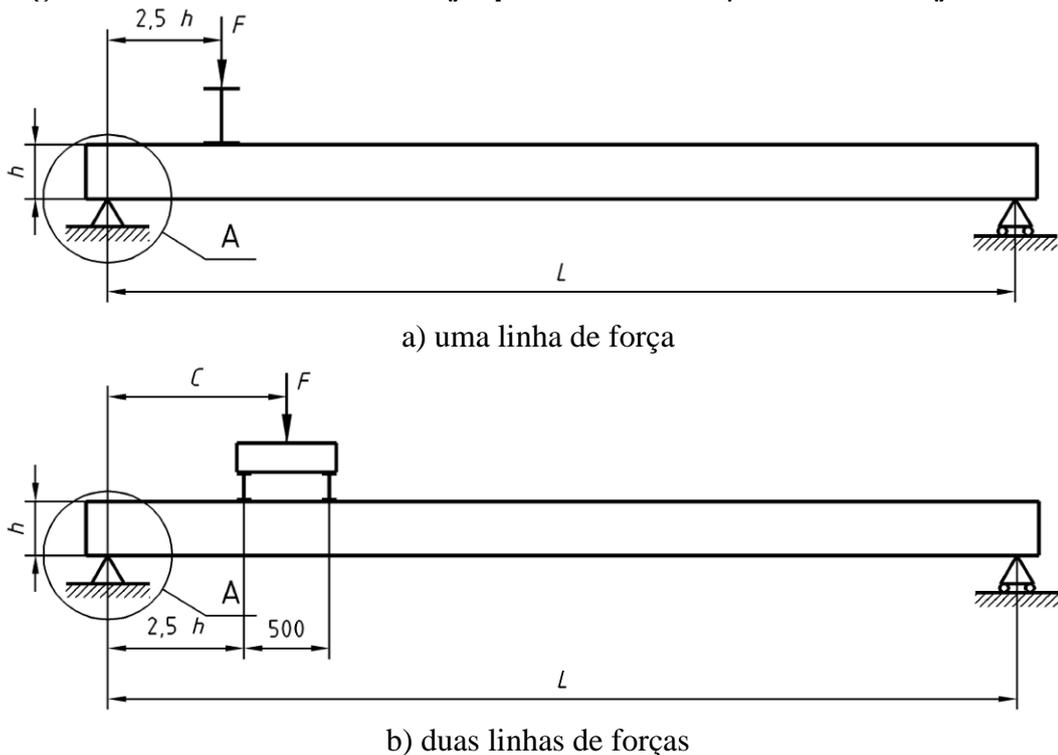
Figura 4-1: Desenho esquemático do ensaio de força cortante

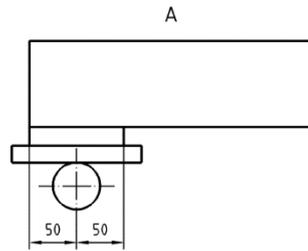


[Fonte: próprio autor]

A transferência da força para a laje é realizada a partir de uma viga rígida metálica [(Figura 4-2 a) e b)]. Esta viga deve possuir uma altura mínima de 150 mm, mas é indicado o uso de 250 mm no caso de ser utilizado um macaco hidráulico. Deverá haver, ao longo de toda a largura, uma distribuição uniforme de forças. O apoio mais próximo do ponto de aplicação da força deve ser móvel, de forma que nenhuma força axial seja gerada pela rotação do elemento de apoio. Entre o elemento e a viga de apoio, um material para a distribuição de força com 10 mm de madeira compensada ou neoprene ou uma faixa de argamassa ou gesso podem ser aplicadas. Esse material deve compensar as irregularidades da superfície da laje e alguma eventual curvatura do elemento na direção transversal [(Figura 4-2 c)].

Figura 4-2: Possibilidades de arranjos para ensaio de força cortante em laje alveolar





c) detalha de apoio em a) e b).

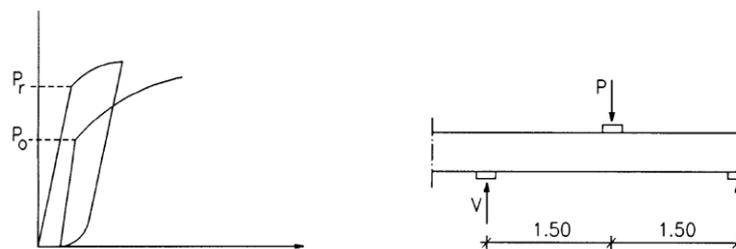
[Fonte: EN 1168:2005 – Figura J.1]

4.1.2. ENSAIO À FLEXÃO

O objetivo deste ensaio é obter informações sobre a força de protensão e a resistência do concreto à tração na flexão. O ensaio pode ser feito, de acordo com o manual FIP (1992), com a parte remanescente de peça utilizada no ensaio de força cortante. Quando se usa a mesma peça para ensaio à flexão e a força cortante, procura-se descartar a região já ensaiada (a força cortante).

De acordo com a FIP (1992), é recomendado um ensaio de flexão padrão, que é realizado com uma laje de vão equivalente a 3 m, sendo a força aplicada no meio do vão, conforme apresentado na Figura 4-3.

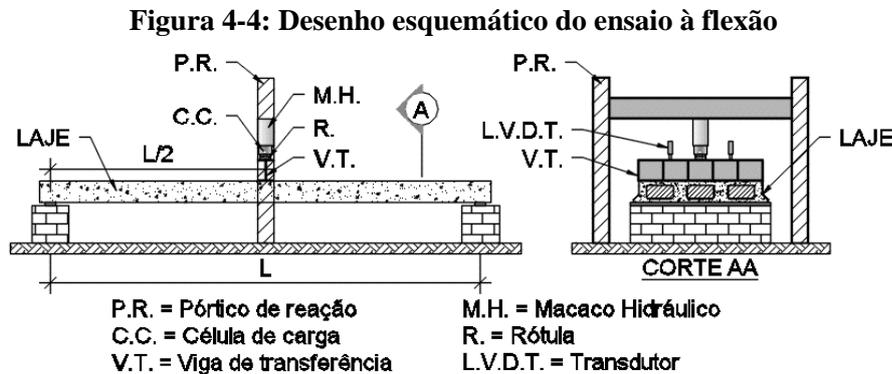
Figura 4-3: Ensaio para a determinação da resistência do concreto a tração na flexão e da tensão de protensão do aço



[Fonte: adaptado de CATOIA (2011)]

Durante o ensaio, a força deve ser aumentada até ocorrer fissuras por flexão. A partir daí a laje é descarregada e carregada novamente. Assim, quando o momento de descompressão (M_0) for atingido, as fissuras abrirão novamente. Por meio do momento de fissuração (M_f), é possível obter a resistência à tração na flexão (f_{ctf}) e a tensão de protensão no aço (σ_p).

A Figura 4-4 mostra um esquema representativo de um ensaio de laje alveolar à flexão.



[Fonte: próprio autor]

4.2. AVALIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Através dos resultados obtidos dos ensaios de flexão e força cortante é possível determinar os valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade da peça. Isto pode ser feito através das fórmulas e de modelos de cálculos já definidos.

As lajes alveolares moldadas por fôrma fixa possibilita a extração de corpo-de-prova conforme apresentado no Capítulo 5, para a realização de ensaios para caracterizar o concreto quanto a resistência a tração e quanto a obtenção do módulo de elasticidade.

4.2.1. AVALIAÇÃO DA f_{ctm} A PARTIR DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO EXPERIMENTAL

Para um esquema estrutural conforme apresentado na Figura 4-4, onde tem-se uma laje biapoiada com uma carga concentrada no meio do vão, pode-se calcular a resistência a tração do concreto. A partir do valor do momento de fissuração [Equação (4-1)] obtido pelo ensaio e isolando o valor da resistência a tração.

$$M_{r,exp} = \frac{P_{r,exp} \cdot L}{4} + \frac{g_1 \cdot L^2}{8} \quad (4-1)$$

Onde:

$M_{r,exp}$: momento de fissuração relativo a força aplicada no atuador no momento do surgimento da primeira fissura;

$P_{r,exp}$: carga aplicada no atuador;

L : distância em apoios, vão da laje;

g_l : peso próprio da laje.

Os valores da resistência a tração (f_{ctm}) e compressão (f_{cm}) média do concreto é obtido de maneira indireta.

$$f_{ctm} = \left[\frac{(N_{p,i} + N_{p,s})}{A_{hom}} + \frac{y_{hom}}{I_{hom}} \cdot (N_{p,i} - N_{p,s}) - \frac{y_{hom}}{I_{hom}} \cdot M_{r,exp} \right] / \alpha_f \quad (4-2)$$

$$f_{cm} = \left(\frac{f_{ctm}}{0,3} \right)^{3/2}; \text{ para concretos de classe até C50.} \quad (4-3)$$

$$f_{cm} = 9,09 \cdot \left(e^{\frac{f_{ctm}}{2,12}} - 1 \right); \text{ para concretos de classes entre C55 a C90.} \quad (4-4)$$

Onde:

f_{ctm} ; resistência a tração média do concreto (obtida no momento do ensaio), em megapascal (MPa);

f_{cm} ; resistência a compressão média do concreto (obtida no momento do ensaio), em megapascal (MPa);

$N_{p,i}$: força de protensão devido ao cabo inferior (consideradas as perdas até a data do ensaio);

$N_{p,s}$: força de protensão devido ao cabo superior (consideradas as perdas até a data do ensaio);

e_i : excentricidade efetiva do cabo inferior (valor médio de todos os cabos inferiores);

e_s : excentricidade efetiva do cabo superior (valor médio de todos os cabos superiores);

A_{hom} : área da seção, homogeneizada, considerando a seção efetiva da laje ensaiada;

I_{hom} : momento de inércia da seção, homogeneizada, considerando a seção efetiva da laje ensaiada;

y_{hom} : posição do centroide da seção, homogeneizada, medido a partir da borda inferior da laje ensaiada;

$M_{r,exp}$: Momento de fissuração relativo a força aplicada no atuador no momento do surgimento da primeira fissura;

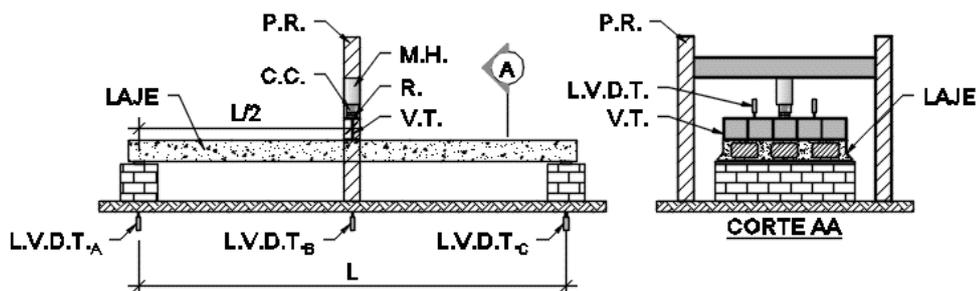
α_f : coeficiente de forma, considerado 1,5 para seção retangular.

A resistência a tração do concreto, para o efeito de cisalhamento é um dos parâmetros mais importantes quando se trata de lajes alveolares, já que determina qual o mecanismo de ruptura será o crítico. Sendo assim, erros graves de interpretação de resultados podem ocorrer quando estes parâmetros são mal informados ou obtidos incorretamente.

4.2.2. AVALIAÇÃO DO $E_{c,ef}$ A PARTIR DA FLECHA EXPERIMENTAL

É possível determinar o valor do módulo de elasticidade do concreto através da leitura da flecha do ensaio de flexão. A Figura 4-5 mostra a localização dos transdutores de deslocamentos para a obtenção da flecha durante a realização do ensaio. Para se determinar a flecha utiliza-se a equação (4-5).

Figura 4-5: Utilização de sensores LVDT para indicação de leitura da flecha durante o ensaio de flexão



P.R. = Pórtico de reação
 C.C. = Célula de carga
 V.T. = Viga de transferência
 M.H. = Macaco Hidráulico
 R. = Rótula
 L.V.D.T. = Transdutor

[Fonte: próprio autor]

Flecha experimental.

$$a_{exp} = LVDT_B - \frac{LVDT_A + LVDT_C}{2} \quad (4-5)$$

Estimativa do módulo de elasticidade.

$$E_{c,ef} = \frac{P_{exp} \cdot L^3}{48 \cdot I_{hom} \cdot a_{exp}} \quad (4-6)$$

Onde:

P_{exp} : força aplicada no ensaio;

L : distância em apoios, vão da laje;

I_{hom} : momento de inércia da seção, homogeneizada, considerando a seção efetiva da laje ensaiada;

a_{exp} : flecha experimental.

5. PROCESSO DE PRODUÇÃO

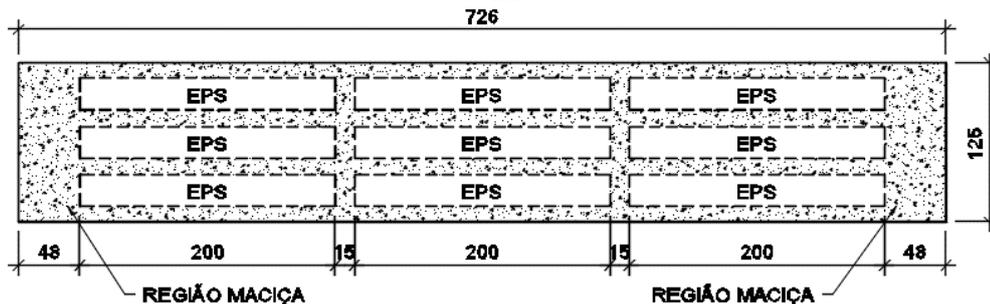
Neste capítulo são apresentadas as principais etapas de produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa, e utilização do EPS para a constituição do alvéolo, além de comparativo com a produção de laje alveolar. A preferência pelas lajes com EPS, em detrimento das outras lajes que utilizam fôrma fixa para a produção, se dá na medida que os modelos usados nos ensaios são deste tipo de laje.

5.1. INTRODUÇÃO

O processo produtivo de laje alveolar moldada por fôrma fixa é versátil se comparado ao processo produtivo das lajes produzidas com equipamento do tipo de extrusão e moldagem. Porém, o processo é mais lento devido a necessidade de grande intervenção de mão-de-obra.

O fato do concreto ser fluido e lançado em fôrma permite o posicionamento de armaduras complementares além da utilização da protensão. O fato de se utilizar EPS apresenta uma outra vantagem que é a possibilidade de interrupção do EPS, permitindo assim que a extremidade seja maciça conforme mostrado na Figura 5-1 e Figura 5-2.

Figura 5-1: Vista superior típica de laje alveolar moldada por fôrma fixa com a interrupção do EPS

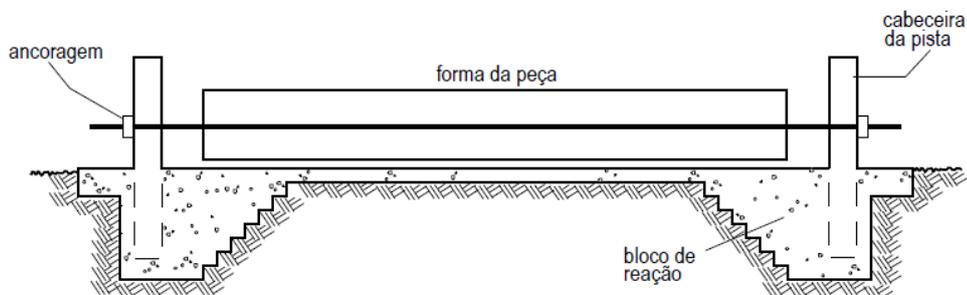


[Fonte: próprio autor]

Figura 5-2: Vista da extremidade da laje alveolar moldada por fôrma e interrupção do EPS

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Para este sistema de produção de lajes é utilizada uma pista, denominada pista de protensão, que em geral tem 100 a 200m de comprimento. Nas suas extremidades estão localizadas as cabeceiras onde em um dos lados é chamado de ancoragem morta, onde são fixados os cabos por meio de cunha e porta cunha, na outra extremidade os cabos são tracionados com macacos de protensão e ancorando com o mesmo sistema da cabeceira oposta. A Figura 5-3 apresenta um esquema típico de pista de protensão.

Figura 5-3: Esquema de pista de protensão com aderência inicial

[Fonte: adaptado de INFORSATO (2009)]

Uma característica desse sistema é a utilização de cabos na posição reta, paralela a pista de protensão, com o auxílio de macacos hidráulicos, que se apoiam em blocos na cabeceira da pista. Após o estiramento dos cabos e a concretagem, quando atingindo o f_{ck} informado pelo engenheiro de estruturas, esses cabos são cortados ou desprotendidos aplicando assim efetivamente a protensão no elemento, que é dada apenas pela aderência entre as cordoalhas e o concreto.

A não utilização dos equipamentos de extrusão ou moldagem implica principalmente em um maior tempo de produção, pois além do posicionamento das armaduras de protensão, é usual a utilização de armadura de cisalhamento nas extremidades e o posicionamento do EPS.

O lançamento e o adensamento do concreto também implicam em um maior tempo de execução se comparado com o processo industrial.

5.2. ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo de laje alveolar moldada por fôrma fixa é diferente se comparado com o processo produtivo da laje alveolar, porém, as características finais do produto são semelhantes, pois as duas tipologias apresentam as seguintes características: laje protendida utilizando protensão com aderência inicial, vazios centrais (alvéolos) promovidos por meio da utilização de EPS (Figura 5-4), ou mangueira com a ar comprimido (Figura 5-5) ou até mesmo tubo metálico sacado após o concreto atingir uma pequena resistência suficiente para não perder á sua forma (Figura 5-6).

Figura 5-4: Utilização de EPS para a forma do alvéolo



[Fonte: adaptado de SANTOS (2014)]

Figura 5-5: Fôrma contendo tubos de plástico preenchidos por ar comprimido



[Fonte: adaptado de SANTOS (2014)]

Figura 5-6: Fôrma contendo tubos de aço

[Fonte: adaptado de SANTOS (2014)]

De acordo com PETRUCELLI (2009) as principais etapas do processo produtivo da laje alveolar são:

- a) Preparação das pistas, ou seja, limpeza e aplicação de desmoldante;
- b) Posicionamento dos cabos e protensão;
- c) Lançamento do concreto e produção da laje;
- d) Marcação dos painéis (pré-cortes) e possíveis recortes na pista;
- e) Endurecimento e cura;
- f) Liberação da protensão e corte das lajes;
- g) Içamento e estocagem;
- h) Recortes e acabamentos (se necessários).

Cada etapa é abordada singularmente nos itens a seguir dado ênfase nas principais diferenças do método produtivo de laje alveolar e laje alveolar moldada por fôrma fixa.

5.2.1. PREPARAÇÃO DA PISTA

Lajes alveolares são produzidas em pistas com comprimento usuais de 100 a 200m, dependendo da disposição do espaço da fábrica. Essas pistas são constituídas de fôrmas metálicas com trilhos para apoiar a máquina que se desloca sobre eles.

A fôrma das lajes alveolares é constituída apenas por uma chapa metálica horizontal (Figura 5-7) pelo fato do concreto não ser lançado e vibrado. As alturas das lajes são determinadas pelo equipamento.

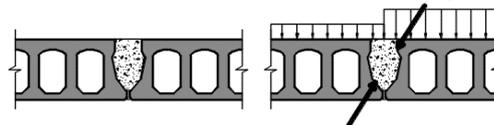
Figura 5-7: Fôrma para produção de laje alveolar



[Fonte: site www.weiler.com.br (2016)]

As juntas laterais das lajes alveolares são definidas como chave de cisalhamento (Figura 5-8) e a sua forma são obtidas através dos equipamentos. As principais funções da chave de cisalhamento são: garantir o funcionamento solidário das diversas placas, promover uma distribuição dos carregamentos, acabamento e estanqueidade e contribuir para a formação do diafragma rígido.

Figura 5-8: Chave de cisalhamento em laje alveolar



[Fonte: próprio autor]

Nas lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, também é presente a chave de cisalhamento que, para este caso, a sua geometria é determinada pelas fôrmas laterais. As laterais são geralmente metálicas e apresentam características de serem móveis para possibilitar a retirada da laje, conforme pode ser vista na Figura 5-9.

Figura 5-9: Laterais metálicas para laje alveolar moldada por fôrma fixa

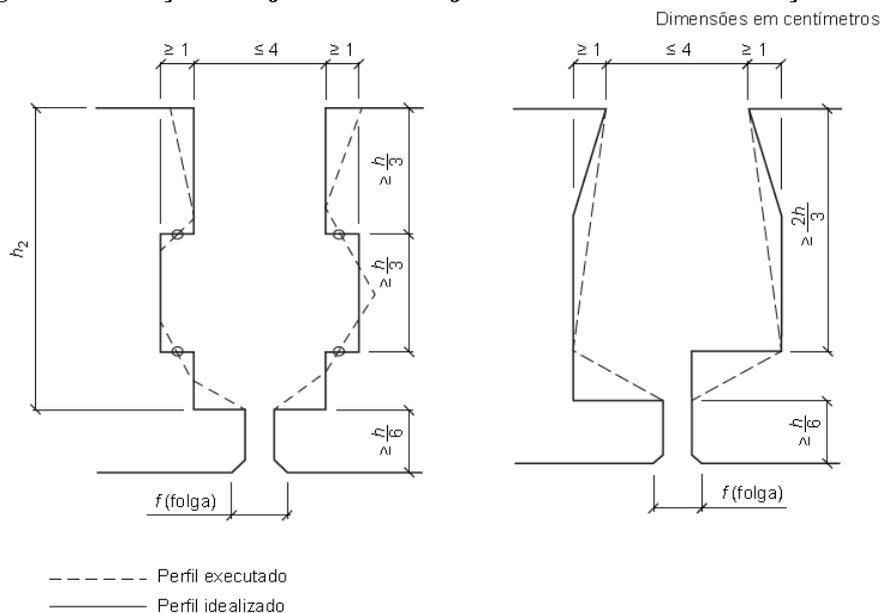


[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Usualmente o fabricante define apenas uma lateral que é utilizada para todas as alturas das lajes, fazendo com que nem todas as alturas das lajes tenham as suas chaves de cisalhamento de acordo com as recomendações proposta pela ABNT NBR 9062:2017. De acordo com a mesma norma não há necessidade de verificação dos esforços atuantes na região das juntas dos elementos pré-moldados de lajes, se a tensão de referência τ_{wd} não exceder $0,15 f_{ctdj}$ (considerando a tensão calculada na altura h_2 da Figura 5-10). Neste caso, a ligação pode ser realizada pelo rejuntamento das folgas entre as bordas dos elementos pré-moldados, com argamassa de cimento ou concreto.

As folgas devem apresentar geometria adequada para garantir a transmissão da força cortante, sem levar em conta a aderência da argamassa de cimento ou concreto com os elementos, conforme exemplos da Figura 5-10.

Figura 5-10: Seções nas juntas entre lajes com transmissão de força cortante



[Fonte: ABNT NBR 9062:2017 – Figura 15]

Uma singularidade na preparação da pista para a produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, é que o comprimento da laje já é determinado por tampas em suas extremidades (Figura 5-11), sendo assim a laje já é produzida no seu comprimento de projeto. Essas tampas extremas são fixadas através de parafusos nas fôrmas laterais, conforme pode ser visto na Figura 5-12. A utilização destas tampas em suas extremidades, faz com que não seja necessário a utilização de equipamentos para corte transversal. Cabe observar que mesmo no processo de produção de lajes moldada por fôrma fixa a produção poderia ser contínua, semelhante ao processo de produção de laje alveolar.

Figura 5-11: Tampas extremas para produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Figura 5-12: Fixação das tampas extremas nas fôrmas laterais



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Diferentemente o processo de laje alveolar em que consiste na produção contínua que geralmente é definido pelo comprimento da pista (Figura 5-13). Após a produção total a laje é recorta transversalmente no comprimento de projeto.

Figura 5-13: Laje alveolar com o comprimento da pista



[Fonte: Leonardi Construções Industrializadas (2014)]

As fôrmas devem estar livres de qualquer tipo de sujeira para então aplicar o desmoldante. Em PETRUCCELLI (2009), apresenta a aplicação do desmoldante com pulverizador conforme pode ser visto nas figuras Figura 5-14 e Figura 5-15.

Figura 5-14: Aplicação de desmoldante com pulverizador



[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

Figura 5-15: Proteção das cordoalhas durante a aplicação do desmoldante



[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

A aplicação do desmoldante pode ser realizada com auxílio de equipamento conforme Figura 5-16. Durante a sua passagem o cabo é suspenso e ocorre a aplicação do desmoldante na fôrma metálica. Para que não haja o contato das cordoalhas com o fluido, um operador posiciona um sarrafo de madeira a cada 3 m aproximadamente (Figura 5-17).

Figura 5-16: Aplicação de desmoldante por meio de equipamento



[Fonte: Leonardi Construções Industrializadas (2014)]

Figura 5-17: Posicionamento dos sarrafos



[Fonte: Leonardi Construções Industrializadas (2014)]

Objetivo do desmoldante é formar uma camada fina, entre o concreto e a fôrma, para que não crie aderência entre eles, facilitando a desforma e o reaproveitamento dos mesmos. Essa aderência ocorre entre a adição da água de amassamento de argamassa que carrega parte do cimento dissolvido para dentro da porosidade do concreto. E quando não removidos corretamente deixam impregnado um resíduo oleoso na superfície do concreto, e mesmo que a desforma seja fácil, esse excesso que penetra exerce ação de hidrofugação, impedindo a que a água penetre no amassamento no interior do substrato do concreto, podendo comprometer a argamassa.

Já a limpeza do concreto, deve ser executada através de procedimentos que removam o desmoldante, como o uso de escovas, jatos de pressão, entre outros métodos. Para uma melhor eficiência, os desmoldantes devem apresentar fácil espelhamento e boa capacidade de recobrimento da superfície de forma uniforme.

É importante a escolha correta para o desmoldante de forma a garantir uma boa superfície bem-acabada e limpa, pois uma das vantagens é a possibilidade da ausência do uso de forros.

Nesta etapa do processo produtivo os processos de produção dos dois sistemas são semelhantes, exceto pela necessidade de fôrma lateral para a produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, e também pelo fato que a laje alveolar moldada por fôrma fixa já ser fabricada no comprimento de projeto.

5.2.2. POSICIONAMENTO DOS CABOS DE PROTENSÃO

Após o preparo da pista, devem-se posicionar os cabos de protensão conforme projeto. Em uma das extremidades, o cabo é preso através de cunhas que são chamadas de “cunhas passivas”. Na outra extremidade, onde ocorre a protensão, são usadas as “cunhas ativas” que são responsáveis pela ancoragem.

Na produção de laje alveolar a pista está livre para o posicionamento dos cabos, ou seja, o operário percorre toda a extensão da pista puxando a cordoalha. As cordoalhas são fornecidas em bobinas com aproximadamente 3800 m que fica posicionada em uma extremidade da pista (Figura 5-18).

Figura 5-18: Bobina de cordoalha



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

A cordoalha inicialmente é posicionada na primeira cabeceira passando pela máscara de furações que é denominada como locação dos crivos (Figura 5-19). Na outra extremidade existe uma mesma locação dos crivos a onde a cordoalha é posicionada de forma simétrica.

Figura 5-19: Cabeceira metálica com as furações para as cordoalhas e locação dos crivos



[Fonte: site www.weiler.com.br (2016)]

Já para a produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, esta etapa do processo é diferente, pois como as lajes são produzidas no comprimento de projeto, a passagem das cordoalhas demanda maior tempo, pois além do posicionamento nas furações das cabeceiras, a cordoalha passa por máscaras semelhantes em cada unidade de laje produzida na mesma pista. A Figura 5-20 apresenta dificuldade do operário para executar essa atividade.

Figura 5-20: Tampas extremas com furações para passagem da cordoalha



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Durante a passagem dos cabos de protensão, além da passagem por todas as máscaras para cada unidade de laje, existe a possibilidade caso em projeto seja especificado armadura de cisalhamento (estribos), que devem envolver as cordoalhas, ou seja, o arranjo das armaduras de protensão estão contidas pelos estribos. A Figura 5-21 apresenta a passagem das cordoalhas em uma laje alveolar moldada por fôrma fixa, com armaduras em suas extremidades.

Figura 5-21: Extremidade de laje alveolar moldada por fôrma fixa com armaduras de reforço

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Segundo PETRUCELLI (2009), antes de iniciar a protensão, é necessário distribuir correntes de proteção ao longo da pista, e proteger a região de protensão com uma grade. Em geral, durante o processo de aplicação de protensão nas cordoalhas, a área onde está localizada a pista de protensão é isolada, pois se houver a ruptura de uma cordoalha o acidente poderá causar danos irreparáveis. Existem equipamentos que permitem protender todos os cabos de uma só vez ou apenas um por vez. A Figura 5-22 mostra os macacos de protensão para esse último caso.

Figura 5-22: Equipamentos de protensão para cabos isolados

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

5.2.3. LANÇAMENTO DO CONCRETO E PRODUÇÃO DAS LAJES

A etapa do lançamento do concreto apresenta grande variação se comparado o processo de fabricação da laje alveolar com a laje alveolar moldada por fôrma fixa. A produção de laje alveolar se dá de forma contínua e com o uso de equipamentos específicos, o sistema

requer um concreto com propriedades singulares, tanto para as máquinas extrusoras quanto para as moldadoras. Já para o processo de laje alveolar moldada por fôrma fixa a fabricação não é contínua, e o concreto apresenta características usuais, pois ele é lançado e vibrado.

Na fabricação da laje alveolar os dois processos (extrusão e moldagem) trabalham com sistema de vibração e compactação. No sistema de extrusão o concreto é prensado pelo equipamento e comprimido nas paredes do molde. No sistema de fôrmas deslizantes, as fôrmas deslizam moldando os alvéolos. A Figura 5-23 mostra os equipamentos de produção de laje alveolar por extrusão e moldagem.

Figura 5-23: Equipamentos para fabricação de laje alveolar: a) extrusora b) moldadora



a)

b)

[Fonte: site www.weiler.com.br (2016)]

De acordo com PETRUCCELLI (2009), o sistema de extrusão tem como característica a utilização de concreto com uma relação água/cimento (a/c) muito baixa, de aproximadamente 0,30 a 0,40, conseqüentemente, altas resistências do concreto podem ser obtidas, variando de aproximadamente 50 MPa a 75 MPa nos corpos-de-prova retirados da laje para resistência à compressão, e de 4 a 7 MPa para resistência à tração, usando uma quantidade mínima de cimento. Para o sistema de fôrmas deslizantes, geralmente são usadas relações a/c mais altas e, conseqüentemente, as resistências do concreto são usualmente um pouco mais baixas. Devida a essa característica, esse concreto possui maior trabalhabilidade e é possível tornar a superfície mais rugosa, melhorando as condições de aderência entre o concreto da laje e da capa estrutural.

Por se tratar de um concreto seco devido ao baixo consumo de água, há necessidade de se fazer um estudo bem detalhado para o seu comportamento, já que não é comumente empregado, a não ser para moldagem de lajes alveolares. O controle de qualidade é singular, uma vez que não há como se fazer o *slump test* e a moldagem de corpos-de-prova deve ser

adaptada considerando prescrições da norma, fazendo-se uma simulação do que ocorre com o concreto quando usado na máquina produtora.

O concreto para a produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa é mais fluido com resistência a compressão variando de 40, 45 e 50 MPa, a relação água cimento são, respectivamente, de 0,48 0,43 e 0,36. A Figura 5-24 mostra o concreto sendo vibrado, o que nunca ocorre no processo de produção de laje alveolar.

Figura 5-24: Concreto vibrado na produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

O concreto é preparado na central de concreto (Figura 5-25) e transportado por meio de pórtico rolante com o auxílio de caçamba (Figura 5-26). O concreto é produzido parcialmente até completar a concretagem da pista.

Figura 5-25: Usina de produção de concreto



[Fonte: Petrucelli (2009)]

Figura 5-26: Caçamba para auxílio do transporte de concreto

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

O lançamento do concreto é efetuado por etapas. Inicialmente, é lançada uma pequena camada de concreto com aproximadamente 3 cm no fundo da fôrma e vibrado, conforme pode ser visto na Figura 5-27. O controle desta etapa é apenas visual, seguindo como referência as laterais da fôrma. Após o lançamento desta primeira camada o concreto é vibrado, conforme apresentado na Figura 5-24.

Figura 5-27: Concreto sendo lançado por etapas

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Para a regularização da concretagem da camada do fundo, é desenvolvido um equipamento que tem como finalidade vibrar e regularizar a camada de concreto conforme especificado em projeto. A Figura 5-28 apresenta o equipamento e a sua aplicação. O

equipamento é ajustável para várias alturas de lajes. A sua aplicação é feita também na última camada de concreto, onde a altura final da laje é definida.

Figura 5-28: Equipamento desenvolvido para vibração e regularização de camada de concreto



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

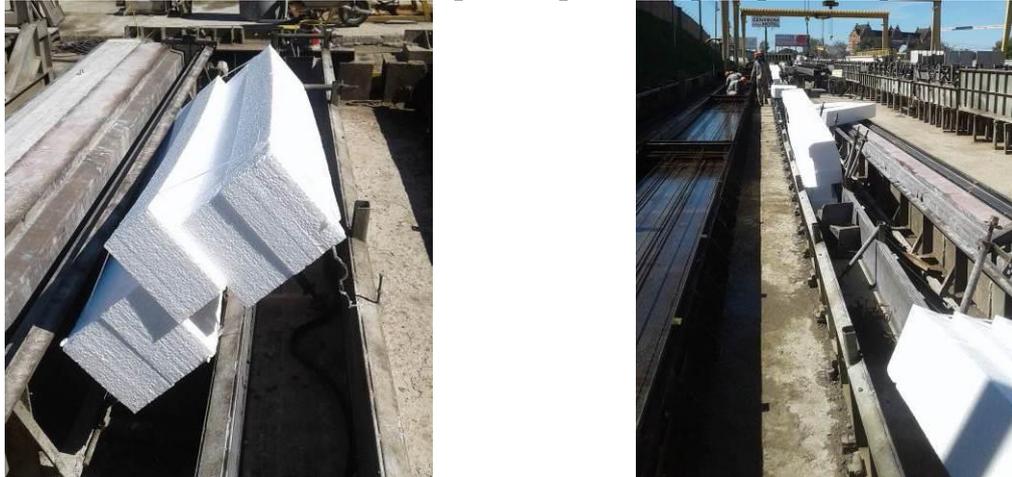
O equipamento é utilizado para cada unidade de laje produzida para uma mesma pista de protensão, após a vibração e regularização do concreto de uma laje, o equipamento é suspenso pelos operários e posicionado na laje seguinte, conforme pode ser visto na Figura 5-29.

Figura 5-29: Equipamento sendo transferido para a próxima laje



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Na sequência ocorre a etapa mais trabalhosa do processo produtivo que é a posicionamento e a fixação do EPS. Antes da concretagem da primeira camada o EPS é posicionado ao lado da pista em toda a sua extensão (Figura 5-30).

Figura 5-30: EPS distribuído ao longo da pista de protensão para posterior posicionamento

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Posteriormente, o EPS é posicionado sobre a primeira camada de concreto. Neste instante o EPS está solto, pois foi simplesmente lançado sobre a primeira camada de concreto, conforme pode ser visto na Figura 5-31. A sua fixação se dará na próxima etapa.

Figura 5-31: Posicionamento do EPS sobre a primeira camada de concreto

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas para melhoramento da fixação, e estabilização do EPS durante a execução do processo produtivo. A Figura 5-32 mostra o suporte desenvolvido para que o EPS não se movimente no sentido transversal.

Figura 5-32: Dispositivo para fixação do EPS

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Além das “barras” de travamento mostradas na Figura 5-32, são utilizados ganchos em formato de “U” (Figura 5-33). Este gancho é posicionado sob a cordoalha superior e em geral fixam até dois EPS.

Figura 5-33: Gancho para auxílio na fixação do EPS

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Mesmo que no projeto a laje alveolar moldada por fôrma fixa não apresente problema na verificação em vazio, onde tem-se somente o peso próprio atuando e com a totalidade da protensão para resistir todo o carregamento, é recomendado o posicionamento de cordoalhas ou fios protendidos na fibra superior, com a tensão mínima possível. Essas

cordoalhas têm como principal objeto auxiliar o posicionamento do gancho em “U” e não permitir que o EPS movimente para cima. Destaca-se que o desafio deste processo produtivo é justamente não permitir a movimentação do EPS.

A Figura 5-34 mostra o posicionamento do gancho “U”, e a sua colocação é manual passando por de baixo da cordoalha superior. É feito um giro para que a extremidade do gancho fique posicionada dentro do EPS.

Figura 5-34: Posicionamento do gancho em “U”



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Mesmo com as técnicas e práticas apresentadas acima, dependendo da fluidez do concreto, o EPS tende a subir, necessitando assim de algum dispositivo para reposicioná-lo. De acordo com o fabricante quanto mais fluido for o concreto, mais dificultoso é a sua fixação e o seu posicionamento, pois ele tende a subir com mais facilidade.

Depois da fixação do EPS ocorre a segunda etapa da concretagem, onde são preenchidas as nervuras e a borda superior da laje. O período entre a primeira e a segunda etapa é relativamente pequeno, evitando assim a possibilidade de juntas entre os concretos. A Figura 5-35 apresenta esta etapa do processo. O excesso do concreto lançado é espalhado pelos operários, de forma a garantir que toda a laje seja preenchida de forma semelhante (Figura 5-36).

Figura 5-35: Concretagem da nervura e da borda superior da laje

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Figura 5-36: Espalhamento do concreto

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

De modo a garantir que toda a nervura seja preenchida nesta etapa do processo da fabricação o concreto também é vibrado. Finalizado o adensamento do concreto, as “barras” de fixação do EPS são removidas, porém os ganchos em “U” permanecem no interior da laje alveolar moldada por fôrma fixa. A Figura 5-37 apresenta o concreto sendo vibrado e a remoção da “barra” de fixação do EPS.

Figura 5-37: a) adensamento do concreto nas nervuras e da borda superior da laje b) remoção das “barras” de fixação do EPS



a)



b)

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Para a última etapa do processo de lançamento do concreto, o equipamento apresentado na Figura 5-28 tem a sua altura ajustada, para que a laje fique na altura final indicada em projeto. O seu uso também tem como objetivo adensar e regularizar o concreto na parte superior da laje. A Figura 5-38 mostra as etapas deste processo.

Figura 5-38: Equipamento para dar acabamento a parte superior da laje



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Para a verificação final da altura da laje alveolar moldada por fôrma fixa, o colaborador introduz um vergalhão de aço verticalmente, até que seja atingido o fundo da fôrma. Retira-se o vergalhão e mede-se a parte que ficou marcada pelo concreto. O procedimento apresenta pouca precisão (Figura 5-39).

Figura 5-39: Método utilizado para aferir a altura da laje

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Finalmente, a parte superior da laje é escovada com uma vassoura para uma melhor aderência entre a capa de concreto e a laje alveolar moldada por fôrma fixa (Figura 5-40). Esse procedimento é possível devido a utilização do concreto fluido, pois não há o endurecimento imediato do concreto.

Figura 5-40: Acabamento rugoso na parte superior da laje alveolar moldada por fôrma fixa

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

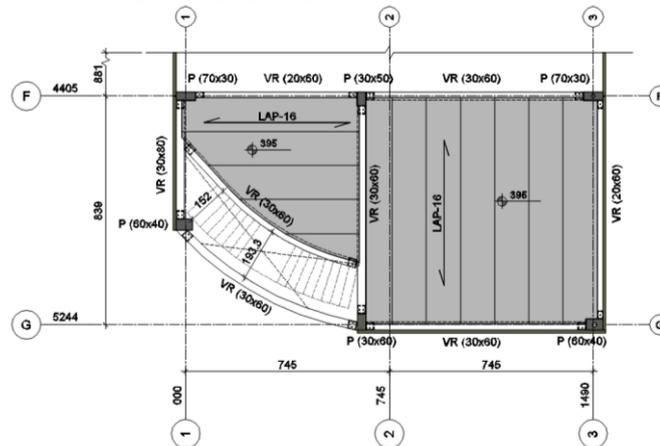
A etapa descrita neste item 5.2.3 apresenta grande variação comparando o sistema de produção de laje alveolar, com o sistema de produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa. Enquanto que o processo de laje alveolar é todo industrializado com a utilização de equipamentos de extrusão ou moldagem, otimizando assim o tempo de produção e garantido uma melhor qualidade na geometria da laje, já o processo de produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa assemelhasse ao processo de produção “convencional”, pois necessita de várias etapas e cuidados que demandam um maior tempo e, mesmo com todo o cuidado demonstrado, para o posicionamento e fixação do EPS, a sua posição final não é garantida.

5.2.4. MARCAÇÃO DAS LAJES, RECORTES E CURA

A aplicação de lajes alveolares é bem diversificada podendo serem utilizadas em várias tipologias de arquitetura. Geralmente, os arquitetos durante a distribuição dos espaços acabam não levando em consideração a modulação da laje, que para os equipamentos mais comuns a sua largura é de 1,20 ou 1,25m. Durante o processo de paginação da laje é mapeado e identificado se será necessário fazer recorte no sentido longitudinal da laje, ou até mesmo recortes com interferências com pilares. Para esses recortes existem limites para não prejudicar a funcionalidade da laje. Usualmente, a laje alveolar que tem a sua largura diferente da largura de produção (1,20 ou 1,25 m) é chamada de “tira”.

Com arquiteturas cada vez mais arrojadas e, muitas vezes, a necessidade de se aproveitar a totalidade do terreno, os arquitetos elaboram projetos cada vez mais irregulares em seu formato, o que dificulta a modulação das lajes alveolares. A Figura 5-41 apresenta um exemplo de paginação de lajes alveolares, onde ocorrem recortes nos pilares, recortes longitudinais e diagonais além do trecho em curva.

Figura 5-41: Exemplo de paginação de pavimento com lajes alveolares



[Fonte: PRETEC – Tecnologia em Préfabricado (2016)]

Em MELO (2007) são apresentadas algumas recomendações que devem ser observadas durante a etapa de paginação do pavimento com lajes alveolares:

- a) Os painéis não podem apresentar folgas entre si;
- b) Prever folga de 1 cm nos recortes junto aos pilares pré-moldados e no mínimo 2 cm nos pilares moldados no local;

- c) Evitar corte longitudinal nas lajes – caso isso ocorra, ajustar a medida para que a faixa de laje apresente cordoalhas simétricas e fazer o corte no alvéolo;
- d) Evitar posicionamento lado a lado de lajes recortadas longitudinalmente;
- e) Evitar recortes para pilares em lajes recortadas longitudinalmente;
- f) Evitar recortes no centro para encaixe de pilares;
- g) Para faixas de lajes de até $1/3$ do valor da largura do painel, utilizar concreto moldado no local;
- h) Para recortes maiores que $2/3$ da largura do painel, avaliar a necessidade de reforço e apoio no pilar.

Em PETRUCCELLI (2009) pode ser visto um exemplo de recorte na laje alveolar para se evitar interferência com o pilar. O recorte para este caso está sendo executado com a laje ainda sobre a pista de protensão (Figura 5-42).

Figura 5-42: Execução de recorte em laje alveolar



[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

Na condição onde é necessária abertura na lateral da laje alveolar, a intervenção é ainda maior, pois é necessário o posicionamento de armaduras de reforço (gaiolas). Para a posição deste reforço é necessário o desmanche de uma boa parte do concreto da laje. A Figura 5-43 apresenta um exemplo.

Figura 5-43: Posicionamento da armadura de reforço em laje alveolar

[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

As lajes alveolares moldadas por fôrma fixa apresentam em uma das suas vantagens, a facilidade de produção sobre medidas, ou seja, pode-se definir a forma já na geometria final da laje, levando em consideração todos os recortes e, se for necessária armadura de reforço, essas podem ser posicionadas antes da concretagem da laje. Desta maneira, o processo apresenta-se mais compacto e o desperdício de material reduz. A Figura 5-44 apresenta configuração da fôrma onde, são utilizados chapas de aço para as definições dos recortes. Para a situação que seja necessário a utilização de tiras, o processo permite que a fabricação já seja feita na largura definida em projeto. Para isso, é necessário apenas o reposicionamento da lateral da fôrma, conforme pode ser visto na Figura 5-45.

Figura 5-44: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa com recorte

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Figura 5-45: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa em tira



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Na Figura 5-46 pode ser visto o posicionamento de armaduras complementares, para uma laje alveolar moldada por fôrma fixa, com geometria em chanfro na sua extremidade.

Figura 5-46: Laje alveolar moldada por fôrma fixa, com posicionamento de armadura antes da concretagem e extremidade em chanfro



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Na produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, é possível, em uma mesma pista, produzir lajes com larguras diferentes, pois as laterais da fôrma podem ser movimentadas para cada unidade produzida. Como é utilizado o sistema de pré-tração, as cordoalhas são ancoradas nas cabeceiras de protensão, que estão posicionadas nas extremidades da pista. As cordoalhas são definidas pela laje mais larga, sendo assim, para as lajes com larguras menores os cabos de protensão excedentes ficam posicionados paralelos as lajes. Essas cordoalhas são destinadas para outros usos, como por exemplo para alças de içamento ou até mesmo chumbadores para consolos. A Figura 5-47 apresenta a disposição das laterais para a produção de lajes alveolares moldadas por fôrma fixa com larguras diferentes em uma mesma pista de protensão.

Figura 5-47: Configuração da fôrma para produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa com larguras diferentes, em uma mesma pista de protensão



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Existem alguns processos de cura para a laje alveolar, dentre os quais destacam-se: a cura a vapor, cura térmica ou cura simples (com lona plástica). Todos os métodos devem ser bem controlados para garantir a qualidade final da laje, evitando o surgimento de fissuras. A cura a vapor e a térmica são as mais indicadas, a fim de acelerar o processo, liberando a pista de protensão para uma nova produção. A Figura 5-48 apresenta a utilização de lona para a cura térmica.

Figura 5-48: Cura com lona térmica



[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

O processo de cura para as lajes em estudo é utilizado apenas a cura simples, deixando a laje exposta, conforme pode ser visto na Figura 5-49. Somente para os dias mais quentes são colocadas lonas plásticas cobrindo toda a extensão de pista, tentando assim, evitar a evaporação precoce da água.

Figura 5-49: Método de cura simples para posterior saque e movimentação da laje

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

5.2.5. LIBERAÇÃO DA PROTENSÃO E CORTE

Após a etapa de cura da laje, os cabos de protensão são cortados, neste momento é que efetivamente a protensão é aplicada. A definição do momento de corte das cordoalhas é dada pelos engenheiros calculistas que especificam em projeto o f_{cj} . Usualmente essa resistência à compressão do concreto é de 35 MPa. Como a resistência do concreto é relativamente alta, é comum a utilização de concreto com aditivos e cimentos adequados, afim de se obter a resistência do concreto especificada em um menor tempo possível.

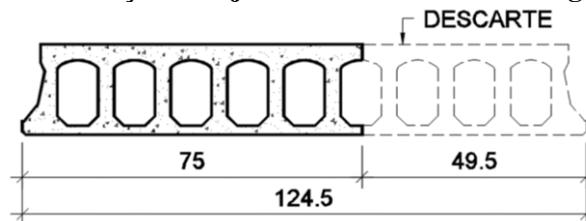
É amplamente utilizado em produção industrial, como elementos pré-fabricados protendidos ou não, onde se exige desforma rápida, o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, e adquira elevadas resistências, com maior velocidade. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. O concreto continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto. O CP V-ARI assim como o CP-I não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático), o que o diferencia deste último é o processo de dosagem e produção do clínquer. O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina.

PETRUCELLI (2009) comenta a dificuldade na confiabilidade dos resultados dos corpos de prova, pois as normas não apresentam um procedimento válido para lajes alveolares, já que nestas é usado o concreto seco e, além disso, é necessário desenvolver um método que se aproxime dos efeitos que a máquina faz no concreto. As próprias empresas desenvolveram métodos para a extração do corpo de prova. Esses procedimentos simulam a vibração e a compactação no concreto com o uso de mesas vibratórias, fôrmas de corpos-de-provas acoplados na máquina produtora e o próprio uso de vibradores. Podem ser extraídos também testemunhos na região das nervuras, mas estes, por serem muito pequenos, apresentam muitas disparidades nos resultados e até mesmo valores que não condizem com a realidade.

Imagina-se que no caso de lajes alveolares moldada por fôrma fixa, os resultados sejam similares aos concretos usuais na construção civil, dada a compactação similar. Mas este é um dos pontos a ser levantado pela pesquisa. É possível moldar os corpos-de-prova da maneira usual para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa. Durante toda a etapa de produção da laje são moldados vários testemunhos, para avaliar as resistências do concreto para todas as pistas. Antes da liberação da protensão (cortes dos cabos), o laboratorista ensaia os corpos-de-prova, para verificar se a resistência a compressão especificada em projeto foi atingida.

Para as lajes alveolares qualquer recorte exigido é executado depois da sua fabricação, o que pode gerar desperdícios e, conseqüentemente, impactos ambientais. Para o caso onde é utilizada uma tira (laje com recorte longitudinal), a parte não utilizada geralmente é descartada. A Figura 5-50 apresenta um exemplo indicando o detalhe do recorte longitudinal e a parte que será descartada.

Figura 5-50: Seção de laje alveolar com recorte longitudinal



[Fonte: próprio autor]

As lajes são recortadas com equipamentos apropriados conforme pode ser visto em PETRUCELLI (2009). Essas máquinas podem realizar cortes no sentido transversal quanto no sentido longitudinal. Os cortes transversais são rápidos, a menos das lajes com altos valores de protensão, pois estas apresentam valores maiores de contraflechas e podem travar o disco

durante o corte. Nesse caso, é possível diminuir esse efeito colocando-se pesos no painel para minimizar a contraflecha. Já os cortes longitudinais são mais demorados, mesmo sendo realizados na região dos alvéolos. A Figura 5-51 mostra um equipamento de corte com disco para cortes transversais e longitudinais.

Figura 5-51: a) Corte no sentido transversal. b) Corte no sentido longitudinal



[Fonte: PETRUCELLI (2009)]

Como apresentado no item 5.2.4 as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa dispensam a etapa de recortes, uma vez que a sua produção já é dada na largura final definida em projeto, conforme pode ser visto Figura 5-52. Mas, ainda, é necessário o corte das cordoalhas.

Figura 5-52: Laje alveolar moldada por fôrma fixa já produzida com o recorte



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

5.2.6. IÇAMENTO E ESTOCAGEM

As peças que compõem as estruturas pré-moldadas apresentam como características as fases transitórias que incluem a fase de estocagem e transporte. Para as lajes alveolares são

necessários dispositivos de içamento comumente chamados de balancim, pois o processo produtivo não permite o posicionamento de alças de içamento. Esses balancins são acoplados em pontes rolante. A Figura 5-53 apresenta um modelo de balancim.

Figura 5-53: Posicionamento do balancim para a movimentação da laje alveolar



[Fonte: Leonardi Construções Industrializadas (2014)]

A produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa permite o posicionamento de alças de içamento embutidas na laje. O aço utilizado para a confecção das alças são geralmente sobras de cordoalhas, conforme pode ser visto na Figura 5-54.

Figura 5-54: Cordoalhas dobradas para serem utilizadas como alças de içamento



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

As alças de içamento são fixadas provisoriamente com auxílio de arame nas cordoalhas, conforme pode ser visto na Figura 5-55. O funcionamento das cordoalhas é dado pelo atrito entre o concreto e a alça, após o lançamento e endurecimento do concreto. Essas alças são cortadas com lixadeira após a montagem final e o aço é descartado. Para cada laje são posicionadas quatro alças de içamento, sendo duas em cada extremidade.

Figura 5-55: Posicionamento das alças de içamento

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Na Figura 5-56 pode ser visto a posição final da alça de içamento, cuja a parte exposta permite o posicionamento de dispositivos para o içamento da peça. A maneira que alças são posicionadas na laje apresentam boa estabilidade para a sua movimentação.

Figura 5-56: Parta exposta da alça de içamento

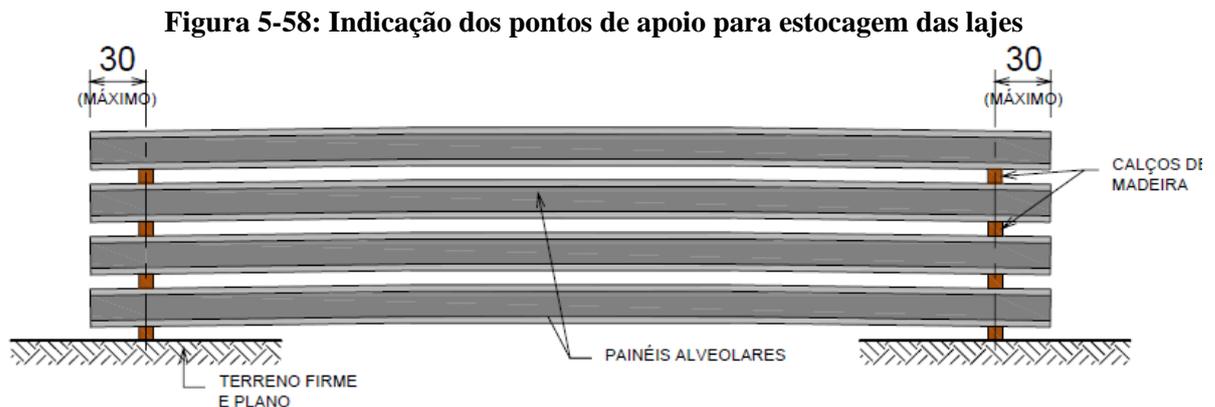
[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Para o transporte e a movimentação em fábricas geralmente são utilizados pórticos, conforme pode ser visto na Figura 5-57.

Figura 5-57: Movimentação de laje alveolar moldada por fôrma fixa, pelas alças de içamento

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

As recomendações para a etapa de estocagem são semelhantes para a laje alveolar e a laje alveolar moldada por fôrma fixa. Por se tratar de peças pré-moldadas protendidas, a recomendação é que os pontos de apoio sejam o mais próximo possível da extremidade, pois esses pontos simulam a condição de apoio final da laje. É desejável que este ponto de apoio não exceda 30 cm da extremidade da peça conforme pode ser visto na Figura 5-58.



[Fonte: Tatu – Prémoldados]

Cabe destacar a importância dos calços de forma alinhada, evitando assim ações não previstas que possam causar danos ou até a ruptura da laje. A Figura 5-59 apresenta um exemplo de mau posicionamento dos calços, onde as lajes superiores aplicam uma carga pontual na extremidade do balanço, esse momento fletor negativo não previsto em projeto ocasionou a ruptura da laje.

Figura 5-59: Ruptura da laje devido ao mau posicionamento dos apoios



[Fonte: PETRUCCELLI (2009)]

A Figura 5-60 apresenta a estocagem de forma adequada para lajes alveolares moldada por fôrma fixa.

Figura 5-60: Estocagem de laje alveolar moldada por fôrma fixa



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2016)]

Conforme visto neste capítulo, são apresentadas diversas vantagens no processo de produção de laje alveolar moldada por fôrma fixa, comparando o processo de produção de laje alveolar, dentre as quais se destacam a versatilidade, produção sobre medida, menor impacto ambiental com a redução de desperdício, possibilidade de posicionamento de armaduras de reforço para aberturas, e também armaduras para aumentar a capacidade ao cisalhamento (estribos), ou até mesmo armaduras longitudinais para compor as armaduras protendidas, possibilidade de interrupção do ESP deixando a laje maciça nas regiões de interesse. Outro ponto importante é apresentado em MACIEL¹ (2017) que é possível definir a geometria dos alvéolos aumentando a capacidade resistente da laje e isso é perfeitamente possível alterando a modelagem do EPS, esse mesmo princípio é difícil para as lajes alveolares, pois os equipamentos não permitem a flexibilidade da seção transversal.

A viabilização de unidades produtoras de lajes alveolares moldada por fôrma fixa é vista com bons olhos aos investidores, pois neste sistema não se tem os custos iniciais dos equipamentos de moldagem ou extrusão que atualmente requer grandes recursos financeiros.

O fato das extremidades das lajes alveolares moldada por fôrma fixa serem fechadas, influencia de forma direta o comportamento da laje quanto as características relacionadas à fluência e a retração, pois a superfície em contato com o ar é menor se comparado com as lajes alveolares.

Os pontos que apresentam desvantagem estão relacionados principalmente com o maior tempo de produção. Esse tempo maior deve-se a etapa da passagem das cordoalhas por todas as fôrmas das extremidades que definem o comprimento das lajes e também para o posicionamento e a fixação do EPS para que ele não se movimente durante a concretagem.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A parte experimental desta pesquisa compõe a linha de estudos em lajes alveolares protendidas do NETPre-UFSCar (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto situado na Universidade Federal de São Carlos). Todos os experimentos foram realizados neste laboratório. Neste capítulo descrevem-se a metodologia de ensaio, a instrumentação utilizada, as características dos modelos ensaiados e os esquemas dos experimentos.

6.1. METODOLOGIA DE ENSAIO

O programa experimental contou com a realização de 15 experimentos, sendo 12 ensaios à força cortante e 3 ensaios à flexão. Ao todo foram utilizadas 6 lajes para a realização dos ensaios.

Todas as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa são de uma mesma pista de protensão e possuem as mesmas características como resistência do concreto, tipo e quantidade de cordoalhas, nível de protensão e dimensões. Todas possuem nominalmente 15 cm de altura e comprimento de 570 cm.

As denominações das lajes foram dadas de acordo com as suas características. As três primeiras lajes L01, L02 e L03 foram produzidas em uma extremidade com estribos, e a outra extremidade sem estribos. Essas lajes foram denominadas de L01CE, L01SE, L02CE, L02SE, L03CE e L03SE, sendo CE referência a extremidade com estribos e SE a extremidade sem estribos.

As próximas três lajes L04, L05 e L06 foram produzidas sem estribos em ambas as extremidades. Essas lajes foram denominadas de L04A, L04B, L05A, L05B, L06A e L06B, sendo A referência a uma extremidade da laje e B referência a outra extremidade.

A preparação dos experimentos consistiu primeiramente na medição das características geométricas das lajes, tais como, altura (h), largura das almas (nervuras) (b_w), distância do centro das cordoalhas até a borda inferior das lajes (d'), comprimento das lajes, largura total e dimensões dos alvéolos (EPS). Não houve nenhuma característica das lajes que levou ao seu descarte, como por exemplo, escorregamento significativo das cordoalhas ou

fissuras nas nervuras. Para aferição foi utilizado um paquímetro digital, semelhante ao que está apresentado na Figura 6-1.

Figura 6-1: Paquímetro digital



[Fonte: site www.mercadolivre.com.br]

Foram feitas marcações nas lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, para possibilitar o seu posicionamento em relação aos apoios e ao atuador. Para isso foram utilizados esquadro, trena e pincel atômico. Para o apoio das lajes, foram utilizadas vigas metálicas enrijecidas. Sobre as vigas metálicas enrijecidas, colocou-se uma viga de madeira com a parte superior chanfrada, e sobre ela, uma tira de elastômero, como mostra a Figura 6-2.

Figura 6-2: Apoio para os ensaios das lajes alveolares moldadas por fôrma fixa



[Fonte: adaptado de MARQUESI (2014)]

Após o posicionamento dos apoios de acordo com o esquema estrutural de cada ensaio, colocaram-se as vigas de transmissão de carga sobre a laje. Para regularização da superfície das lajes, utilizou-se areia úmida na área de contato com as vigas, conforme pode ser visto na Figura 6-3.

Figura 6-3: Regularização da superfície das lajes na região de contato com a viga de transmissão



[Fonte: próprio autor]

Entre a viga de transmissão e a célula de carga, foram colocadas rótula para evitar possíveis excentricidades e chapas metálicas para ajustes de altura quando necessário, conforme apresentado na Figura 6-4.

Figura 6-4: Rótula entre a viga de transmissão e a célula de carga



[Fonte: próprio autor]

Após a preparação do ensaio, aplicou-se uma força inicial de aproximadamente 2,0 kN para acomodação da viga de transmissão de força. Após esse carregamento inicial, a célula é descarregada e finalmente aplica-se uma força de aproximadamente 50 kN/min durante o ensaio.

6.2. INSTRUMENTAÇÃO

Para alimentar a célula de carga foi utilizada uma bomba manual. Para o ensaio de força cortante foram posicionados dois transdutores (Figura 6-5) (LVDT – Linear Variable Differential Transducers). Os transdutores foram posicionados imediatamente ao lado da linha de atuação da carga, para aferição dos deslocamentos ao longo do ensaio. Sobre a laje são posicionadas chapas metálicas para não haver interferência da sua rugosidade na medição dos deslocamentos, ver Figura 6-6.

Figura 6-5: Transdutor (LVDT) para medição dos deslocamentos



[Fonte: NETPre-UFSCar]

Figura 6-6: Posição das chapas metálicas



[Fonte: próprio autor]

Para o ensaio à flexão, além dos dois transdutores posicionados imediatamente ao lado da linha de atuação da carga, foram dispostos mais um transdutor sobre os apoios de cada extremidade (Figura 6-7), permitindo assim aferir o real deslocamento durante a realização dos ensaios.

Figura 6-7: Posição dos transdutores sobre cada extremidade

[Fonte: próprio autor]

Para a aquisição dos dados foi utilizado o System 5000, sendo conectados os cabos de todos os instrumentos utilizados nos ensaios, permitindo a transferência das leituras feitas para o computador (Figura 6-8).

Figura 6-8: Sistema de aquisição de dados

[Fonte: adaptado de MARQUESI (2014)]

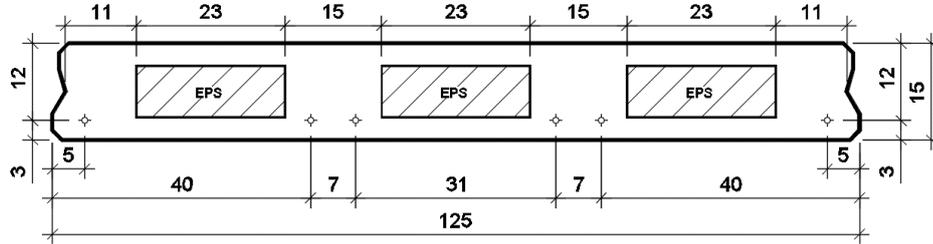
6.3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

As lajes apresentadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Tulipa Pré-fabricados.

Para a análise teórica são consideradas as características geométricas finais da laje, ou seja, as características medidas em laboratório. Na Figura 6-9 é apresentada a geometria do

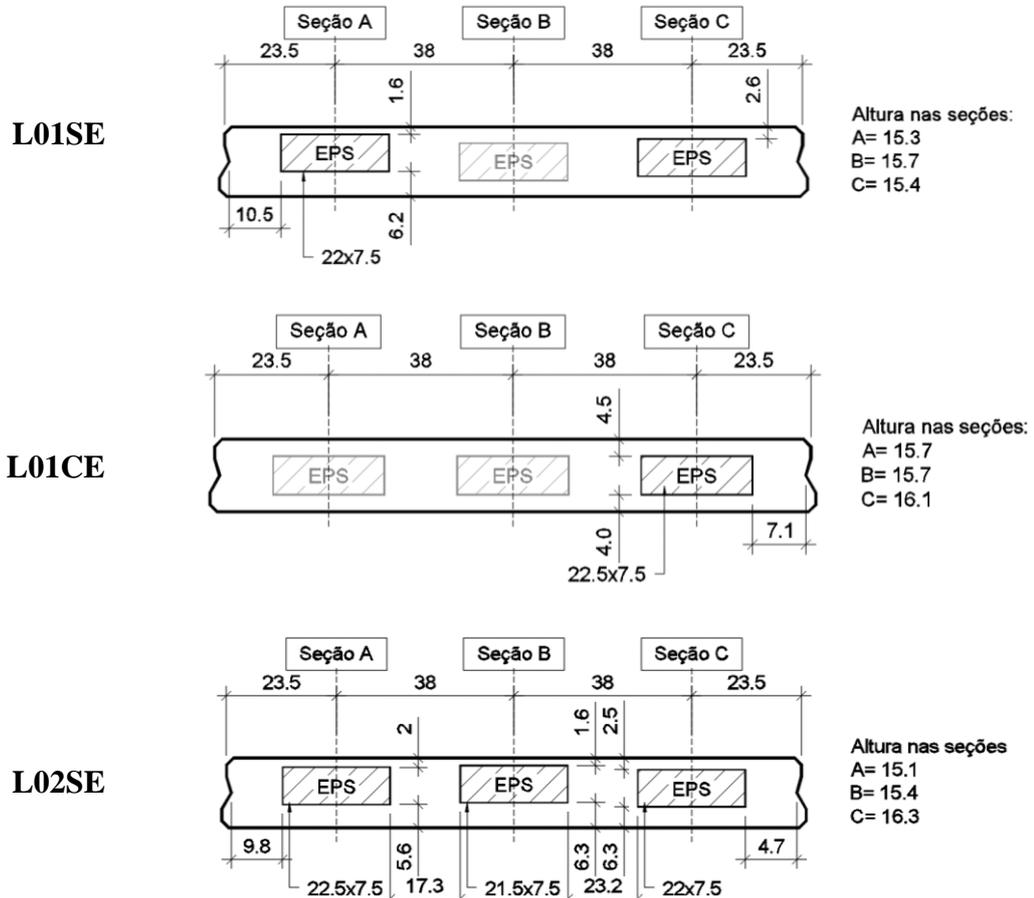
projeto da laje alveolar moldada por fôrma fixa e na Figura 6-10 são apresentadas todas as geometrias possíveis de serem colhidas em laboratório, para cada extremidades das lajes.

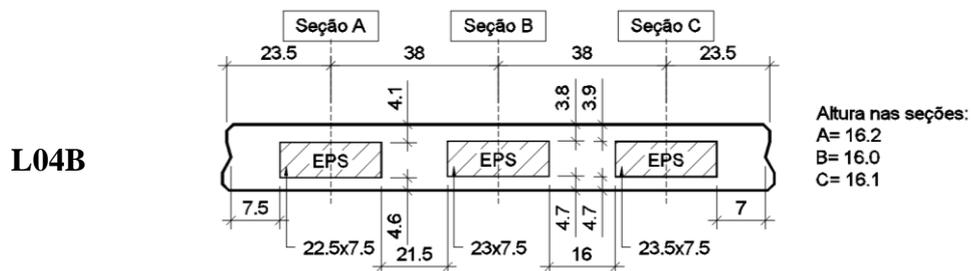
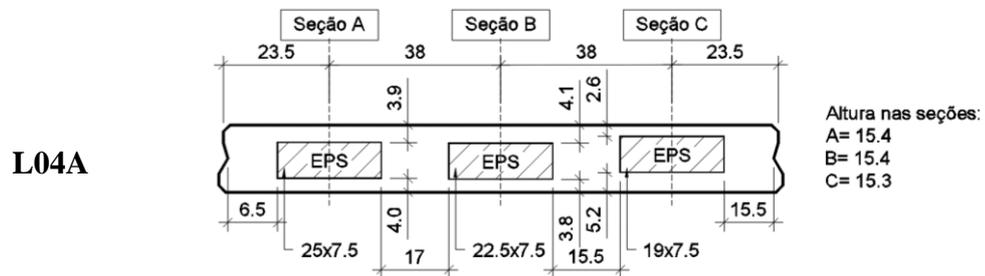
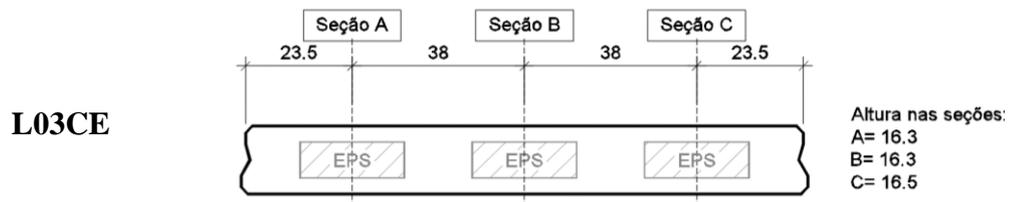
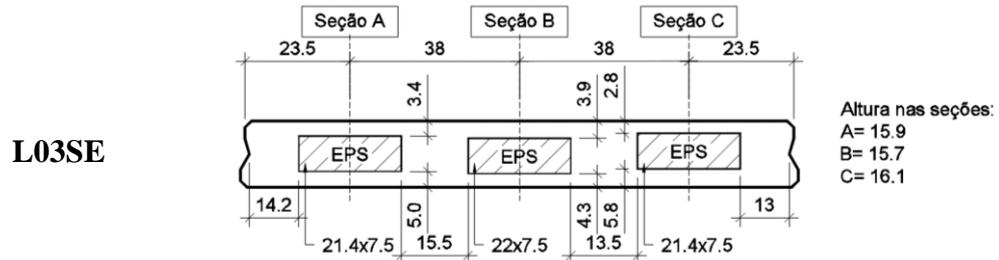
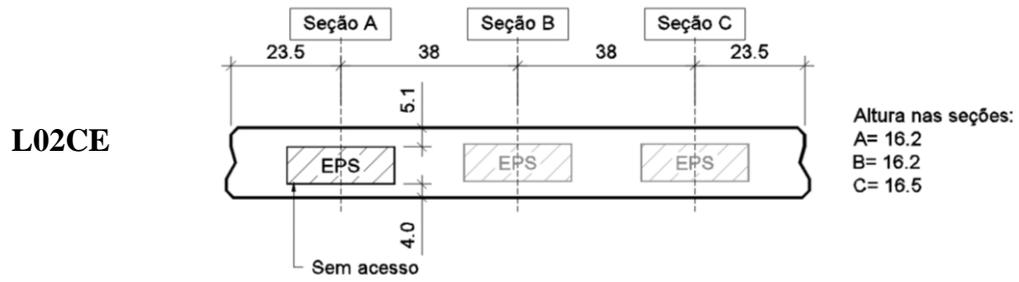
Figura 6-9: Seção transversal de projeto

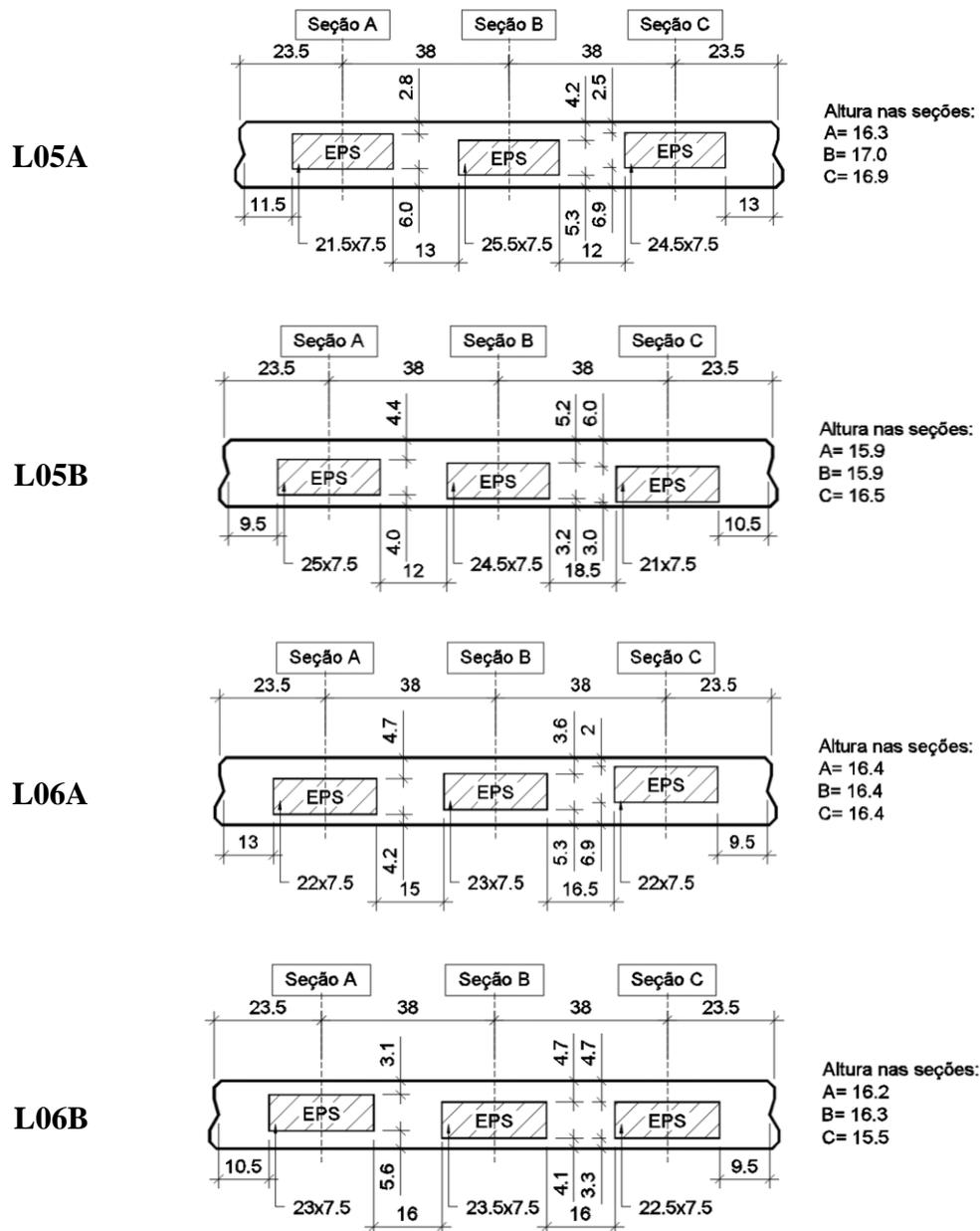


[Fonte: próprio autor]

Figura 6-10: Seção transversal experimental







[Fonte: próprio autor]

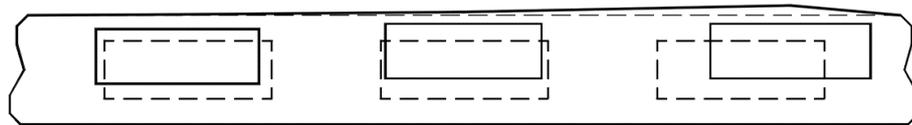
Na Figura 6-9 notam-se diferenças significativas na geometria em relação a seção de projeto, a citar, EPS deslocados e com dimensões menores e, portanto, engrossamento na espessura da alma. Distâncias como altura e larguras mínimas das nervuras e a distância do centro das cordoalhas até a borda inferior foram aferidas, assim como as dimensões dos alvéolos (ESP). Essas variabilidades são apresentadas e analisadas no Capítulo 7. Os valores médios destas grandezas para cada laje são utilizados nos cálculos do capítulo seguinte.

A Figura 6-11 apresenta a seção constituída da laje L02SE sobreposta a seção de projeto (tracejada). A diferença mais significativa está no posicionamento do EPS, o

deslocamento observado foi tanto para a parte inferior quanto para a parte superior. Na Figura 6-12 é possível ver a seção L02SE.

A área e o momento de inércia de projeto são de 1293 cm^2 e 31686 cm^4 , respectivamente, enquanto que as da seção construída são de 1408 cm^2 e 32905 cm^4 . Um aumento de 9% para a área e 4% para o momento de inércia. O centro de gravidade da seção medido a partir da borda inferior possui um valor nominal de 7,46 cm enquanto que na seção construída, 6,98 cm. O fato do EPS ter subido durante o processo de fabricação, impactou na descida do centro de gravidade da seção transversal, pois na parte inferior houve um aumento de massa de concreto. Essa diminuição tem influência direta no dimensionamento da laje, pois está relacionada com a excentricidade de protensão.

Figura 6-11: Seção transversal construída considerando os valores médios das grandezas medidas.



[Fonte: próprio autor]

Figura 6-12: Seção transversal da laje L02SE



[Fonte: próprio autor]

Na Tabela 6-1 são apresentadas as características geométricas de cada seção transversal aferida em laboratório.

	h (cm)	d' (cm)	Σb_w (cm)	e_p (cm)	A (cm²)	I (cm⁴)
Projeto	15,00	3,00	52,0	4,46	1293	31686
L01CE	15,83	2,83	48,0	5,12	1413	37017
L01SE	15,47	2,50	52,0	4,83	1383	33807
L02CE	16,30	3,42	52,0	4,78	1454	39766
L02SE	15,60	2,92	55,0	4,06	1409	32905
L03CE	16,37	3,00	52,0	5,30	1461	40084
L03SE	15,90	3,33	56,0	4,17	1444	36701
L04A	15,37	2,75	55,0	4,73	1383	34101
L04B	16,10	2,75	52,0	5,00	1438	38802
L05A	16,73	3,00	50,0	4,59	1479	40865
L05B	16,10	3,00	51,0	5,19	1424	38194
L06A	16,40	2,92	54,0	4,72	1480	39171
L06B	16,00	3,08	53,0	4,74	1430	37943

h – altura da laje; d' – distância da borda inferior até o centro de gravidade da cordoalha; Σb_w – somatório das almas; A – área da seção transversal; I – momento de inércia da seção transversal.

[Fonte: próprio autor]

A partir das informações apresentadas Tabela 6-1, calculam-se as perdas de protensão da data de fabricação (t_1) até o dia da realização dos ensaios (t_{69}). Nos apêndices B e C, são apresentadas as etapas de cálculo para os coeficientes de fluência, retração e as perdas de protensão inicial e diferidas, para a seção de projeto. Na Tabela 6-2 apresenta o resumo dos resultados obtidos pela sequência de cálculo apresentado nos apêndices B e C.

	$\phi(t,t_0)$	$\epsilon(t,t_0)$	$\sigma_{p,1}$ (%)	$\sigma_{p,69}$ (%)
Projeto	3,533	$-4,38 \times 10^{-4}$	5,70	18,49
L01CE	3,473	$-4,15 \times 10^{-4}$	5,65	17,33
L01SE	3,485	$-4,19 \times 10^{-4}$	5,64	17,34
L02CE	3,457	$-4,09 \times 10^{-4}$	5,47	16,52
L02SE	3,468	$-4,13 \times 10^{-4}$	5,38	16,22
L03CE	3,454	$-4,07 \times 10^{-4}$	5,61	17,04
L03SE	3,449	$-4,05 \times 10^{-4}$	5,35	15,96
L04	3,473	$-4,15 \times 10^{-4}$	5,58	17,05
L04A	3,481	$-4,18 \times 10^{-4}$	5,60	17,18
L04B	3,464	$-4,11 \times 10^{-4}$	5,56	16,91
L05	3,464	$-4,11 \times 10^{-4}$	5,52	16,73
L05A	3,453	$-4,07 \times 10^{-4}$	5,38	16,14
L05B	3,474	$-4,15 \times 10^{-4}$	5,65	17,31
L06	3,454	$-4,08 \times 10^{-4}$	5,47	16,47
L06A	3,440	$-4,02 \times 10^{-4}$	5,42	16,22
L06B	3,467	$-4,13 \times 10^{-4}$	5,51	16,72

ϕ – coeficiente de fluência; ϵ – coeficiente de retração; $\sigma_{p,1}$ – perda inicial; $\sigma_{p,69}$ – perda final (até o dia da realização do ensaio)

[Fonte: próprio autor]

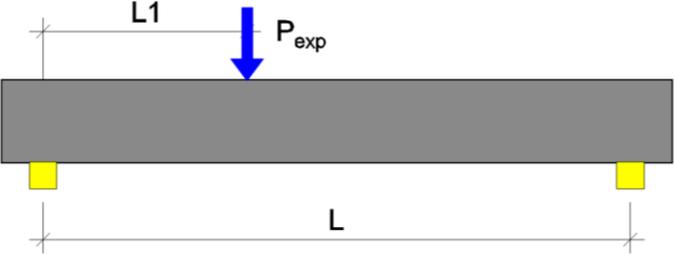
Os dados relativos a protensão são: categoria do aço CP190RB, módulo de elasticidade do aço $E_p = 200 \text{ kN/mm}^2$, cordoalha 3x4,5mm com área de 0,462 cm² e diâmetro nominal de 0,96 cm, $A_p = 2,772 \text{ cm}^2$ - área total da armadura de protensão (seis cordoalhas), $\sigma_{pi} = 1551,3 \text{ MPa}$ – tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas (cálculo apresentado no Anexo A).

Outras informações complementares são: temperatura média de 20°C, t = 69 dias – idade do concreto quando executado o ensaio, $U_r = 70\%$ – umidade relativa do ambiente, cimento CP V-ARI, abatimento do concreto 15 cm e agregado – basalto $\alpha_E = 1,2$.

6.4. ESQUEMAS DOS ENSAIOS

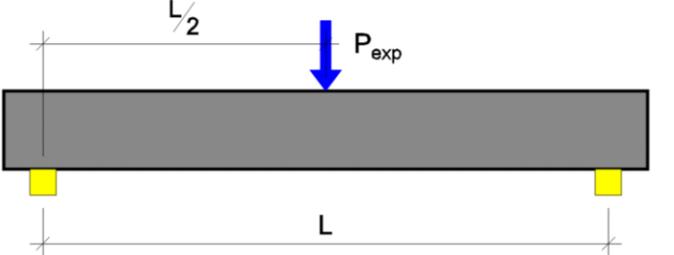
A seguir são apresentadas as informações dos esquemas dos ensaios. Todas as lajes foram ensaiadas a força cortante nas duas extremidades, totalizando 12 ensaios, sendo que em 3 existe armadura transversal. As lajes L04, L05 e L06 foram ensaiadas à flexão. Na Tabela 6-3 e na Tabela 6-4 possuem os valores de L1, L/2 e L para cada laje ensaiada.

Tabela 6-3: Características do esquema dos ensaios de força cortante			
		L1 (cm)	L (cm)
1	L01CE	60	546,50
2	L01SE	60	540,50
3	L02CE	37,5 (2,5h)	517,50
4	L02SE	37,5 (2,5h)	517,00
5	L03CE	37,5 (2,5h)	559,50
6	L03SE	37,5 (2,5h)	547,50
7	L04A	37,5 (2,5h)	550,00
8	L04B	37,5 (2,5h)	549,00
9	L05A	30,0 (2,0h)	539,25
10	L05B	30,0 (2,0h)	539,75
11	L06A	37,5 (2,5h)	556,00
12	L06B	37,5 (2,5h)	549,50



[Fonte: próprio autor]

Tabela 6-4: Características do esquema dos ensaios de flexão.			
		L/2 (cm)	L (cm)
13	L04	280,00	560,00
14	L05	277,38	554,75
15	L06	279,75	559,50



[Fonte: próprio autor]

7. ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Para análise a experimental onde a configuração de ensaio pode ser representada pela Figura 7-1, onde a ordem de grandeza da carga P_{exp} do atuador é muito superior à carga distribuída de peso próprio, aqui representada pela notação g_1 , o momento e a cortante atuante do comprimento da peça até a posição $x=L1$, denominados M_{exp} e V_{exp} , respectivamente, podem ser expressos por:

$$M_{exp} = P_{exp} \cdot x \cdot \frac{(L - L1)}{L} + g_1 \cdot \frac{(L \cdot x - x^2)}{2} \quad (7-1)$$

$$V_{exp} = P_{exp} \cdot \frac{(L - L1)}{L} + g_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) \quad (7-2)$$

Sendo:

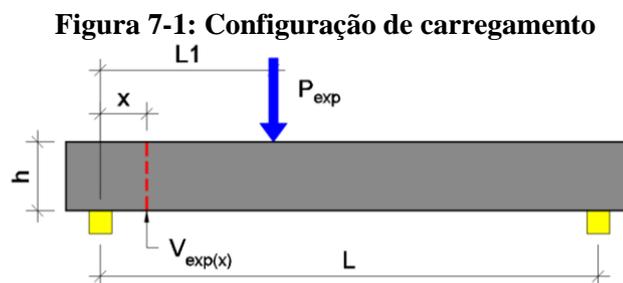
P_{exp} : força concentrada aplicada no atuador;

L : distância entre centro de apoios;

$L1$: distância entre a carga P_{exp} e centro de apoio mais próximo;

x : posição da seção em análise;

g_1 : peso próprio do elemento por unidade de comprimento.



[Fonte: próprio autor]

Sabendo que o momento de fissuração M_r é atingido em $x=L1$, fazendo $M_{exp} = M_r$ e considerando que a cortante máxima ocorre à distância de $h/2$ do apoio (segundo

recomendações da ABNT NBR 14861:2011), o carregamento P_{exp} recebe a notação P_r e passa a ser chamada: carga crítica de fissuração; e matematicamente pode ser definido por:

$$P_r = \frac{\left[M_r - g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2} \right] \cdot L}{L1 \cdot (L - L1)} \quad (7.3)$$

7.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Para uma maior confiabilidade dos resultados, determinou-se a partir dos ensaios de flexão, a resistência a tração do concreto, o módulo de elasticidade e a resistência a compressão do concreto. Os valores experimentais quanto as características do concreto são utilizadas para as verificações analíticas.

7.1.1. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para as lajes ensaiadas à flexão foram determinados os valores de módulo de elasticidade do concreto (E_c) a partir das flechas obtidas durante a realização dos ensaios.

Tais valores de módulo, proveniente de flechas, foram comparados com os módulos determinados a partir das resistências à compressão obtidas com os ensaios de corpos de prova, que foram fornecidos pelo fabricante.

Tal procedimento foi empregado com intuito de garantir maior confiabilidade quanto aos valores experimentais de resistência do concreto, empregados nesta pesquisa. A determinação do módulo de elasticidade a partir de valores de flecha obtidos por meio de ensaios experimentais pode ser realizada conforme expressões apresentadas no item 4.2.2 deste trabalho.

O valor do módulo de elasticidade secante do concreto, quando não se tem o valor experimental, pode ser calculado por meio da expressão normativa:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_i \quad (7.4)$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (7.5)$$

E o valor do módulo de elasticidade inicial do concreto pode ser obtido a partir das seguintes expressões:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;} \quad (7.6)$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa;} \quad (7.7)$$

Sendo:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Onde:

E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa).

Como demonstrado no Capítulo 5 deste trabalho, devido à dificuldade da fixação do EPS durante a etapa de concretagem, o mesmo pode movimentar, fazendo com que a seção transversal de projeto seja diferente do que foi executado. Nas extremidades quando o ESP está exposto, é possível medir a real seção, porém, no meio do vão essa aferição não é possível. Destaca-se aqui que a seção transversal pode ser variável em todo o comprimento da laje.

Para a determinação do módulo de elasticidade, são consideradas três seções transversais, sendo, a primeira a média das propriedades das extremidades A e B, a segunda, considerando as propriedades da extremidade A e a terceira, considerando as propriedades da extremidade B. Os valores de módulo de elasticidade determinados estão indicados na Tabela 7-1.

Tabela 7-1: Determinação dos módulos de elasticidade do concreto							
	F_{epx} (kN)	L (mm)	I_{hom} (mm⁴)	a_{exp} (mm)	f_{cj} (MPa)	E_{c,exp} (kN/mm²)	E_{ci} (kN/mm²)
L04	24,30	5600	3,6726·10 ⁸	5,54	40	43,70	42,50
L04A	24,30	5600	3,4360·10 ⁸	5,54	40	46,70	42,50
L04B	24,30	5600	3,9092·10 ⁸	5,54	40	41,05	42,50
Média						43,82	
L05	13,80	5547,5	3,9807·10 ⁸	2,98	40	41,38	42,50
L05A	13,80	5547,5	4,1109·10 ⁸	2,98	40	40,07	42,50
L05B	13,80	5547,5	3,8508·10 ⁸	2,98	40	42,77	42,50
Média						41,40	
L06	23,50	5595	3,8817·10 ⁸	5,15	40	42,89	42,50
L06A	23,50	5595	3,9431·10 ⁸	5,15	40	42,23	42,50
L06B	23,50	5595	3,8204·10 ⁸	5,15	40	43,58	42,50
Média						42,90	
[Fonte: próprio autor]							

Comparando os valores dos módulos de elasticidade, é possível observar a proximidade dos valores obtidos, garantindo a confiabilidade dos valores experimentais empregados nesta pesquisa, que por sua vez foram fornecidos pelos respectivos fabricantes das unidades alveolares. Os laudos dos corpos-de-prova podem ser vistos no Anexo A.

7.1.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À TRAÇÃO

Para garantir maior confiabilidade quanto aos valores de resistência do concreto à tração, foram determinados valores de resistência do concreto à tração a partir de valores de momento de fissuração determinados por meio dos ensaios. A partir da equação apresentada em 4.2.1, que determina o momento de fissuração, determina-se o valor da resistência média do concreto à tração.

Semelhantemente ao que foi feito para a análise do módulo de elasticidade quanto a seção transversal, aplica-se aqui o mesmo critério. Utiliza-se como propriedade da laje a média das seções transversais das duas extremidades. Posteriormente, é feita a análise considerando as propriedades da extremidade A e, em seguida, as propriedades da extremidade B.

Os valores para o cálculo da resistência média do concreto à tração, determinados a partir dos valores do momento de fissuração obtidos com os ensaios, e os respectivos valores dessa resistência podem ser observados na Tabela 7-2.

Tabela 7-2: Determinação da resistência média do concreto à tração, a partir do momento de fissuração experimental							
	$M_{r,exp}$ (kN.m)	N_p (kN)	A_{hom} (m ⁴)	y_{hom} (m)	I_{hom} (m ⁴)	e_p (m)	f_{ctm} (MPa)
L04	46,70	356,63	0,142222	0,07573	$3,6726 \cdot 10^{-4}$	0,04823	-2,384
L04A	46,42	356,07	0,139434	0,07435	$3,4360 \cdot 10^{-4}$	0,04685	-2,587
L04B	46,97	357,23	0,145010	0,07711	$3,9092 \cdot 10^{-4}$	0,04961	-2,204
Média							-2,392
L05	33,21	358,01	0,146305	0,07849	$3,9807 \cdot 10^{-4}$	0,04849	-0,452
L05A	33,47	360,55	0,149050	0,07550	$4,1109 \cdot 10^{-4}$	0,04550	-0,477
L05B	32,95	355,52	0,143559	0,08148	$3,8508 \cdot 10^{-4}$	0,05148	-0,415
Média							-0,448
L06	47,22	359,13	0,146656	0,07695	$3,8817 \cdot 10^{-4}$	0,04695	-2,380
L06A	47,46	360,20	0,149177	0,07606	$3,9431 \cdot 10^{-4}$	0,04686	-2,323
L06B	46,97	358,05	0,144135	0,07784	$3,8204 \cdot 10^{-4}$	0,04704	-2,436
Média							-2,380

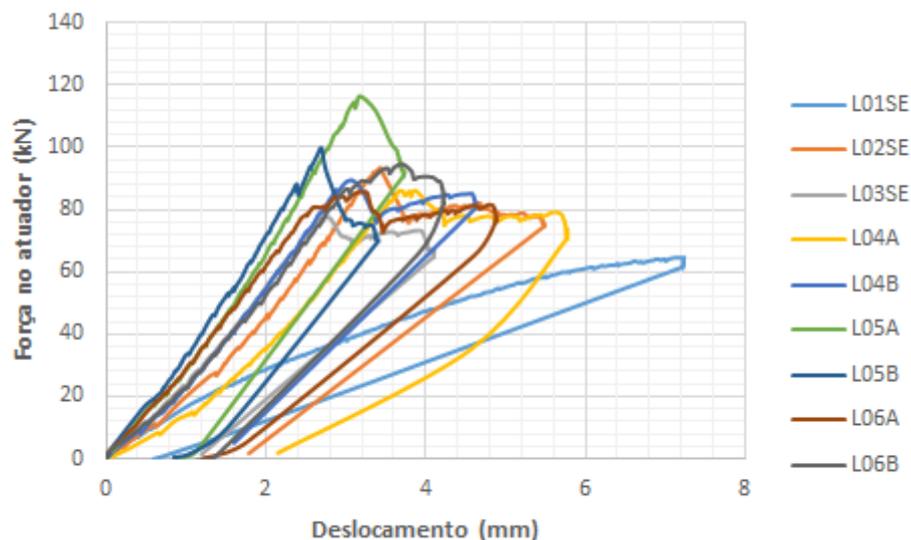
[Fonte: próprio autor]

Observa-se uma proximidade nos resultados obtidos nas lajes L04 e L06, porém, para a laje L05 o valor está discrepante e muito menor do que se esperava. No próximo tópico é determinada a resistência à compressão do concreto. A partir da resistência à tração são abordadas as possíveis causas do valor discrepante identificado na laje L05.

7.1.3. ENSAIO A FORÇA CORTANTE SEM ESTRIBOS

Primeiramente na Figura 7-2, apresentam-se as curvas de força no atuador pelo deslocamento medido já considerando o peso próprio da laje e dos aparatos de ensaio.

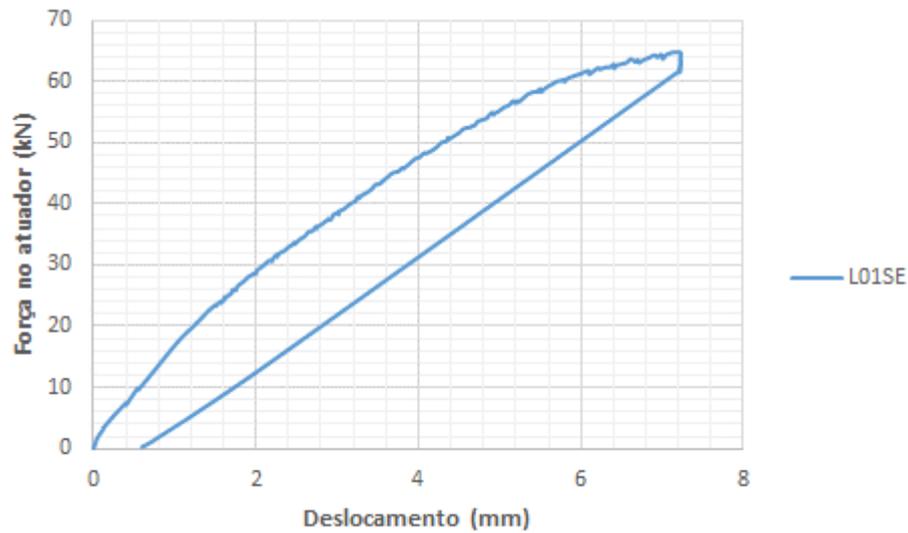
Figura 7-2: Força no atuador versus deslocamento



[Fonte: próprio autor]

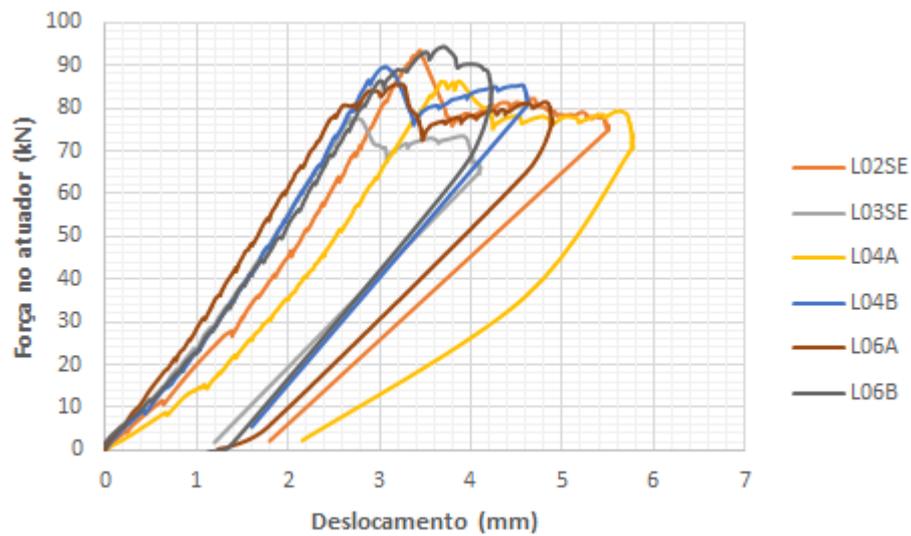
Para melhor clareza dos resultados separam-se as curvas de força no atuador versus deslocamento, de acordo com a distância da extremidade até a ponto de aplicação da força. Essas curvas podem ser vistas nas Figura 7-3, Figura 7-4 e Figura 7-5.

Figura 7-3: Força no atuador versus deslocamento – L1 = 60cm



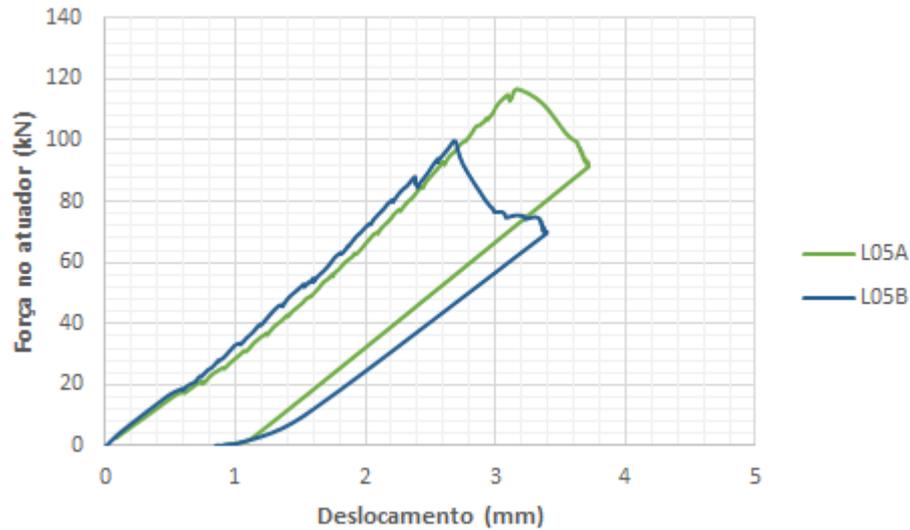
[Fonte: próprio autor]

Figura 7-4: Força cortante versus deslocamento – L1 = 37,5cm (2,5h)



[Fonte: próprio autor]

Figura 7-5: Força no atuador versus deslocamento – L1 = 30,0cm (2,0h)



[Fonte: próprio autor]

Os valores correspondentes à força no atuador última obtidos nos ensaios considerando o peso próprio estão indicados na Tabela 7-3.

Tabela 7-3: Resultados para as lajes sem estribos ensaiadas a força cortante	
	P_{exp} (kN)
L01SE	64,59
L02SE	93,42
L03SE	78,23
L04A	86,24
L04B	89,71
L05A	116,63
L05B	99,52
L06A	85,77
L06B	94,26

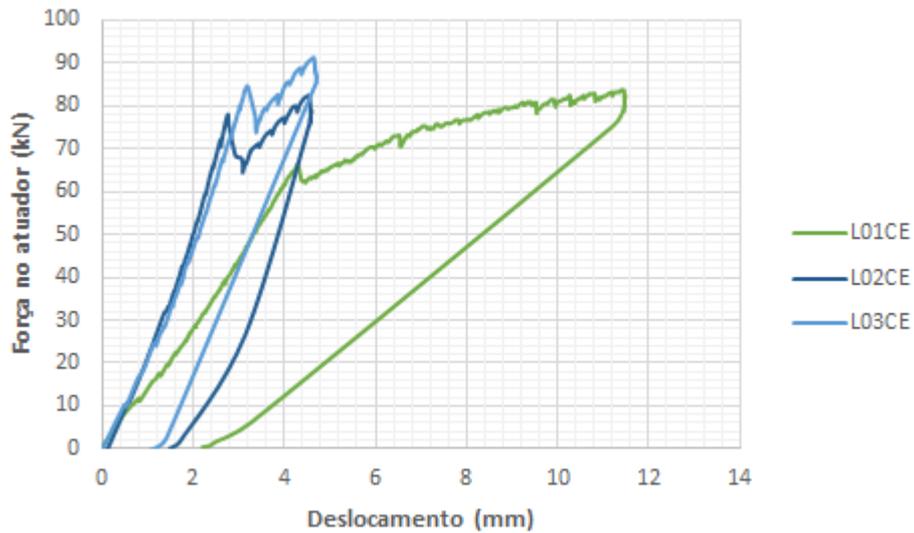
[Fonte: próprio autor]

P_{exp} : força última no atuador aplicada no ensaio.

7.1.4. ENSAIO A FORÇA CORTANTE COM ESTRIBOS

Na Figura 7-2, apresentam-se as curvas de força no atuador pelo deslocamento medido já considerando o peso próprio da laje e dos aparatos de ensaio. Para a laje L01CE, a distância do apoio até o ponto de aplicação são de 60cm, já para as lajes L02CE e L03CE a distância do apoio até o ponto de aplicação são de 37,50cm (2,5h).

Figura 7-6: Força no atuador versus deslocamento



[Fonte: próprio autor]

Os valores correspondentes à força no atuador última obtidos nos ensaios considerando o peso próprio estão indicados na Tabela 7-4.

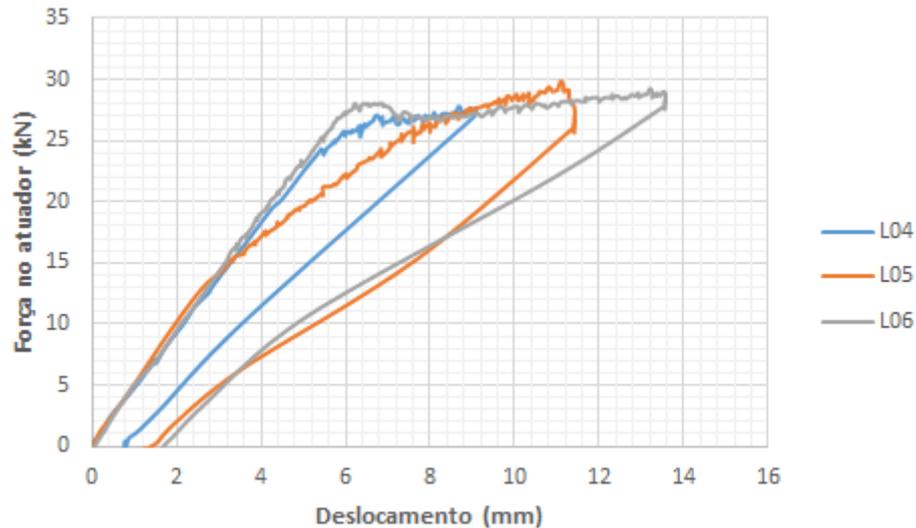
	P_{exp} (kN)
L01CE	83,61
L02CE	82,29
L03CE	91,15

[Fonte: próprio autor]

P_{exp}, : força última no atuador aplicada no ensaio.

7.1.5. ENSAIO À FLEXÃO

A curva força no atuador versus deslocamentos para os ensaios de flexão está apresentada na Figura 7-7.

Figura 7-7: Força no atuador versus deslocamento

[Fonte: próprio autor]

Os valores correspondentes à força no atuador de fissuração e última obtidos nos ensaios, considerando o peso próprio, estão indicados na Tabela 7-4.

	P_r (kN)	P_{ELU} (kN)
L04	24,30	27,75
L05	13,80	27,63
L06	23,50	29,18

[Fonte: próprio autor]

P_r : força no atuador correspondente ao momento de fissuração no ensaio, na seção em análise;

P_{ELU} : força no atuador correspondente ao momento fletor último no ensaio, na seção em análise.

7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentadas as análises dos resultados, desde a tolerância de fabricação, até pela comparação dos valores experimentais com os teóricos e pela descrição dos mecanismos resistentes observados em cada tipo de laje ensaiada.

Na sequência é apresentado o estudo da utilização da capa de concreto (moldada in-loco), com objetivo de visualizar se o emprego do capeamento poderia atenuar possíveis variação de resultado, associado ao processo de fabricação desta laje.

7.2.1. TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO

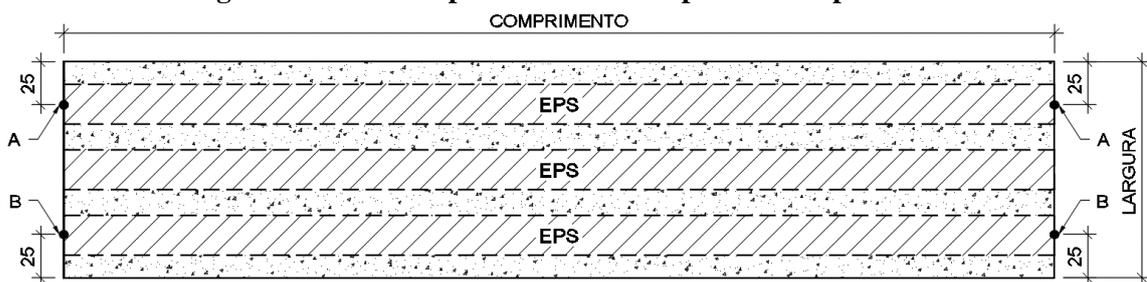
Com destaque ao processo de produção apresentado no Capítulo 5, é feita uma análise geométrica da seção transversal de projeto com a seção transversal experimental, ou seja, com a seção transversal medida no laboratório. São aferidas também outras dimensões como, comprimento, altura da laje, espessura da alma, somatório das espessuras das almas.

As tolerâncias de fabricação das lajes alveolares de concreto protendido devem atender as prescrições da Tabela 2-1 deste trabalho. O ajuste é igual à tolerância global somada com as variações inerentes e a folga, conforme definições da ABNT NBR 14861:2011. A partir do ajuste são determinadas as dimensões nominais de fabricação.

É admissível a utilização na obra de elementos fora das tolerâncias definidas, desde que não comprometam o desempenho estrutural, ou arquitetônico ou a durabilidade da obra como um todo, sendo que tal fato deve ser comprovado pelo responsável pelo projeto estrutural.

Para uma laje alveolar quando o comprimento estabelecido em projeto for menor ou igual a 5m, a tolerância de fabricação é de ± 10 mm. Para coleta dessas informações foram extraídas duas medidas (distância entre os pontos AA e BB). A Figura 7-8 apresenta as locações dos pontos A e B. O comprimento final experimental é a média das distâncias medidas nos pontos AA e BB.

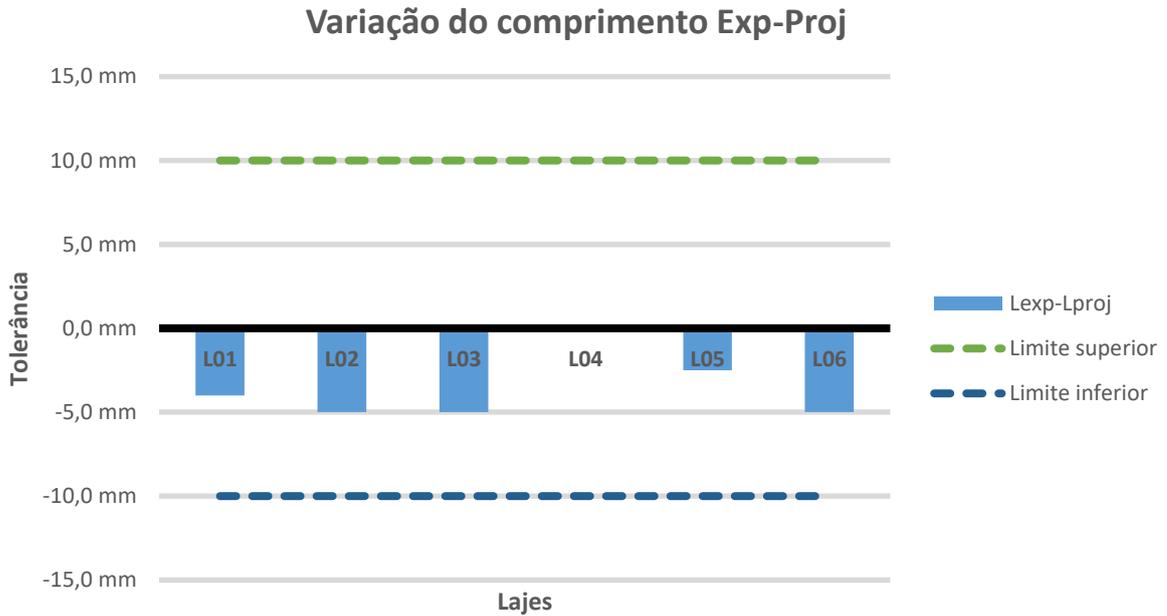
Figura 7-8: Critério para definir o comprimento experimental



[Fonte: próprio autor]

A Figura 7-9 mostra o valor da diferença do comprimento experimental (L_{exp}) e o comprimento de projeto (L_{proj}) de todas as seis lajes ensaiadas. Todas as lajes tiveram variação no comprimento de projeto com o que fabricado, ficando com a dimensão menor, exceto na laje L04, porém, todas estão dentro do limite de tolerância estabelecido.

Figura 7-9: Diferença do comprimento experimental com comprimento de projeto

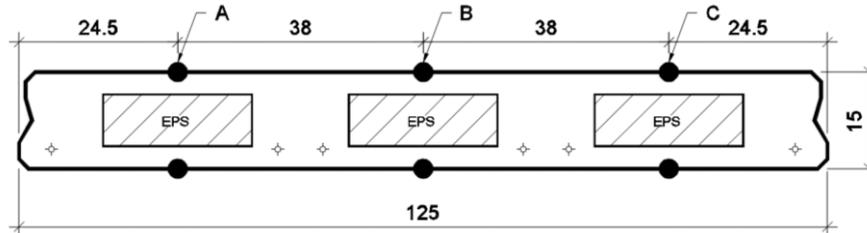


[Fonte: próprio autor]

A fabricação da laje alveolar moldada por fôrma fixa com a utilização de topadores para definir o comprimento da laje mostrou-se adequado quanto a tolerância em relação ao seu comprimento.

A tolerância para a fabricação da laje alveolar quanto a altura é de -5 a +10 mm, se a altura da laje (h) for igual ou inferior a 150 mm. Em laboratório são medidas três alturas em cada extremidade da laje. Na Figura 7-10 é apresentada a locação dos pontos onde são extraídas as medidas das alturas em cada extremidade. O valor médio das três medições é utilizado para comparar com a tolerância de fabricação.

Figura 7-10: Critério para definir a altura experimental da laje

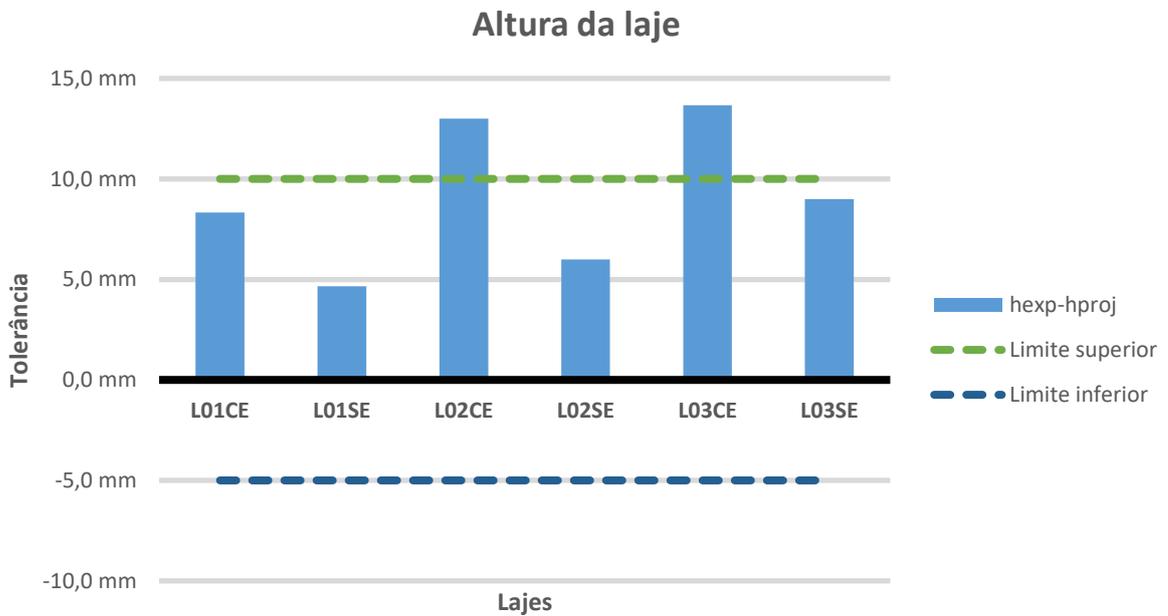


[Fonte: próprio autor]

A análise do resultado da diferença da altura experimental com a altura de projeto são apresentadas nas Figura 7-11 e Figura 7-12. O valor da diferença da média da altura experimental (h_{exp}) com a altura de projeto (h_{proj}) é comparado com a tolerância de fabricação

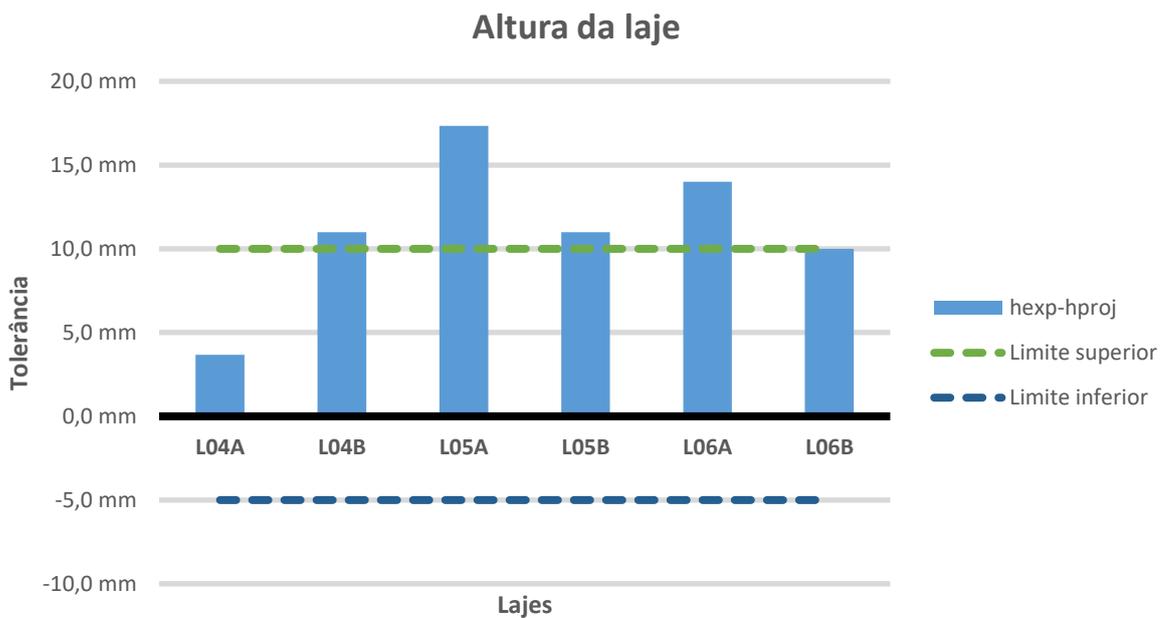
normatizado. Todas as lajes foram fabricadas com a altura maior do que especificado, sendo que as lajes L01CE, L01SE, L02SE, L03SE, L04A não excederam o limite normativo, porém as demais lajes ultrapassaram o limite permitido.

Figura 7-11: Diferença da altura experimental com a altura de projeto



[Fonte: próprio autor]

Figura 7-12: Diferença da altura experimental com a altura de projeto

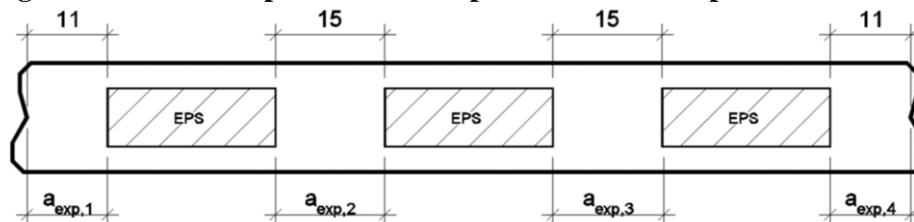


[Fonte: próprio autor]

O fato da laje alveolar moldada por fôrma fixa estar com a altura maior do que a especificada em projeto traz alguns impactos, dentre os quais, destacam-se o maior consumo de concreto, aumentando assim o peso próprio e, conseqüentemente, uma carga permanente não prevista. Outro aspecto é a superfície irregular o que teria maior agravante se a laje fosse utilizada sem a capa de concreto. O procedimento utilizado para definir a altura final da laje, apresentado no Capítulo 5 demonstra a necessidade de ser aperfeiçoado visando que os limites de variação quanto a altura fique dentro dos limites estabelecidos.

Existem duas tolerâncias para a espessura da alma (largura da nervura), uma está relacionada para cada alma com a tolerância de -10 a +15mm, já a outra tolerância está relacionada ao somatório de todas as almas cujo o limite é de tolerância é $\Sigma b_w \leq 20mm$. Todas as extremidades das lajes que os enchimentos (EPS) estão visíveis são medidas as almas, tanto as almas internas quanto externas. Na Figura 7-13 apresenta as indicações das nomenclaturas consideradas para as almas. As dimensões experimentais das almas $a_{exp,1}$, $a_{exp,2}$, $a_{exp,3}$ e $a_{exp,4}$ são comparadas com a alma de projeto a_{proj} . Para as almas externas o valor é de 11cm e para as internas o valor é de 15cm. A diferença entre a alma de projeto (a_{proj}) e a alma experimental ($a_{exp,1}$ a 4) são comparados com os limites de tolerância de fabricação.

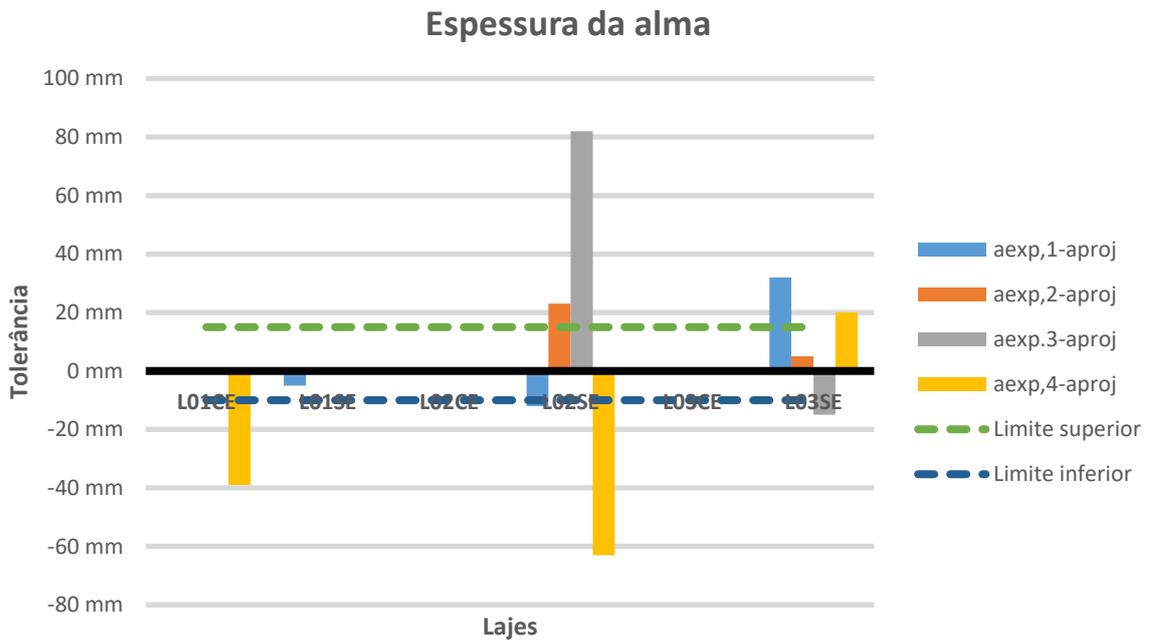
Figura 7-13: Critério para definir a espessura da alma experimental da laje



[Fonte: próprio autor]

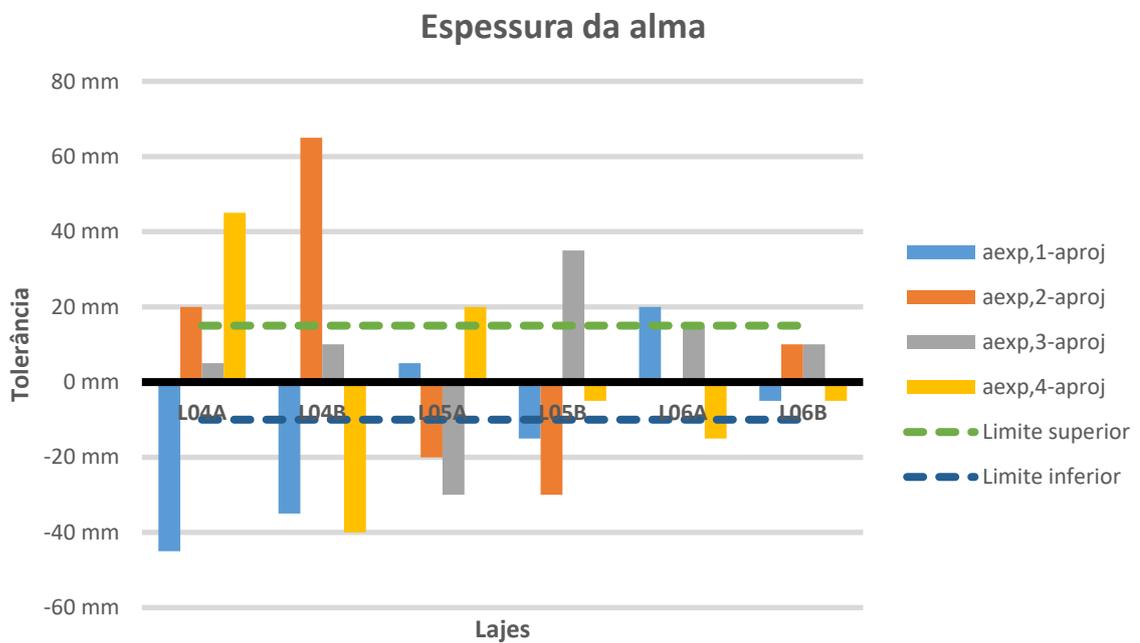
Nas Figura 7-14 e Figura 7-15 são apresentadas os resultados da análise da nervura. Percebe-se um número expressivo de espessura da alma além da tolerância permitida. Nas lajes onde foram posicionados estribos em sua extremidade, também ocorreu desvio além do permitido, porém, com uma frequência menor.

Figura 7-14: Diferença da espessura da alma experimental com a espessura de projeto



[Fonte: próprio autor]

Figura 7-15: Diferença da espessura da alma experimental com a espessura de projeto



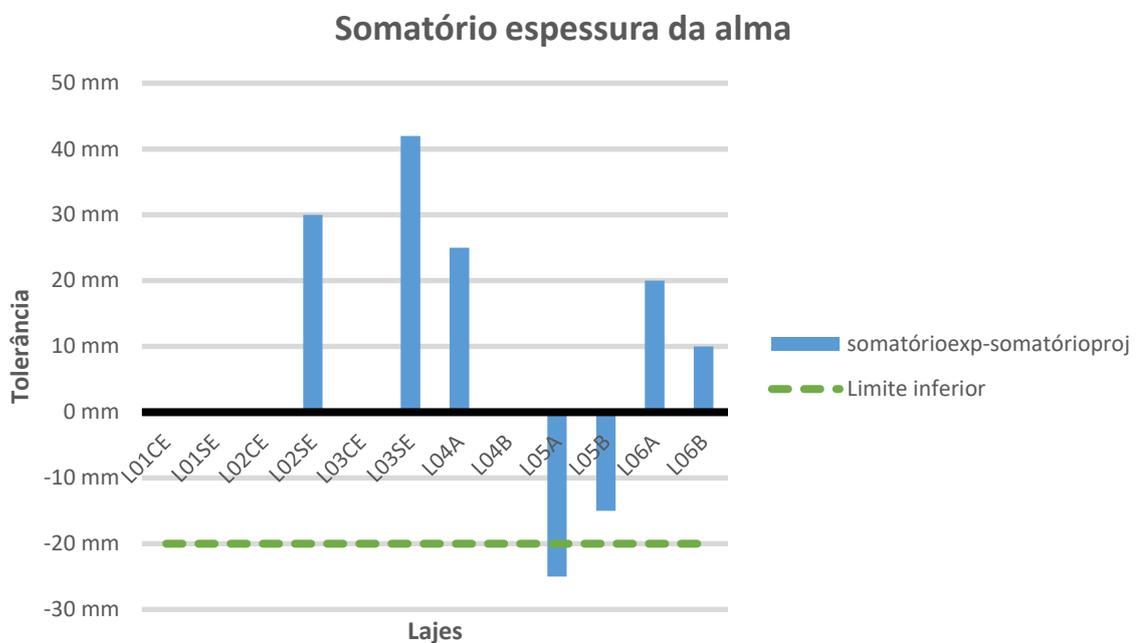
[Fonte: próprio autor]

A variação da espessura da alma está associada a dimensão do ESP, que pode ser adquirido já na dimensão do projeto, ou ser recortado de uma placa com dimensão maior. Para

a produção das lajes desta pesquisa o EPS foi recortado, e possível observar uma grande variação das dimensões do projeto com as dimensões experimentais.

Com as informações das almas apresentadas, é possível analisar o segundo critério da espessura da alma, que está relacionado ao somatório de todas as espessuras das almas. A dimensão do somatório experimental da alma Σ_{exp} é comparada com a somatório da alma de projeto Σ_{proj} . A diferença entre Σ_{exp} e Σ_{proj} são comparados com os limites de tolerância de fabricação. A Figura 7-16 apresenta o resultado para o critério do somatório das espessuras almas.

Figura 7-16: Diferença do somatório da espessura da alma experimental com o somatório da espessura da alma de projeto



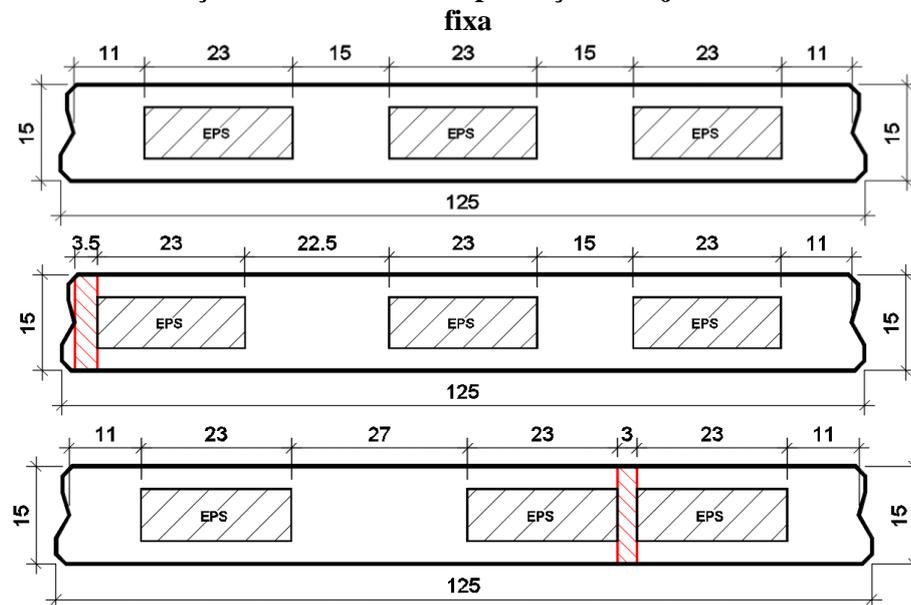
[Fonte: próprio autor]

Nas extremidades das lajes L01CE, L01SE, L02CE, L03CE e L04B não é possível verificar a análise, pois nem todas as almas estão visíveis, impedindo assim a sua medição. Isso deve-se ao fato da laje alveolar moldada por fôrma fixa já ser produzida no comprimento de projeto, e um pequeno afastamento do isopor para a tampa da extremidade, já permite a entrada de concreto ou nata de cimento nesta região. A laje L05A está com 5 mm fora da tolerância de projeto, e as demais estão com o somatório da espessura da alma acima da espessura prevista em projeto. A ABNT NBR 14861:2011 não faz nenhuma referência quanto a um desvio superior. A simetria nas espessuras das almas pode acarretar a uma capacidade maior quanto a

força cortante, porém, ocorre o aumento do peso próprio devido ao acréscimo de volume provocado pela maior dimensão da alma.

Destaca-se ainda que mesmo se as tolerâncias do somatório das almas estiverem dentro do limite, é importante que ocorra uma equidade entre elas. Na Figura 7-17 são apresentadas três situações do posicionamento do EPS, em todas a tolerância está atendida. Porém, a segunda e terceira imagem apresentam um estrangulamento da alma, destacado com hachura na cor vermelha. Nessa alma com pequena espessura pode ocorrer ruptura.

Figura 7-17: Movimentação da EPS durante a produção da laje alveolar moldada por fôrma fixa



[Fonte: próprio autor]

Na Figura 7-18 pode ser vista a seção transversal da laje alveolar moldada por fôrma, onde a nervura da extremidade esquerda está menor, se comparada com a nervura da extremidade direita.

Figura 7-18: Estrangulamento da alma da extremidade esquerda da laje L04A



[Fonte: próprio autor]

7.2.2. ANCORAGEM DA ARMADURA ATIVA NA FABRICAÇÃO

A falha na ancoragem da armadura longitudinal pode induzir uma ruptura prematura das lajes alveolares, especialmente quando o mecanismo governante é o de cisalhamento. Qualquer falha na ancoragem da armadura nas proximidades do apoio implica em uma redistribuição de esforços na seção e um aumento súbito na tensão da armadura, que por sua vez, solicita ainda mais a ancoragem. Quando o comprimento de apoio não é suficiente para mobilizar estas tensões, ocorre um escorregamento que pode ocasionar a ruptura do elemento.

Para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, o processo de fabricação assemelha-se ao processo produtivo de vigas protendidas (pré-tração), onde o concreto lançado é fluido e vibrado, diminuindo, portanto, a possibilidade de escorregamento das cordoalhas por falta de aderência entre o concreto e a cordoalha.

É possível medir de forma direta o escorregamento das cordoalhas em lajes alveolares, pois após o corte transversal da laje pode-se medir através de um paquímetro o quanto a cordoalha entrou (encurtou). A Figura 7-19 apresenta uma laje alveolar onde pode ser visto o encurtamento da cordoalha na extremidade da laje.

Figura 7-19: Escorregamento da cordoalha



[Fonte: Mold Estruturas]

Mesmo não sendo crítico o escorregamento de cordoalhas em lajes alveolares moldada por fôrma fixa durante o processo de fabricação, e se desejasse aferir o escorregamento da cordoalha, esse processo é dificultoso, pois as lajes já são produzidas no comprimento de projeto utilizando topadores na fôrma. A cordoalha é cortada antes da extremidade da laje, e com isso caso ocorra um escorregamento da cordoalha não é possível aferir de forma direta. Na Figura 7-20 podem ser vistos os topadores e a condição das extremidades após o corte das cordoalhas.

Figura 7-20: Topadores e a extremidade das lajes após o corte da cordoalha

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados]

O escorregamento limite da cordoalha após a etapa de corte da laje alveolar $\Delta l_{lim} = 1,3 \cdot \Delta l_0$, sendo: $\Delta l_0 = 0,40 \cdot l_{pt2} \cdot \frac{\sigma_{cp0}}{E_p}$. A seguir apresenta-se qual é o encurtamento limite das cordoalhas para a laje em estudo.

$$\Delta l_0 = 0,40 \cdot l_{pt2} \cdot \frac{\sigma_{cp0}}{E_p} = 0,40 \cdot 816 \cdot \frac{1,46}{200} = 2,38mm$$

$$l_{pt2} = 85 \cdot \phi = 85 \cdot 9,6 = 816mm$$

$$\sigma_{cp0} = 1551 \cdot 0,943 = 1462 \text{ MPa} = 1,46 \text{ kN/mm}^2$$

$$\Delta l_{lim} = 1,3 \cdot 2,38 = 3,09mm$$

O escorregamento de 3,09 mm calculado, é o valor máximo permitido para que a laje seja aceita na produção. Além deste critério a ABNT NBR 14861:2011, no item 11.8, atribui outros requisitos para a aceitação da laje na fabricação, associado ao escorregamento das cordoalhas. Este limite apresentado não está relacionado com a possibilidade da ruptura da laje por falha da ancoragem.

7.2.3. ANÁLISE DOS ENSAIOS A FORÇA CORTANTE DAS LAJES SEM ESTRIBOS

Na Tabela 7-6 estão apresentados os valores experimentais e teóricos quanto à resistência a força cortante e os valores do momento resistente característico e de fissuração.

Os valores da resistência à flexão e a força cortante foram determinados seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 14861:2011.

Tabela 7-6: Forças cortantes experimentais e teóricas, momento fletor experimental e de fissuração para lajes sem estribos ensaiadas a força cortante						
	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk1} (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk1}}$	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{r,exp}$ (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{r,exp}}$
L01SE¹	66,41	108,13	0,61	39,48	36,11	1,09
L02SE²	95,39	112,48	0,85	35,68	28,36	1,26
L03SE²	82,38	113,29	0,73	30,81	29,27	1,05
L04A²	89,51	111,33	0,80	33,48	28,67	1,17
L04B²	93,07	110,86	0,84	34,82	30,99	1,12
L05A³	119,71	108,07	1,10	35,89	29,68	1,21
L05B³	104,68	106,39	0,98	31,38	27,20	1,15
L06A²	89,41	115,14	0,78	33,45	31,06	1,08
L06B²	97,27	109,95	0,88	36,96	29,91	1,22
¹ Força aplicada a 60cm do apoio. ² Força aplicada a 2,5 h do apoio. ³ Força aplicada a 2,0 h do apoio.						
[Fonte: próprio autor]						

$V_{u,exp}$: força cortante última no ensaio (somando o peso próprio), na seção em análise;

V_{Rk1} : força cortante resistente característica, calculada para a zona fissurada à flexão (força cortante resistente da seção), sem nenhum coeficiente de ponderação, na seção em análise;

$M_{u,exp}$: momento fletor último no ensaio, correspondente a $V_{u,exp}$, (somando a parte correspondente ao peso próprio);

$M_{r,exp}$: momento de fissuração no ensaio, na seção em análise.

Analisando a última coluna da Tabela 7-6 percebe-se que para todas as lajes ensaiadas a força cortante o momento de fissuração é alcançando, ou seja, a análise é feita em uma região fissurada por flexão (Flexural Shear Capacity), o que validaria a uso das recomendações da ABNT NBR 14861:2011.

Somente a peça L05A apresentou resistência acima ao valor previsto, considerando a região fissurada. Nas demais lajes os resultados experimentais não foram atingidos, isto devido ao fato que a ruptura não foi governada pelo cisalhamento e sim por falha de ancoragem. No item 7.2.6, essa discussão é apresentada com maior abrangência.

De forma geral, a fissura típica visualizada nos ensaios destas lajes, foram predominantemente verticais nas laterais. Na parte inferior, as fissuras foram de uma lateral até a outra, acompanhando a direção da viga da transferência. A Figura 7-21 apresenta as fissuras obtidas no ensaio da laje L06B. Todos os ensaios foram levados a uma abertura de fissura de pelo menos 0,5 mm.

Figura 7-21: Fissuração da laje L06B. a) nas laterais b) na parte inferior



[Fonte: próprio autor]

7.2.4. ANÁLISE DOS ENSAIOS A FORÇA CORTANTE DAS LAJES COM ESTRIBOS

Conforme apresentado neste trabalho, o processo produtivo para este tipo de laje viabiliza o posicionamento de armadura complementar. Usando deste recurso para as lajes L01CE, L02CE e L03CE, foram colocadas armaduras transversais (estribos), com a expectativa de ganho na capacidade de resistência para os ensaios da força cortante.

De acordo com INFORSATO et al (2018), a resistência ao cisalhamento pode variar com a taxa de protensão. A parcela resistente referente ao concreto pode até dobrar. Associado ao ganho da parcela do concreto, o posicionamento dos estribos contribui com o ganho referente a parcela do aço. No exemplo apresentado, a parcela resistente do concreto variou de 71,14 kN

a 142,28 kN. Para a armadura transversal utiliza-se 1,68 cm²/m (ϕ 5,0 mm com 6 ramos a cada 10 cm), o que corresponde a um acréscimo de capacidade de carga de 106,50 kN. Percebe-se que para este arranjo de armadura utilizada, a capacidade resistente ao cisalhamento pode até triplicar.

Na Tabela 7-7 estão apresentados os valores experimentais e teóricos quanto à resistência a força cortante, e os valores do momento resistente característico e de fissuração.

Os valores de resistência à flexão e a força cortante foram determinados seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 14861:2011.

Tabela 7-7: Forças cortantes experimentais e teóricas, momento fletor experimental e de fissuração para lajes com estribos ensaiadas a força cortante						
	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk3} (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{Rk3}}$	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{r,exp}$ (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{r,exp}}$
L01CE¹	83,72	233,79	0,36	49,86	36,85	1,35
L02CE²	85,35	251,32	0,34	31,92	29,89	1,07
L03CE²	94,87	252,71	0,38	35,49	30,51	1,16
¹ Força aplicada a 60cm do apoio. ² Força aplicada a 2,5 h do apoio.						
[Fonte: próprio autor]						

$V_{u,exp}$: força cortante última no ensaio (somando o peso próprio), na seção em análise;

V_{Rk3} : força cortante resistente característica, calculada para a zona fissurada à flexão (força cortante resistente da seção), sem nenhum coeficiente de ponderação, na seção em análise;

$M_{u,exp}$: momento fletor último no ensaio, correspondente a $V_{u,exp}$, (somando a parte correspondente ao peso próprio);

$M_{r,exp}$: momento de fissuração no ensaio, na seção em análise.

De acordo com os resultados apresentados, todas as lajes tiveram o momento de fissuração alcançados. A expectativa era que haveria um ganho de resistência oriundo com o posicionamento dos estribos, fato que não ocorreu. Embora o ensaio aplicado seja para a força cortante, a ruptura da laje foi caracterizada pela falha da ancoragem, semelhantemente ao que ocorreu com as lajes sem estribos.

7.2.5. ANÁLISE DOS ENSAIOS À FLEXÃO

Para o ensaio à flexão as características geométricas da seção transversal correspondem a seção no meio do vão, porém, a sua caracterização é dificultosa, pois o EPS

está totalmente revestido com o concreto, impedindo assim as medições de forma direta, e a determinação da real posição.

Para a determinação da capacidade resistente à flexão são consideradas três seções transversais, sendo, a primeira a média das propriedades das extremidades A e B, a segunda, considerando as propriedades da extremidade A e a terceira, é considerando as propriedades da extremidade B.

Na Tabela 7-8 estão apresentados os valores experimentais e teóricos quanto ao momento resistente característico e de fissuração.

Os valores de resistência à flexão foram determinados seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 7-8: Resultados experimentais e teóricos, referentes à flexão						
	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L04	52,79	60,29	0,88	47,96	47,23	1,02
L04A	52,51	58,52	0,90	47,68	45,51	1,05
L04B	53,06	62,04	0,86	48,23	48,74	1,00
Média	52,79	60,28	0,88	47,96	47,16	1,02
L05	52,39	62,73	0,82	33,21	48,46	0,69
L05A	52,65	63,89	0,82	33,47	49,64	0,67
L05B	52,13	60,84	0,86	32,95	47,42	0,69
Média	52,39	62,49	0,83	33,21	48,51	0,68
L06	55,16	61,33	0,90	47,22	47,80	1,00
L06A	55,41	62,69	0,89	47,46	48,50	0,98
L06B	54,92	59,98	0,92	46,97	47,20	0,99
Média	55,16	61,33	0,90	47,22	47,83	0,99
[Fonte: próprio autor]						

$M_{u,exp}$: momento fletor último no ensaio, correspondente a $V_{u,exp}$, (somando a parte correspondente ao peso próprio);

M_{Rk} : momento fletor resistente característico (sem nenhum coeficiente de segurança);

$M_{r,exp}$: momento de fissuração no ensaio, na seção em análise;

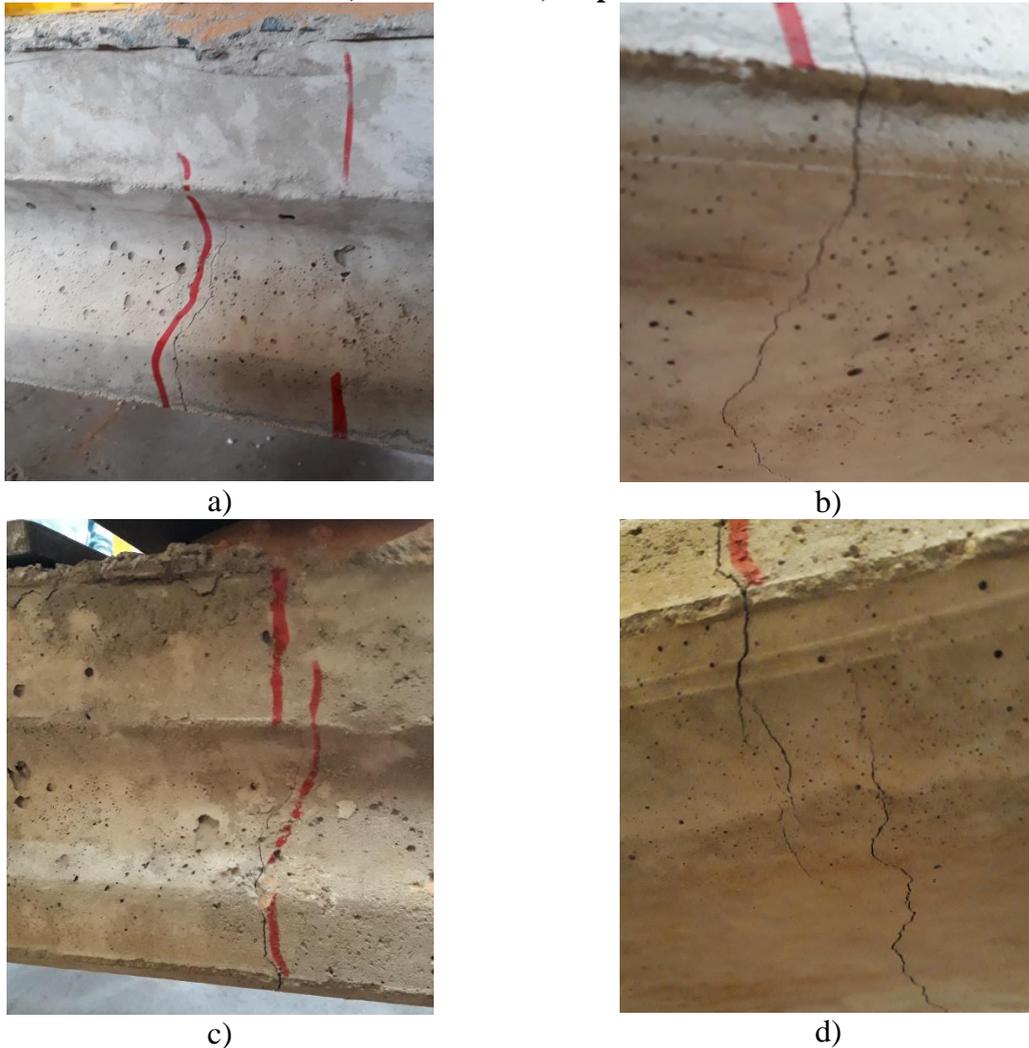
M_r : momento de fissuração, na seção em análise.

Os resultados para as lajes L04 e L06 quanto ao estado limite último, foram de aproximadamente de 90% da capacidade resistente teórica, e não houve variabilidade dos resultados considerando as três propriedades geométricas (extremidade A, extremidade B e a

média das extremidades A e B). Já para o momento de fissuração os resultados experimentais foram próximos aos teóricos.

Na Figura 7-22 podem ser vistas as fissuras dos ensaios à flexão para as lajes L04 e L06.

Figura 7-22: Fissuração da laje L04. a) nas laterais. b) na parte inferior. Fissuração da laje L06. c) nas laterais. d) na parte inferior



[Fonte: próprio autor]

Para a laje L05 o resultado quanto ao estado limite último é de 17% abaixo do esperado, e para o momento de fissuração o resultado destoou em 32%. Na Figura 7-23 são apresentadas as fissuras obtidas na realização do ensaio para a laje L05.

Figura 7-23: Fissuração da laje L05. a) nas laterais. b) na parte inferior

[Fonte: próprio autor]

Nos resultados apresentados para o ensaio de flexão, percebe-se que os resultados experimentais não convergiram com os resultados analíticos. Os motivos que podem ter levado a essa divergência podem estar relacionados com a movimentações do EPS, características geométricas utilizadas para a análise analítica, e a altura da laje.

Para a análise dos resultados à flexão utiliza-se o diagrama retangular, pois haveria pequena diferença nos resultados se comparado com o parábola-retângulo. Para as propriedades do aço de protensão utiliza-se a tabela do VASCONCELOS (1980) (ver Tabela 8-2). Destaca-se que as informações reais das propriedades do aço de protensão ($\sigma \times \epsilon$), podem aumentar as distâncias dos resultados obtidos, desta maneira, pode haver uma pequena diferença dos resultados entre o valor experimental e o resistente.

No item 7.2.7 deste trabalho, são apresentados exemplos comparativos levando em consideração a movimentação do ESP. São analisados a variabilidade do momento resistente de fissuração e último, que poderiam justificar os resultados encontrados experimentalmente.

Outro estudo é apresentado no item 7.2.8, que analisa a variabilidade da altura da laje pode influenciar nos resultados quanto ao momento resistente de fissuração e último, alterando a seção da laje de 15 cm para 16 cm de altura.

Completando os resultados apresentado no item 7.2.7, desenvolve-se o item 7.2.9 que acrescenta a capa de concreto (capeamento moldado no local), com 5 cm de espessura. Procura-se esclarecer se o uso da capa pode minimizar as variações resistente (último e fissuração), em virtude da movimentação do EPS.

7.2.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS À ANCORAGEM

Segundo a EN 1992-1-1:2004, a verificação da ancoragem das forças de tração no estado limite último, deve ser feita nas seções onde as tensões no concreto excedam a resistência característica inferior do concreto à tração. A força na armadura deverá ser calculada admitindo as seções não-fissuradas. As seções onde as tensões no concreto não excedam a resistência do concreto à tração, a verificação não é necessária.

ARAÚJO (2011) complementa em seu trabalho as indicações do EC2 que a tensão no cabo que dever ser ancorada, σ_{pd} , seja calculada de forma simplificada, pela equação (7-8).

$$\sigma_{pd} = \frac{V_d + M_d/d_v + 0,5 \cdot N_d}{A_p} \quad (7-8)$$

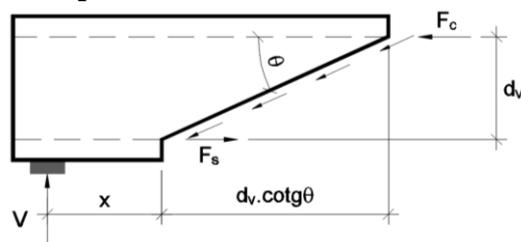
Sendo:

d_v : é a estimativa do braço de alavanca $d_v = 0,9 \cdot d$;

d : é a altura útil da seção.

O modelo simplificado para o cálculo da carga última de peças sem armadura transversal e com cordoalhas posicionadas paralelas ao eixo longitudinal, pode ser visto na Figura 7-24. O diagrama de corpo livre dessa figura corta a armadura longitudinal, a região comprimida pela flexão e segue o ângulo da fissura diagonal de cisalhamento. Nesse caso, é admitido que as tensões de cisalhamento são suportadas pelas tensões devido ao engrenamento dos agregados (τ_{ci}) e às tensões de cisalhamento na região comprimida por flexão. A partir do equilíbrio pode ser observado que a componente horizontal das tensões de cisalhamento na fissura diagonal contribui no aumento da tração na armadura longitudinal. O efeito de pino da armadura longitudinal é ignorado, e o engrenamento dos agregados é estimado constante ao longo da altura (BENTZ & COLLINS (2006) apud ARAÚJO (2011)).

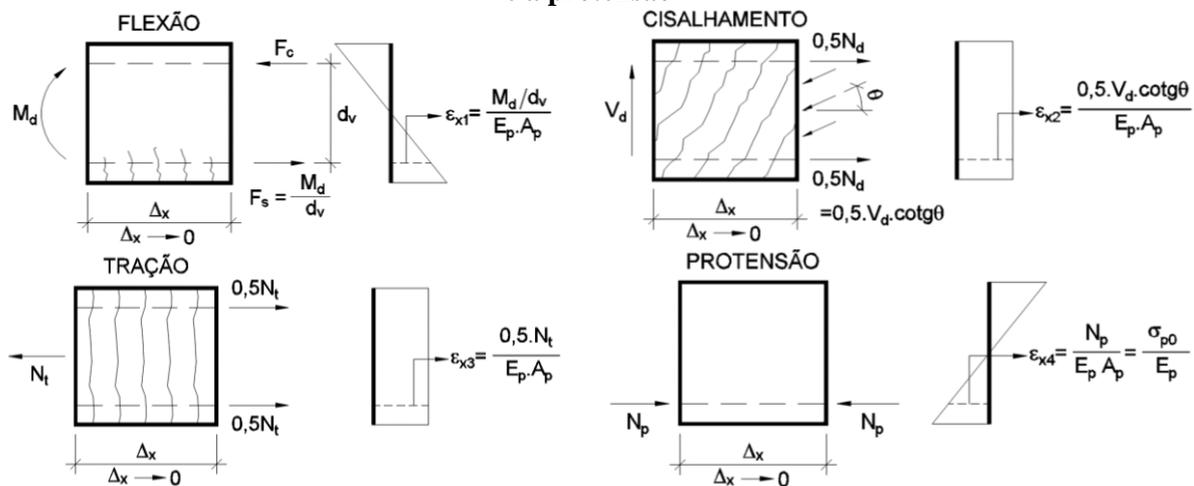
Figura 7-24: Diagrama de corpo livre do mecanismo básico de resistência à força cortante



[Fonte: próprio autor]

A Figura 7-25 mostra a deformação da armadura longitudinal devido ao momento fletor, força cortante, esforço axial e a protensão. Na metodologia apresentada em ARAÚJO (2011), quando o momento fletor solicitante for menor que o momento de fissuração – seção não fissurada por flexão – a rigidez axial da área tracionada de concreto deverá ser adicionada à rigidez da armadura longitudinal. Admitindo como uma simplificação razoável, a área tracionada de concreto pode ser tomada igual a $0,5b_w d_v$ e o regime de trabalho elástico; sendo assim, a rigidez axial da área tracionada de concreto pode ser tomada igual à $0,5E_c b_w d_v$. Existindo fissuras de flexão na seção verificada, a rigidez axial da área tracionada de concreto deverá ser desprezada.

Figura 7-25: Deformação longitudinal devido ao momento fletor, força cortante, esforço axial e a protensão



[Fonte: próprio autor]

A tensão σ_{pd} que necessita a ser ancorada é:

$$\sigma_{pd} = (\varepsilon_x) \cdot E_p \tag{7-9}$$

$$\sigma_{pd} = (\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{x4}) \cdot E_p \tag{7-10}$$

$$\sigma_{pd} = \left(\frac{M_d/d_v}{E_p \cdot A_p} + \frac{0,5 \cdot V_d \cdot \cotg\theta}{E_p \cdot A_p} + \frac{0,5 \cdot N_t}{E_p \cdot A_p} - \frac{\sigma_{p0}}{E_p} \right) \cdot E_p \tag{7-11}$$

$$\sigma_{pd} = \frac{M_d/d_v + 0,5 \cdot V_d \cdot \cotg\theta + 0,5 \cdot N_t - \sigma_{p0} \cdot A_p}{A_p} \tag{7-12}$$

Para chegar à equação (7-8) de acordo com ARAÚJO (2011), devem ser feitas as seguintes simplificações: considera $\sigma_{p0} \cong 0$, já que a ruptura deve ocorrer em seção cuja posição em relação ao apoio é inferior ao comprimento de transferência; $0,5 \cdot \cotg\theta \approx 1,0$, o que implica em $\theta \cong 26^\circ$; a força de tração desprezível $N_t \rightarrow 0$.

Na Tabela 7-9 estão apresentados os valores experimentais e teóricos quanto a força cortante, à flexão (fissuração e último), tensão no cabo a ser ancorada (σ_p), comprimento de ancoragem necessário, e comprimento de ancoragem disponível. Os valores são característicos e são descontadas as perdas de protensão.

Tabela 7-9: Parâmetros para a determinação da perda por ancoragem								
	V_{u,exp} (kN)	M_{u,exp} (kN.m)	M_{r,exp} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{r,exp}}$	σ_p (MPa)	l_{bpk} (mm)	l_{dips} (mm)	$\frac{l_{bpk}}{l_{dips}}$
L01SE¹	64,69	39,48	36,11	1,10	1453	915	650	1,40
L01CE¹	81,96	49,86	36,85	1,35	1883	1149	650	1,77
L02SE²	94,43	35,68	28,36	1,25	1469	916	425	2,15
L02CE²	84,37	31,92	29,89	1,07	1298	812	425	1,91
L03SE²	81,40	30,81	29,27	1,05	1276	794	425	1,87
L03CE²	93,89	35,49	30,51	1,16	1403	881	425	2,07
L04A²	88,57	33,48	28,64	1,17	1383	870	425	2,05
L04B²	92,10	34,82	30,99	1,12	1378	864	425	2,03
L05A³	119,00	35,89	29,68	1,21	1477	920	350	2,63
L05B³	103,99	31,38	27,20	1,15	1335	841	350	2,40
L06A²	88,88	33,62	31,06	1,08	1320	824	425	1,94
L06B²	96,31	36,39	29,91	1,22	1477	924	425	2,17
¹ Força aplicada a 60cm do apoio. ² Força aplicada a 2,5 h do apoio. ³ Força aplicada a 2,0 h do apoio.								
[Fonte: próprio autor]								

V_{u,exp} : força cortante última obtida no ensaio (somando o peso próprio), na seção de aplicação da força;

M_{u,exp} : momento fletor último obtido no ensaio, correspondente a V_{u,exp} (somando a parte correspondente ao peso próprio);

M_{r,exp} : momento de fissuração (considerando a seção do ponto de aplicação da força);

l_{bpk} : comprimento de ancoragem (sem nenhum coeficiente de ponderação);

l_{dips} : comprimento de ancoragem disponível (distância da extremidade da laje até o ponto de aplicação da carga).

Observa-se na Tabela 7-9 que, para todas as lajes, o momento de fissuração foi ultrapassado durante a realização do ensaio. Observa-se também que a distância de aplicação

da força é menor do que o comprimento da ancoragem definido, portanto, o mecanismo de ruptura da laje é por falha de ancoragem.

Na Figura 7-26 é possível observar a fissuração das lajes L01SE (a) e L01CE (b), onde a consideração de aplicação da carga está a 60 cm.

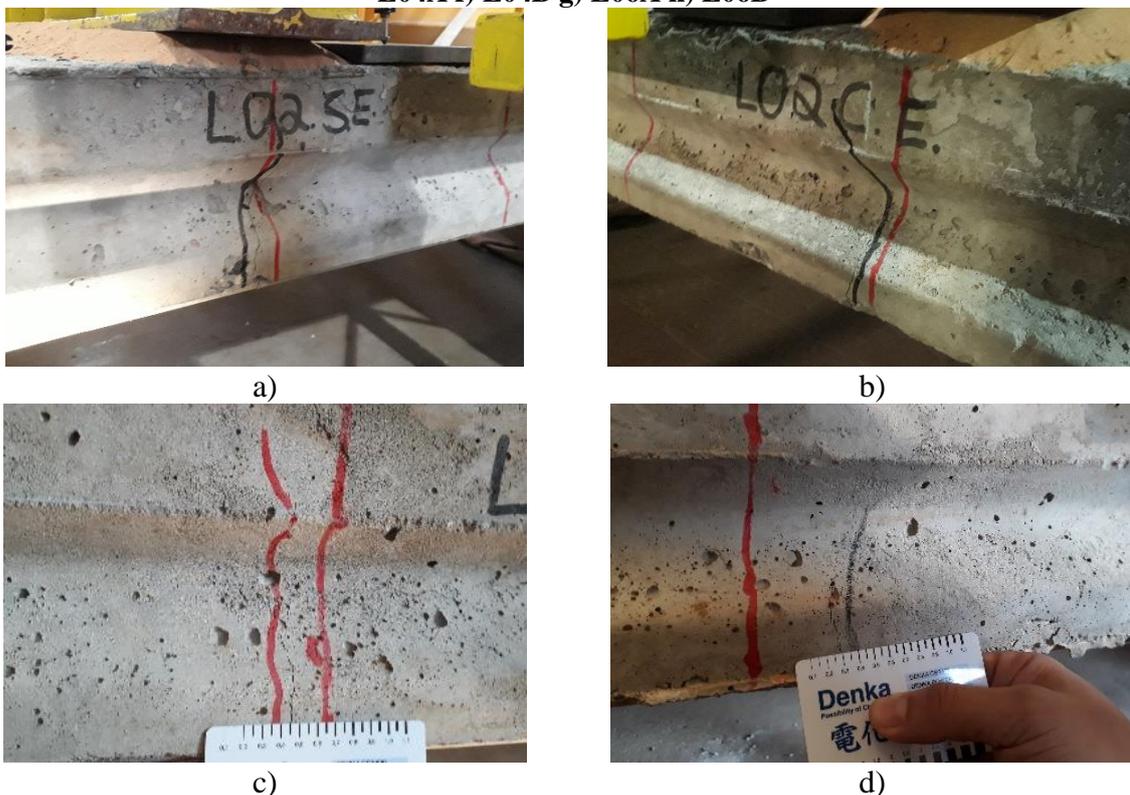
Figura 7-26: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L01SE b) L01CE

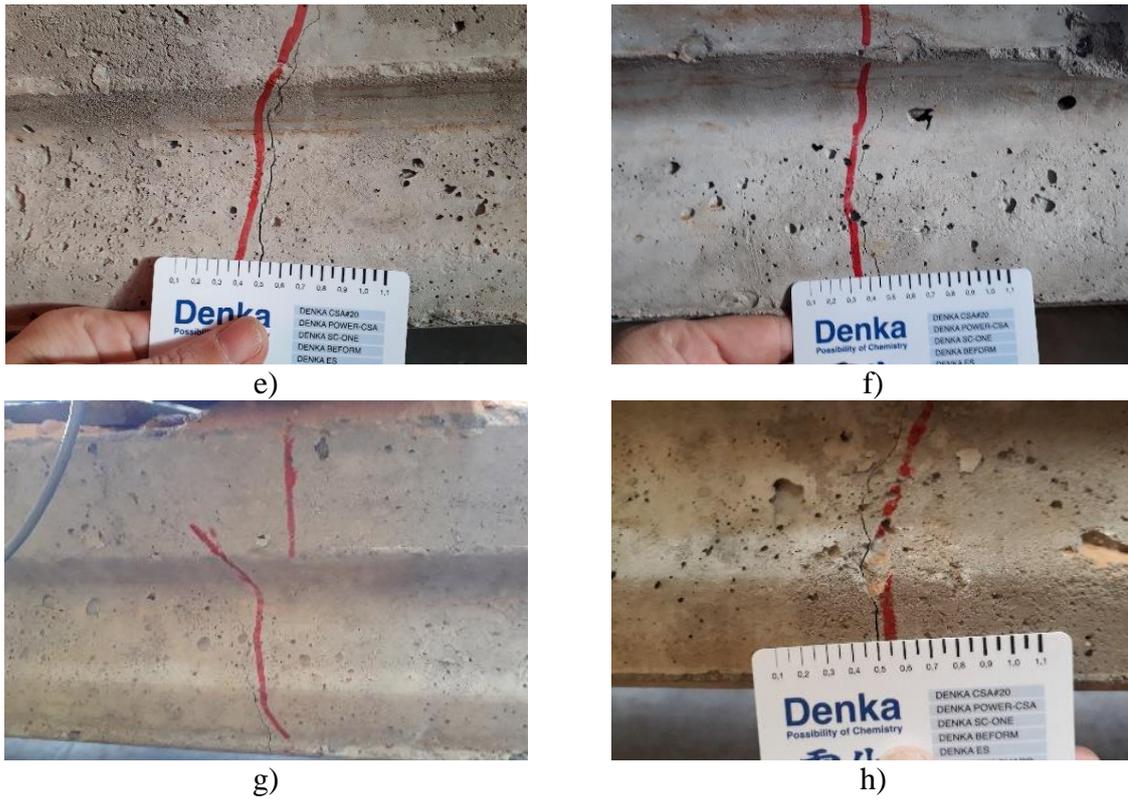


[Fonte: próprio autor]

Na Figura 7-27 é possível observar a fissuração das lajes L02SE (a); L02CE (b); L03SE (c); L03CE (d); L04A (e); L04B (f); L06A (g); L06B (h), onde a consideração de aplicação da carga está a 2,5h (37,5cm).

Figura 7-27: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L02SE b) L02CE c) L03SE d) L03CE e) L04A f) L04B g) L06A h) L06B





[Fonte: próprio autor]

Na Figura 7-28 é possível observar a fissuração das lajes L05A (a); L05B (b); onde a consideração de aplicação da carga está a 2,0h (30,0 cm).

Figura 7-28: Fissura abaixo da posição do atuador: a) L05A b) L05B



[Fonte: próprio autor]

Em todas as situações com a variação do ponto de aplicação da carga, e seguindo as recomendações normativas para o ensaio de força cortante, a inclinação da fissura encontrada é predominantemente vertical, o que não qualifica a ruptura como sendo de cisalhamento.

O mecanismo predominante de ruptura para as lajes ensaiadas a força cortante é de falha por ancoragem, o que justifica o não aumento de capacidade resistente para as lajes com o posicionamento de estribos em suas extremidades, e para as lajes que não tiveram estribos posicionados não alcançarem os valores previstos analiticamente.

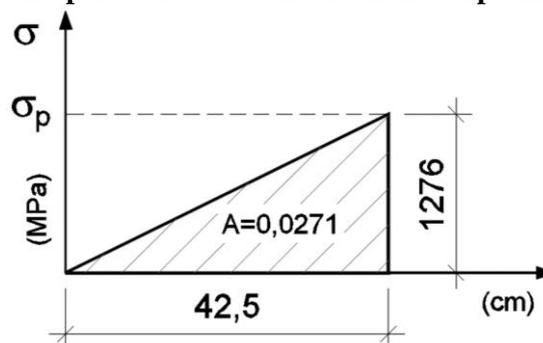
Uma vez extraída dos ensaios a tensão a ser ancorada (σ_p), é possível determinar, de acordo com CARVALHO² (2012), o encurtamento (arrancamento) experimental das cordoalhas, de acordo com a equação (7-13).

$$\int_0^l \sigma \cdot dx = \Delta l \cdot E_p \rightarrow \Delta l = \frac{\int_0^l \sigma \cdot dx}{E_p} \quad (7-13)$$

Sendo que o termo à direita representa o encurtamento total que a cordoalha sofre durante a ancoragem e vale Δl .

Na Figura 7-29 é apresentado o esquema utilizado para a laje L03SE, com os respectivos valores experimentais. No eixo y tem-se a tensão σ_p (MPa) e no eixo x encontra-se a distância da extremidade da laje até ao ponto de aplicação da carga.

Figura 7-29: Esquema para cálculo do encurtamento experimental da cordoalha

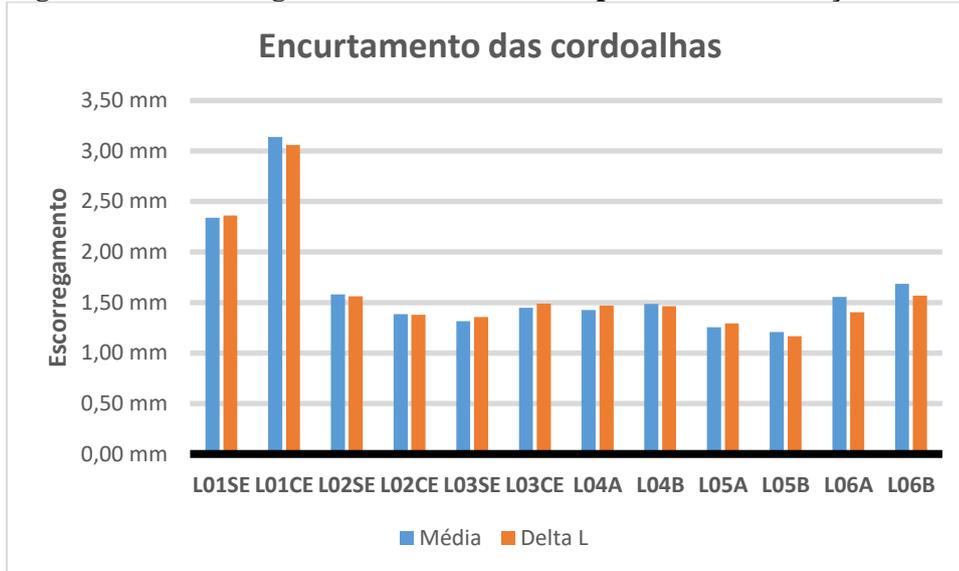


[Fonte: próprio autor]

Para a L03SE o escorregamento da cordoalha (Δl) após a realização é de $\Delta l = \frac{271}{200000} = 0,00135 = 1,35mm$.

No laboratório é medida a posição da cordoalha na extremidade antes e depois da realização do ensaio. A variação desta medida é o quanto a cordoalha deslocou. Para o comparativo é feito a média do escorregamento de todas as cordoalhas para cada extremidade. A Figura 7-30 apresenta o resultado experimental e o comparativo teórico de acordo com a equação (7-13).

Figura 7-30: Escorregamento das cordoalhas após o ensaio de força cortante



[Fonte: próprio autor]

A falha por ancoragem pode ocorrer por fendilhamento ou arrancamento da armadura. Pela Figura 7-30 observa-se que o encurtamento aferido no laboratório aproxima-se do encurtamento teórico calculado de acordo com a equação (7-13). Nas lajes ensaiadas o modo predominante do encurtamento foi caracterizado através do arrancamento das cordoalhas. A falha por fendilhamento só foi observado no ensaio da laje L04A, como pode ser visto na Figura 7-31.

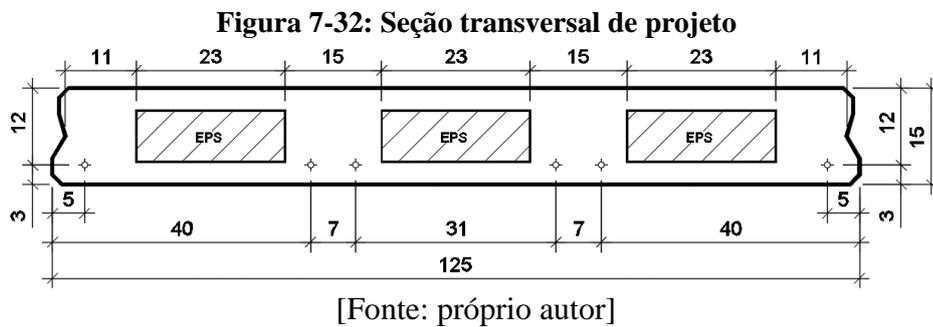
Figura 7-31: Ruptura por fendilhamento no ensaio da laje L04A



[Fonte: próprio autor]

O mecanismo de ruptura observado para as lajes ensaiadas é de falha da ancoragem. Atribui-se a isso principalmente a altura da laje 15 cm, $f_{cj,k}$, f_{ck} e a intensidade da protensão.

Para elucidar as informações do parágrafo anterior, determina-se a carga P_r (carga limite para o início da fissura) e V_r (cortante corresponde a carga de fissuração P_r , localizado a $0,5h$). São fixados os seguintes parâmetros: vão 5,70m; ponto de aplicação da carga $2,5h$ (37,5 cm); $\sigma_{pi} = 1453$ MPa; perda de protensão inicial de 5,0%; perda de protensão final de 20,0 %; cobrimento 3 cm, comprimento de ancoragem disponível 425mm. A Figura 7-32, apresenta a seção transversal para a análise.



Os resultados estão apresentados na Tabela 7-10.

Tabela 7-10: Exemplos comparativos, variáveis: f_{cj} , f_{ck} , intensidade de protensão, para o ponto de aplicação da carga a $2,5h$

	f_{cj} (MPa)	f_{ck} (MPa)	A_p	P_r (kN)	V_r (kN)	V_{Rd1} (kN)	l_{pbk} (mm)
Laje 01	20	40	6 ϕ 3x4,5	66,62	71,13	101,45	752
			6 ϕ 12,7	85,82	89,06	139,41	608
Laje 02	35	50	6 ϕ 3x4,5	87,68	90,80	113,98	685
			6 ϕ 12,7	115,41	116,71	153,78	496

[Fonte: próprio autor]

P_r : força limite para início da primeira fissura;

V_r : força cortante de fissuração (somando o peso próprio), na seção em análise;

V_{Rk1} : força cortante resistente característica, calculada para a zona fissurada à flexão (força cortante resistente da seção), sem nenhum coeficiente de ponderação, na seção em análise;

l_{pbk} : comprimento de ancoragem (sem nenhum coeficiente de ponderação);

Percebe-se que a força cortante de fissuração (V_r) para os casos apresentados na Tabela 7-10 é atingida ($V_r < V_{Rd1}$), validando assim o uso da recomendação da ABNT NBR 14861:2011 para a verificação do cisalhamento em região fissurada por flexão. Porém, é

necessário verificar se a fissura ocorre dentro do comprimento de ancoragem. Como comprimento necessário para a ancoragem da armadura ativa é inferior ao comprimento disponível (425 mm), todas as lajes são governadas pelo mecanismo de falha por ancoragem.

Para a Laje 01, o aumento da intensidade da protensão contribui para a redução do comprimento de ancoragem em 19,1%. Já para a Laje 02 a redução é de 27,6%. Por outro lado, o aumento da resistência à compressão, considerando o arranjo de cordoalhas com $6\phi 3 \times 4,5$ mm, resultando em uma redução no comprimento de ancoragem de 8,9%, e para o arranjo de cordoalhas com $6\phi 12,7$ mm a redução é de 18,4%.

Percebe-se que para a Laje 02, o fato de alterar a capacidade resistente a compressão do concreto, associado ao aumento da intensidade da protensão, o valor do comprimento de ancoragem aproxima-se do disponível, porém, permanece acima do limite.

Seguindo as recomendações do grupo de pesquisa laboratório NETPre-UFSCar, varia-se o ponto de aplicação da carga, na realização dos ensaios a força cortante, em 2,0h, 2,5h e 60cm, sendo, h a altura da laje. Pelos resultados analisados dos ensaios, em nenhuma situação houve a ruptura por cisalhamento. Na Norma Europeia EN1168:2008 anexo J o texto é atualizado mantendo a prerrogativa, da distância do ponto da aplicação da carga até a extremidade de 2,5h, e completa com a condição que essa distância não seja inferior a 600 mm. Para as lajes utilizadas no ensaio essa recomendação não garantiu que o mecanismo de ruptura fosse a força cortante.

Pela explanação acima, verifica-se que a resistência a compressão do concreto e a intensidade de protensão, pode governar o mecanismo de ruptura. Semelhante ao que é apresentado na Tabela 7-10, é feita a análise com as mesmas considerações, exceto, alterando o ponto de aplicação da carga de 2,5h (375 mm) para 600 mm consequentemente o comprimento de ancoragem é de 650 mm. Os resultados estão apresentados na Tabela 7-11.

Tabela 7-11: Exemplos comparativos, variáveis: f_{cj} , f_{ck} , intensidade de protensão, para o ponto de aplicação da carga a 600 mm

	f_{cj} (MPa)	f_{ck} (MPa)	A_p	P_r (kN)	V_r (kN)	V_{Rd1} (kN)	l_{pbk} (mm)
Laje 03	20	40	$6\phi 3 \times 4,5$	52,56	55,65	101,45	861
			$6\phi 12,7$	72,08	73,38	139,41	719
Laje 04	35	50	$6\phi 3 \times 4,5$	71,46	72,83	113,98	818
			$6\phi 12,7$	100,17	98,52	153,78	641
[Fonte: próprio autor]							

P_r : força limite para início da primeira fissura;

V_r : força cortante de fissuração (somando o peso próprio), na seção em análise;

V_{Rk1} : força cortante resistente característica, calculada para a zona fissurada à flexão (força cortante resistente da seção), sem nenhum coeficiente de ponderação, na seção em análise;

l_{bpk} : comprimento de ancoragem (sem nenhum coeficiente de ponderação);

Somente para a Laje 04 a fissura ocorre após o comprimento da ancoragem da armadura ativa, para a força cortante de fissuração (V_r), porém, identifica-se que o valor da cortante de fissuração está distante da capacidade resistente é de 153,78 kN. O valor máximo de carga no atuador, para que a fissura ocorra dentro do limite disponível para a ancoragem da armadura ativa é de 101,50 kN, que corresponde a um valor de 99,71 kN na seção em análise (0,5 h). Desta forma a ruptura sempre será direcionada pela falha por ancoragem, pois antes que a capacidade resistente ao cisalhamento seja alcançada, ocorrerá a ruptura por falha de ancoragem.

O estudo refere-se a laje alveolar moldada por fôrma fixa com altura de 150 mm. A protensão máxima empregada nos exemplos apresentados acima é de $6\phi 12,7$ mm. Esta força de protensão está no limite da seção, pois o aumento desta protensão poderá apresentar problema na verificação em vazio (toda protensão aplicada na laje alveolar, e somente o peso próprio atuando). Os fabricantes ao se depararem com esta situação procuram adotar uma seção transversal com altura maior, evitando assim a utilização de cordoalhas na fibra superior, que para os casos de lajes alveolares fabricadas com equipamentos existem dificuldades, pois a máquina tende a vibrar a cordoalha superior, e com isso ela perde a sua função.

7.2.7. INFLUÊNCIA DA MOVIMENTAÇÃO DO EPS

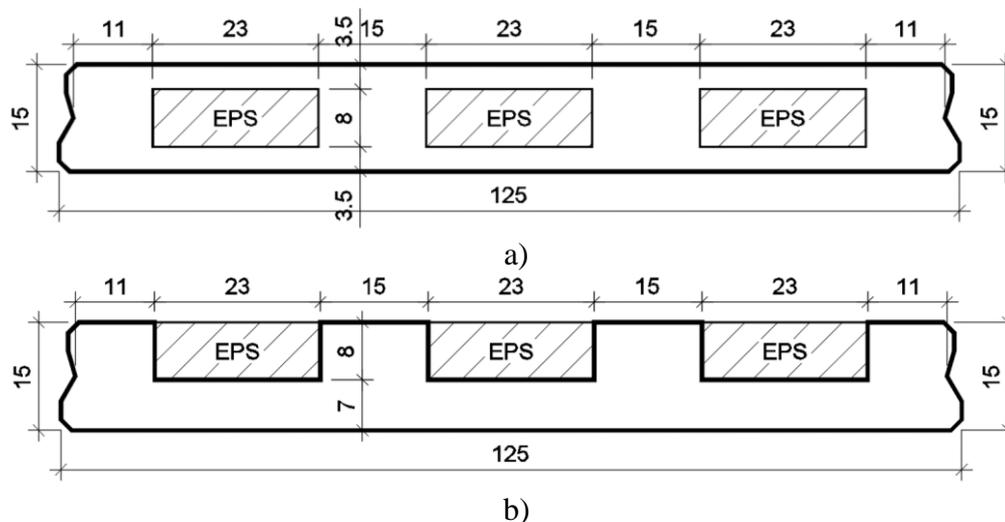
Conforme já apresentado, a movimentação do EPS durante a fase de fabricação é uma realidade neste tipo de produção de laje alveolar. Para melhor compreensão na análise dos resultados dos ensaios à flexão, são apresentados os comparativos quanto a seção resistente ao momento de fissuração (M_r) e o momento no estado limite último (M_u). A comparação é feita entre uma laje que não ocorreu a movimentação do EPS, denominada Seção 01, e a outra considerando o deslocamento do EPS para a parte superior da laje, denominada Seção 02.

Para a seção com o EPS deslocado é considerado o caso extremo, ou seja, o EPS é deslocado até o limite superior da laje. É evidente que se identificado o deslocamento do EPS

desta maneira, a laje seria descartada. Porém é possível que a camada de concreto superior ao EPS seja suficientemente espessa para não permitir que o EPS fique exposto, mas o mesmo tempo fina demais para a consideração de uma seção comprimida, para o equilíbrio da seção quando submetida à flexão.

Na Figura 7-33 são apresentadas as seções transversais da laje Seção 01 e da laje Seção 02.

Figura 7-33: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 01. b) seção transversal com o EPS todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 02



[Fonte: próprio autor]

Na Tabela 7-12 são apresentadas as principais propriedades geométricas das lajes em estudo, e indicando a variabilidade entre elas.

Tabela 7-12: Comparativos das características geométricas da laje Seção 01 e Seção 02

	Área (mm)	Inércia (m ⁴)	$\frac{I_{sec01}}{I_{sec02}}$	c.g. (mm)	Δ .c.g. (mm)	b _f (mm)	Δ b _f (mm)
Seção 01	129300	316863953	1,45	74,59	14,94	1210	690
Seção 02	129300	218817069		59,65		520	

[Fonte: próprio autor]

A movimentação do EPS não influencia a área da seção transversal, porém, há uma variação de 45% para o momento de inércia, 25% para o centro de gravidade e 132% para a mesa comprimida.

A partir das informações da Tabela 7-12 são calculados o momento de fissuração e o momento no estado limite último. Os valores e comparativos estão apresentados na Tabela

7-13. São consideradas informações adicionais, como: f_{ck} 40 MPa; cobrimento 30 mm; perda de protensão 20 %; A_p 6 ϕ 3x4,5 mm (2,772 cm²).

Tabela 7-13: Comparativos dos momentos resistentes da laje Seção 01 e Seção 02				
	$M_{r,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,k,sec01}}{M_{r,k,sec02}}$	$M_{u,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,u,sec01}}{M_{r,u,sec02}}$
Seção 01	40,71	1,34	55,44	1,06
Seção 02	30,43		52,33	
[Fonte: próprio autor]				

$M_{r,k}$: momento de fissuração característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise;

$M_{u,k}$: momento fletor último característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise.

Identifica-se nos resultados apresentados Tabela 7-13 que a variação do momento resistente último característico é de 6% entre as seções 01 e 02. Porém, para a análise quanto ao momento de fissuração característico, a variação é significativa, e chega-se a 34%. Atribui-se essa variação principalmente ao coeficiente α , que é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência a tração direta do concreto. Para a Seção 01 o parâmetro α é 1,5 (seções retangulares), e para a Seção 02, o parâmetro α é de 1,3 (seções I ou T invertido).

Essa variação geométrica que fez o momento de fissuração diminuir, pode ser a justificativa dos resultados experimentais para a Laje L05, apresentado na Tabela 7-8. O momento de fissuração teórico e experimental não se aproximaram.

Durante a movimentação da laje L05 para o descarte, ocorreu a ruptura da peça (Figura 7-34), com isso foi possível visualizar o posicionamento do EPS próximo a borda superior da laje.

Figura 7-34: Quebra da laje L05 durante a movimentação para descarte



[Fonte: próprio autor]

O que pode contribuir para que o ESP se desloque durante o processo de fabricação, é o tempo excedente do uso da régua vibratória apresentada no Capítulo 5. No meio do vão a régua vibratória não tem conflito para a passagem e se o funcionário exceder o tempo necessário para o adensamento do concreto, pode acarretar na flutuação do EPS. Já para as extremidades das lajes pelo fato de se utilizarem alças para o içamento, a vibração do concreto tende a ser menor, pois ocorre o conflito da régua vibratória com a alça de içamento, com isso, as extremidades das lajes podem ter a sua altura maior sem comparada com a altura no meio do vão.

7.2.8. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NA ALTURA DA LAJE

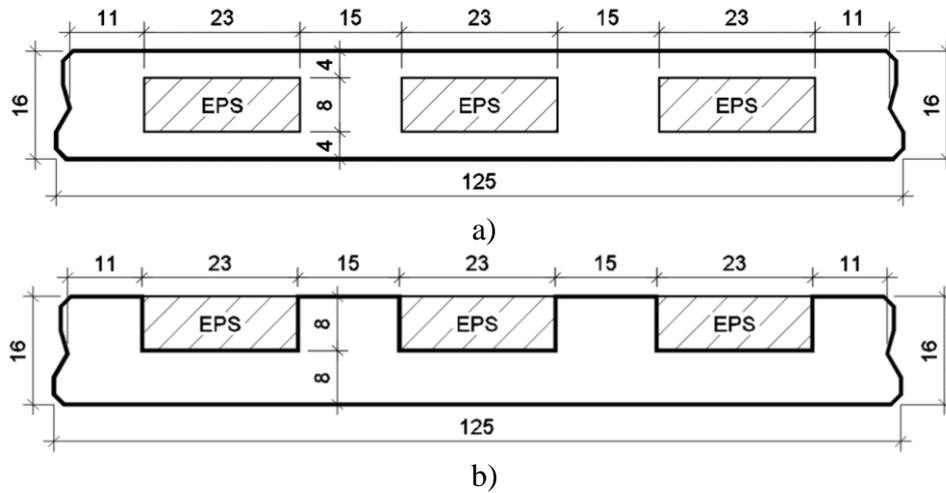
Conforme apresentado no capítulo 7.2.1, há variação entre a altura da laje definida em projeto, com a altura da laje aferida em laboratório. Para as lajes L04, L05 e L06 ensaiadas à flexão. Para análise dos resultados foram consideradas três seções transversais, sendo a primeira sendo a média entre as características geométrica das extremidades A e B, a segunda considerando as características da seção da extremidade A e por fim, a terceira considerando as características da seção da extremidade B. Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 7-8.

Identifica-se que os valores dos resultados estão próximos entre eles, nas diversas seções consideradas, porém o valor experimental quanto ao ensaio de flexão não é alcançado, chegando aproximadamente a 90% do esperado.

No item anterior é apresentado a análise relacionado ao movimento do EPS, para a parte superior da laje. A altura teórica da laje alveolar moldada por fôrma fixa para esse estudo é de 15 cm. Para o comparativo são apresentadas as mesmas informações e resultados, porém, alterando a altura da laje para 16 cm.

Na Figura 7-33 são apresentadas as seções transversais da laje Seção 03 e da laje Seção 04.

Figura 7-35: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 03. b) seção transversal com o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 04



[Fonte: próprio autor]

Na Tabela 7-14 são apresentadas as principais propriedades geométricas das lajes em estudo, e indicando a variação entre elas.

Tabela 7-14: Comparativos das características geométricas da laje Seção 01 e Seção 02

	Área (mm)	Inércia (m ⁴)	$\frac{I_{sec03}}{I_{sec04}}$	c.g. (mm)	Δ.c.g. (mm)	b _f (mm)	Δb _f (mm)
Seção 03	141600	390973254	1,47	79,62	15,60	1210	690
Seção 04	141600	266526361		64,02		520	

[Fonte: próprio autor]

A movimentação do EPS não influencia a área da seção transversal, porém, há uma variação de 47% para o momento de inércia, 24% para o centro de gravidade e 132% para a mesa comprimida.

A partir das informações da Tabela 7-14 são calculados o momento de fissuração e o momento no estado limite último. Os valores e comparativos estão apresentados na Tabela 7-15. São consideradas informações adicionais, como: f_{ck} 40 MPa; cobrimento 30 mm; perda de protensão 20 %; A_p 6 ϕ 3x4,5 mm (2,772 cm²).

Tabela 7-15: Comparativos dos momentos resistentes da laje Seção 03 e Seção 04

	$M_{r,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,k,sec03}}{M_{r,k,sec04}}$	$M_{u,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,u,sec03}}{M_{r,u,sec04}}$
Seção 03	47,22	1,34	60,32	1,05
Seção 04	35,15		57,30	

[Fonte: próprio autor]

$M_{r,k}$: momento de fissuração característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise;

$M_{u,k}$: momento fletor último característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise.

Na sequência, é feito a análise da influência da variação de 1 cm na altura da laje, partindo das Seções 01 e 02 com altura nominal de 15 cm, para as Seções 03 e 04 com altura nominal de 16 cm. Na Tabela 7-16 são apresentados os resultados referente ao comparativo das lajes da Seção 01 com a laje Seção 03. Na Tabela 7-17 são apresentados os resultados referente ao comparativo das lajes da Seção 02 com a laje Seção 04.

Tabela 7-16: Comparativos dos momentos resistentes entre as lajes Seção 01 e Seção 03				
	$M_{r,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,k,sec01}}{M_{r,ksec03}}$	$M_{u,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,u,sec01}}{M_{r,usec03}}$
Seção 01	40,71	0,86	55,44	0,92
Seção 03	47,22		60,32	
[Fonte: próprio autor]				

Tabela 7-17: Comparativos dos momentos resistentes entre as lajes Seção 02 e Seção 04				
	$M_{r,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,k,sec02}}{M_{r,ksec04}}$	$M_{u,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,u,sec02}}{M_{r,usec04}}$
Seção 02	30,43	0,87	52,33	0,91
Seção 04	35,15		57,30	
[Fonte: próprio autor]				

$M_{r,k}$: momento de fissuração característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise;

$M_{u,k}$: momento fletor último característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise.

Para as lajes analisadas como seção retangular (Seção 01 e Seção 03), com a variação de 1 cm na altura, o momento de fissuração da laje com a Seção 01 (h=15 cm), corresponde a 0,86 do momento de fissuração da laje Seção 03 (h=16 cm), já para o momento último está relação é de 0,92.

Para as lajes analisadas como seção T invertido (Seção 02 e Seção 04), com a variação de 1 cm na altura, o momento de fissuração da laje com a Seção 02 (h=15 cm), corresponde a 0,87 do momento de fissuração da laje Seção 04 (h=16 cm), já para o momento último está relação é de 0,91.

Percebe-se que com o acréscimo de 1 cm na altura da laje, a capacidade resistente à flexão pode sofrer alteração de aproximadamente 9%, o que justificaria os resultados dos ensaios à flexão que não atingiram os resultados esperados. As características das seções transversais utilizadas nos equacionamentos, podem não representar a real seção no meio do vão.

Esta variação de alteração de seção da extremidade da laje se comparado ao meio do vão, é confirmada pela prática do processo produtivo empregada pelo fabricante. Com o posicionamento de alça de içamento elas interferem com a régua vibratória, como pode ser visto na Figura 7-36. O adensamento entre a alça de içamento até a extremidade final é feita com menos intensidade e, como consequência, a extremidade da laje fica com uma altura maior.

Figura 7-36: Interferência da régua vibratória com a alça de içamento



[Fonte: Tulipa Pré-fabricados]

Outro fator que contribui para com que a extremidade da laje tenha uma altura maior, é a inclinação da régua vibratória. Fora das extremidades da laje, os operadores puxam o equipamento mantendo a perpendicularidade entre a régua, e a parte superior da laje, porém, nas extremidades a perpendicularidade não é mantida, pois os operadores levantam a barra que puxa a régua vibratória. Esta manobra faz com que o concreto das extremidades tenha uma altura maior se comparado com o meio do vão (ver Figura 7-37).

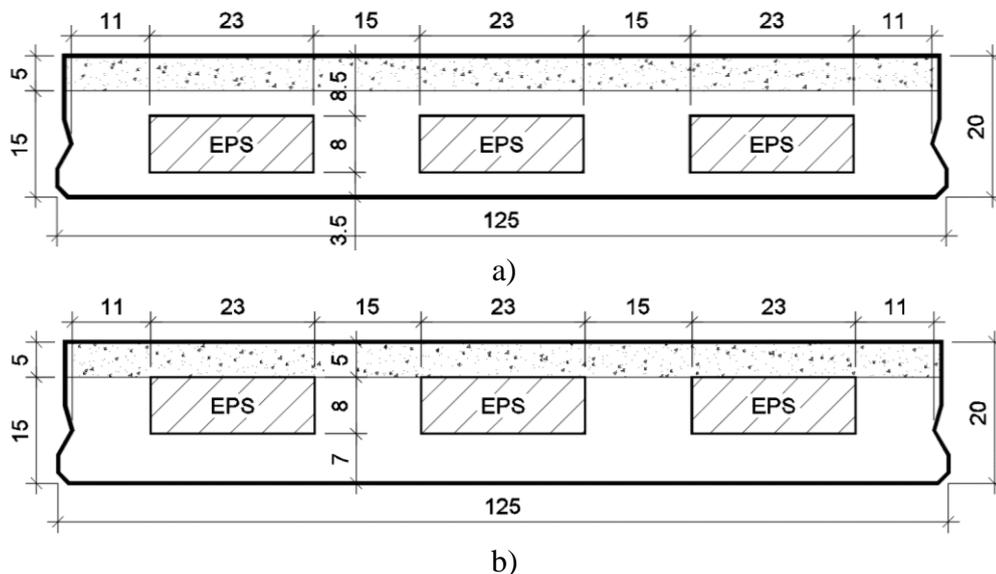
Figura 7-37: Variação da inclinação da régua vibratória com o topo da laje

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados]

7.2.9. INFLUÊNCIA DA MOVIMENTAÇÃO DO ESP COM O USO DA CAPA

Conforme apresentado no capítulo 7.2.7, a movimentação do EPS pode alterar os resultados quanto a análise do momento de fissuração e último, de maneira expressiva. Propõe-se uma análise semelhante, porém, com a utilização da capa de concreto. A capa de concreto é usualmente moldada in-loco. Para manter coerência na interpretação dos resultados, é utilizado o f_{ck} de 40 MPa para a capa (usualmente de 30 MPa).

Na Figura 7-38 são apresentadas as seções transversais da laje Seção 05 e da laje Seção 06.

Figura 7-38: a) seção transversal da laje com o EPS no eixo, Seção 05. b) seção transversal com o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, Seção 06

[Fonte: próprio autor]

Na Tabela 7-18 são apresentadas as principais propriedades geométricas das lajes em estudo, e indicando a variabilidade entre elas.

	Área (mm)	Inércia (m ⁴)	$\frac{I_{sec05}}{I_{sec06}}$	c.g. (mm)	Δ.c.g. (mm)	b _f (mm)	Δb _f (mm)
Seção 05	191025	750143075	0,95	107,00	10,11	1210	0
Seção 06	191025	786646944		96,89		1210	
[Fonte: próprio autor]							

A movimentação do EPS não influencia a área da seção transversal, porém, há uma variação redução de 5% para o momento de inércia, 10% para o centro de gravidade e a mesa comprimida permanece a mesma.

A partir das informações da Tabela 7-18 são calculados o momento de fissuração e o momento no estado limite último. Os valores e comparativos estão apresentados na Tabela 7-19. São consideradas informações adicionais, como: f_{ck} 40 MPa; cobrimento 30 mm; perda de protensão 20 %; A_p 6 ϕ 3x4,5 mm (2,772 cm²).

	$M_{r,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,k,sec05}}{M_{r,k,sec06}}$	$M_{u,k}$ (kN.m)	$\frac{M_{r,u,sec05}}{M_{r,u,sec06}}$
Seção 05	62,72	0,96	79,52	1,00
Seção 06	65,42		79,52	
[Fonte: próprio autor]				

$M_{r,k}$: momento de fissuração característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise;

$M_{u,k}$: momento fletor último característico (sem nenhum coeficiente de segurança), na seção em análise.

Com a utilização da capa de concreto moldada in-loco, a variação do momento de fissuração é de 4%. Destaca-se que para a Seção 06, cujo o estudo é considerando o ESP todo deslocado para a parte superior da laje, apresentou um melhor resultado (65,42 kN.m) enquanto para a Seção 05 (EPS na posição de projeto) o momento de fissuração é menor (62,72 kN.m). Este fato é possível, pois com o movimento do EPS para a parte superior, tem como consequência que o centro de gravidade da seção transversal desce, diminuindo, portanto, a excentricidade de protensão.

Para o estado limite último o fato de utilizar a capa de concreto não influencia nos resultados das lajes das Seção 05 e 06.

Percebe-se pela análise apresentada, que a utilização da capa de concreto moldada no local pode contribuir com objetivo de minimizar possíveis efeitos relacionados a movimentação do EPS durante a etapa da concretagem da laje alveolar moldada por fôrma fixa. A movimentação do EPS é inerente ao processo produtivo apresentado.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Completam-se neste capítulo as conclusões parciais apresentadas no texto.

8.1. CONCLUSÕES

A partir da descrição do processo produtivo da laje alveolar moldada por fôrma fixa, percebe-se que a técnica utilizada para a fabricação desta laje não é uniforme, se comparado as lajes alveolares produzidas por equipamentos. A variação engloba desde as características do concreto utilizado, até as técnicas aplicadas para a movimentação das lajes. No Capítulo 5 deste trabalho foram apresentadas todas as etapas e os comparativos do processo produtivo dos dois sistemas, das lajes alveolares e das lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, apontando as vantagens e desvantagens.

Embora presente estas dificuldades na sua execução, o processo produtivo para esse tipo de laje apresenta grande versatilidade, como: alteração da geometria transversal com a modificação do EPS, recortes já pré-definidos antes da fabricação, possibilidade de posicionamento de armaduras complementares, interrupção do EPS na extremidade da laje, possibilitando, assim, um melhor rendimento quanto ao cisalhamento e ao incêndio, por exemplo. A utilização do recurso com a extremidade maciça, pode contribuir também para eliminar possíveis variações das nervuras, devido as irregularidades do posicionamento do EPS. É possível a produção de tiras, pois as laterais são móveis, com isso, tem-se um menor impacto ambiental evitando-se desperdícios.

Os pontos negativos estão relacionados ao maior custo de produção, pois é necessário um número maior de operários, maior tempo de fabricação e, principalmente, a dificuldade de manter o EPS na posição indicada em projeto. As tolerâncias dimensionais de fabricação estabelecidas pela ABNT NBR 14861:2011 são difíceis de serem alcançadas para esse tipo de laje. Nota-se também, um aumento do consumo de concreto, pois as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa usadas no ensaio tiveram a sua altura maior do que a que foi especificada em projeto.

Através dos resultados experimentais é possível definir a resistência do concreto à compressão. A determinação da resistência a compressão a partir do módulo de elasticidade do concreto apresentou melhor convergência.

Embora efetuado o ensaio a força cortante de acordo com as recomendações normativas e experiência adquirida ao longo dos anos do laboratório de pesquisa NETPre, as lajes não foram caracterizadas por ruptura ao cisalhamento, frustrando assim a análise quanto a força cortante.

A norma brasileira para a verificação do comprimento de ancoragem, correlaciona o comprimento de transferência, comprimento de ancoragem básico, tensão de escoamento da armadura e a tensão na armadura ativa após todas as perdas (ver equação (3-30)). Não se faz qualquer menção quanto a necessidade de verificar a ancoragem dos cabos em situações onde a tensão de tração do concreto é superada, na região de transferência. O comprimento de ancoragem também independe da relação dos esforços internos (momento e cortante).

Para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa em estudo, a aplicação da ABNT NBR 14861:2011, quanto a capacidade resistente a força cortante está contra a segurança, pelo fato de não contemplar nenhuma ressalva quanto a necessidade de verificação da fissuração na região de ancoragem. O mecanismo de ruptura observado para as lajes ensaiadas é de falha da ancoragem. Atribui-se a isso principalmente a altura da laje 15 cm, $f_{cj,k}$, f_{ck} e a intensidade da protensão.

Pelos ensaios deste trabalho é possível estabelecer que nas lajes alveolares moldadas por fôrma fixa com alturas pequenas (150 mm), não é possível alcançar a falha por força cortante, pois antes que isso ocorra haverá o escorregamento da armadura ativa. Outra característica para esse tipo de laje é a possibilidade de posicionamento de armaduras complementares, que neste caso, haveria a possibilidade do posicionamento de armadura passiva visando o auxílio da ancoragem.

É importante observar que os resultados encontrados foram obtidos através do carregamento de uma carga concentrada. Esse carregamento poderia assemelhar ao tráfego de uma empilhadeira sobre a laje, por exemplo. Para um carregamento uniformemente distribuído, considerando uma laje bi-apoiada, a distribuição dos esforços internos não são os mesmos, pois o momento fletor máximo está no meio do vão, enquanto que a força cortante máxima está próxima ao apoio. Sabe-se que o mecanismo de ruptura da laje alveolar está relacionado com a

carregamento *versus* vão. Esta relação pode estabelecer qual o mecanismo de ruptura definirá a capacidade de carregamento da laje. As lajes utilizadas nesta pesquisa com o vão aproximado de 6 m e altura de 15 cm, para uma carga distribuída o limitante se daria pela flexão. Para direcionar que a condição crítica seja a força cortante, é necessária a diminuição do vão. Esta análise não está diretamente relacionada com esta pesquisa.

Quanto aos resultados dos ensaios de flexão, verificou-se que a movimentação do EPS para a parte superior da laje alveolar tem um maior impacto no momento de fissuração. Já para o momento último, a variação dos resultados não é significativa.

O uso da capa de concreto moldada in-loco mostra-se adequado para corrigir possíveis diminuições de capacidade de carga, em virtude de não conseguir produzir a laje alveolar moldada por fôrma fixa com a seção exata especificada em projeto.

A partir do estudo deste trabalho recomenda-se, que para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, seja com auxílio de EPS, tubo sacado ou mangueira com ar comprimido, o uso da capa de concreto seja obrigatório. No Brasil o uso da capa de concreto moldada no local é uma prática comum, inclusive para as lajes alveolares o que não acarretaria em um custo maior.

8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se:

- Ensaios com lajes alveolares moldadas por fôrma fixa com alturas maiores, com o intuito que a ruptura seja governada pela força cortante.
- Sugere-se uma avaliação mais aprofundada em relação ao desempenho do modelo normativo brasileiro quanto à previsão da capacidade resistente de lajes alveolares moldadas por fôrma fixa, com características de pequenas alturas (15 cm).
- Caracterizar outros processos alternativos de produção de laje alveolar, além do que já foi apresentado.
- Explorar o recurso da possibilidade de variação da geometria do EPS. Desenvolver uma série de ensaios para caracterizar os resultados desta variação.

- Compreender se o uso de EPS no formato retangular (semelhante ao deste trabalho) influencia na capacidade resistente a força cortante, de acordo com as recomendações normativas.

- As recomendações da ABNT NBR 14861:2011 são as mesmas para as lajes alveolares e as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa. A partir deste trabalho e dos demais, pode-se ampliar o texto normativo, acrescentando pontos específicos para as lajes alveolares moldadas por fôrma fixa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI Committe 318, **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary**, Farmington Hills, MI 2011.

ANTUNES, C. F. M. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas. Uma análise exploratória**. 146f. Dissertação (Mestrado em estrutural e construção civil) – Universidade Federal Goiás. Goiás. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14861: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido** – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2011.

ARAUJO, C. A. M. **Estudo de Lajes Alveolares Pré-tracionadas com Auxílio de Programa Computacional**. 128f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

ARAUJO, C. A. M. **Contribuições para projeto de lajes alveolares protendidas**. 222f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.

ASSOCIATION OF MANUFACTURES OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS (ASSAP). **The hollow core floor design and applications**. 1. ed. Belfiore, Verona, Italy. 2002.

BASTOS, P. S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Apostila da disciplina Estruturas de Concreto II do curso de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista. Campus de Bauru, 2015. 79 págs.

CARVALHO¹, R. C; FILHO. J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. Segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. São Carlos. EDUFSCAR, 2014. 415 págs.

CARVALHO², R. C. **Estruturas em concreto protendido. Pré-tração – Pós-tração – Cálculo e detalhamento**. 1.ed. São Paulo. Pini, 2012. 431 págs.

- CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurado por flexão**. 2011. 352p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- COLLINS, M. P; MITCHELL, D. **Prestressed concrete structures**. Response Publications, Canadá. 1997.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION – CEN. **EN 1168:2005 – Precast concrete products – Hollow core slabs**. (English version). Brusseis: CEN, 2008.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION – CEN. **EN 1992-1-1:2004 – Projeto de estruturas de betão**. Eurocode 2. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CEN, 2004.
- COSTA, O. O. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. 155f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.
- CSA CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **A23.3: Design of Concrete Structures**. CSA, Mississauga, Ontario, 2004.
- DUARTE, D. S. **Estudo comparativo entre os dois métodos propostos pela ABNT NBR 6118:2007 para o dimensionamento da armadura de cisalhamento em vigas sujeitas a flexão simples**. 85f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. 2005.
- DUMÊT, T. B. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. 490f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos. 2003.
- FERNANDES, N. S. **Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas de concreto protendido: Ensaio de apoio padrão para o controle de qualidade**. 127f. Dissertação (Mestre em Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos. 2007.
- FRANÇA, A. A, V. **Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento**. 125f. Dissertação (Mestrado em engenharia de construção civil) – Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2012.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. Editora Pini. São Paulo. Novembro, 1995.

INFORSATO, T. B. **Considerações sobre o projeto, cálculo e detalhamento de vigas pré-fabricadas protendidas com aderência inicial em pavimentos de edificações**. 234f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

INFORSATO, T. B. CARVALHO, R, C. FERREIRA, M. A. **Laje alveolar produzida com fôrma fixa – Ganho com a utilização de armadura de cisalhamento**. 10º Congresso Brasileiro de Pontes e Estrutura. X CBPE. Rio de Janeiro. 2018.

FABCON. **Fabcon Precast**. Vídeos no site: <http://www.fabcon-usa.com/>.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LÁ PRÉCONTRAÎTE – FIP. **Guide to good practice: Shear at the Interface of precast and In-situ Concrete**. Wrexham Springs. 1982.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LÁ PRÉCONTRAÎTE – FIP. **Guide to good practice: Quality assurance of hollow core slab**. London, England. 1992.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON – FIP (CEB-FIB). **Desing of Precast Prestressed Hollow Core Floors**. Draf 19 March. Bulleïn XX. Document prepared by task Group 6.1. Belgium. 2016.

LEONHARDT, F. MÖNNIG, E. **Construções de Concreto – Princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. Volume 5. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 1983.

MACIEL¹, A. M. **Influência da variação geométrica dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**. 137f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

MACIEL², A. M. **Avanços dos estudos da capacidade resistente à força cortante em lajes alveolares protendidas**. Revista Interação – Revista de ensino, pesquisa e extensão. Unis grupo educacional. Volume 18 n° 18. Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha – MG, 2017.

MARQUESI, M. L. G. **Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas**. 2014. 144f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2014.

MELLER, B. J. **Análise dos modelos de cálculo propostos pela ABNT 6118:2014 para o dimensionamento de estribos em vigas de concreto armado.** 2016. 18f. Artigo submetido ao curso de Engenharia Civil da UNESC como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. 2016.

MELO, C.E.E. **Manual Munte de Projetos Pré-Fabricados de Concreto.** 534f. 2ª Edição. São Paulo: Editora Pini. Agosto. 2007.

MERCADO LIVRE. Disponíveis no site: <http://www.mercadolivre.com.br/>.

MOLD – **Mold Estruturas.** Aparecida de Goiânia – GO. 2018

NAWY, E. G. P.E. **Prestressed concrete.** A Fundamental Approach – Second edition. Editora: Prentice Hall – New Jersyl. 1996.

NETPre. **Núcleo de estudo e tecnologia em pré-moldados de concreto.** Laboratório de pesquisa. Universidade Federal de São Carlos. 2012 a 2014.

PAJARI, M. **Design of prestressed hollow core slabs.** 657f. Technical Research Center of Finland, Espoo, Finland. Rep. 1989.

PETRUCELLI, N. S. **Considerações sobre o projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas.** 126f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos de Edificações) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

PINHEIRO, G. L. **Estudo da influência do preenchimento de alvéolos em lajes alveolares submetidas à força cortante.** 114f. Dissertação (Mestrado em construção civil e estruturas) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2014.

PRETEC – **Tecnologia em préfabricado.** www.pretec.com.br

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI. Manual for the design of hollow core slabs.** 7.ed. Chicaga, IL, U.S.A., 2010.

RETTNE, L.; EDEKLING, K. **Improved design method for web shear tension failure in hollow core unites.** 153f. Master's Thesis – Departement of Civil na Environmental Engineering, Division of Strctural Engineerind. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 2006.

-
- SIRTOLI, A. S. C. **Industrialização da construção civil, sistemas pré-fabricados de concreto e suas aplicações**. 2015. 75f. Trabalho de conclusão de curso. (Graduação em engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, São Carlos, 2015.
- TATU. **Tatu Premoldados**. Catálogos técnicos disponíveis no site: <http://www.tatu.com.br/>.
- TULIPA – **Tulipa Pré-fabricados**. Holambra – SP, 2018
- VASCONCELOS, A. C. **Manual prático para a correta utilização dos aços no concreto protendido em obediência as normas atualizadas**. Livros técnicos e científicos editoria S. A. Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira. Belo Horizonte, 1980.
- SANTOS, A. P. **Análise da continuidade em lajes alveolares: estudo teórico e experimental**. 2014. 370p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- VAN ACKER, Arnold. **II Workshop em Concreto Pré-fabricado**. Palestra no NETPre – Núcleo de Estudos e Tecnologia do Concreto Pré-fabricado. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. São Carlos, NETPre, 2007.
- PAJARI, M.; YANG, L. **Shear capacity of hollow core slabs on flexible supports**. VTT Technical Research Centre of Finland. Research Notes 1587, 1994.

ANEXO A – CONTROLE DE CORPO DE PROVA

São apresentadas na Figura 8-1 e Figura 8-2 as informações fornecidas pelo fabricante quanto as características do concreto.

Figura 8-1: Controle do corpo de prova

TULIPA		PROCEDIMENTO OPERACIONAL – QUALIDADE					
ANEXO-162.01 – FORMULÁRIO CONTROLE DE CORPO DE PROVA							
MOLDAGEM							
ID Amostra:	Data de moldagem:	F _{ck} (MPa):	Slump (cm):				
PM 1307	30/03/2017	40	160 ± 30				
Tempo:	Tipo cimento:	Maneja cimento:	Consumo cimento (kg):				
6h	CPV-Ari	Valecom	1670				
Obra:	Tipo de peça:						
UFSCAR	LA-01						
MATERIAL	FORNECEDOR		QUANTIDADE				
Areia 1	Carbal		239	kg			
Areia 2	Caju		185	kg			
Brita 0	Basalto		90	kg			
Brita 1	Basalto		490	kg			
Brita 2				kg			
Aditivo 1	MCTKF-530		1670	kg			
Aditivo 2				kg			
Água	Tulipa		74	L			
Umidade da areia 1:	4 %	Umidade da areia 2:	4 %	Nº de CPs: 06			
Responsável pela moldagem:	Valdivia		Assinatura:				
PROGRAMAÇÃO E RESULTADO DE ROMPIMENTO							
Altura (mm)	Tempo de moldagem	Romper em:		Romper em:		Romper em:	
		3d	7d	3d	7d	14d	28d
		103	117	104	117	1	1
		Ciclo dias: 26,00 horas		Ciclo dias: 4 dias		Ciclo dias:	
		Tensão		Tensão		Tensão	
		Class. Ruptura	kgf	MPa	Class. Ruptura	kgf	MPa
170	14:20	E	11.2	14.0	E	22.6	28.2
		E	11.4	14.2	E	23.0	28.7
					E	25.2	31.5
					E	25.6	32.0
Temperatura de moldagem:		30 °C		Temperatura de rompimento:		25 °C	
Rompiemento em laboratório externo?		<input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não		Laboratório:			
Observações:							
Responsável pelo rompimento:		Valdivia		Assinatura:			

[Fonte: Tulipa Pré-fabricados (2017)]

$y_{cg} = 7,46$ cm – distância do centro de gravidade a borda inferior.

1.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO

$f_{cj} = 20$ MPa – resistência do concreto à compressão na data da efetivação da protensão.

$f_{ck} = 40$ MPa – resistência do concreto à compressão na data do ensaio.

Foram considerados nos cálculos os valores médios de resistências determinados por ensaios de caracterização de corpos de prova.

1.3 DADOS RELATIVOS AO AÇO DE PROTENSÃO

Aço categoria CP190RB.

$E_p = 200$ kN/mm² – módulo de elasticidade do aço.

Cordoalha 3x4,5mm com área de 0,462 cm² e diâmetro nominal de 0,96 cm.

$A_p = 2,772$ cm² - área total da armadura de protensão (seis cordoalhas).

$\sigma_{pi} = 1453$ MPa – tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas (valor abaixo do máximo permitido pela ABNT NBR 6118:2014 – item 9.6.1.2.1).

Para aços da classe RB (baixa relaxação), a tensão na saída do aparelho deve atender aos limites:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,85 \cdot f_{pyk} \end{cases}$$

$f_{ptk} = 1900$ MPa (resistência característica da armadura ativa à tração).

$f_{pyk} = 1710$ MPa (resistência característica de escoamento da armadura ativa).

Para este caso a tensão limite de protensão é definida pela tensão de escoamento $\sigma_{pi} \leq 0,85 \cdot 1710 = 1453$ MPa = 145,30 kN/cm².

A partir das informações colhidas em fábrica, determina-se a real tensão aplicada para as lajes ensaiadas.

Comprimento da pista de protensão $L = 37,97$ m.

Os comprimentos iniciais e finais das cordoalhas estão apresentados na Tabela 8-1, a partir do alongamento médio das cordoalhas determina-se a tensão de protensão real utilizada na fábrica.

Tabela 8-1: Alongamento no ato da protensão.			
Posição cordoalha	Alongamento inicial (cm)	Alongamento final (cm)	Δ_l (cm)
1	35,3	63,0	27,7
2	36,0	70,0	34,0
3	35,1	65,0	29,9
4	35,5	64,0	28,5
5	35,0	63,0	28,0
6	34,9	63,5	28,6
		Média	29,45
[Fonte: próprio autor]			

A variação do comprimento da cordoalha é dada por:

$$\Delta_l = \left(\frac{F_{pi}}{E_p \cdot A_p} \right) \cdot L_{pista}$$

A força normal de protensão é dada por:

$$F_{pi} = \frac{\Delta_l \cdot E_p \cdot A_p}{L_{pista}} = \frac{0,2945 \cdot 200 \cdot 0,462}{37,94} = 71,67 \text{ kN}$$

Com isso determina-se a tensão de protensão inicial (σ_{pi}) utilizada em fábrica:

$$\sigma_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_p} = \frac{71,67}{0,462} = 155,13 \text{ kN/cm}^2$$

Observa-se que a tensão inicial nas cordoalhas excedeu o limite máximo permitido de 145,30 kN/cm².

1.4 DADOS COMPLEMENTARES

Temperatura média de 20°C.

t = 69 dias – idade do concreto quando executado o ensaio.

U_r = 70% – umidade relativa do ambiente.

Cimento CP V-ARI.

Abatimento do concreto 15cm.

Agregado – basalto $\alpha_E = 1,2$.

.

APÊNDICE B – COEFICIENTE DE FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

O cálculo do coeficiente de fluência e deformação do concreto por retração apresentados neste trabalho são determinados através de uma planilha programada no Excel (Figura 8-4), este programa tem como referência a dissertação de INFORSATO (2006), porém atualizado de acordo com a ABNT NBR 6118:2014. Abaixo é apresentado os cálculos dos coeficientes de fluência e retração, para a seção de projeto com a idade (t_0) de 1 dia e a idade (t) de 69 dias (período entre a produção da laje e a realização dos ensaios). As entradas no programa são apresentadas na figura abaixo.

Figura 8-4: Tela do programa de cálculo dos coeficientes de fluência e retração.

Dados	
Area da seção de concreto A_c	1293 cm ²
Perímetro da seção em contato com o ar (U_{ar})	462 cm
Ambiente e material	
Umidade relativa do ar (U)	70 %
Temperatura média (T)	20 graus C
Abatimento do concreto (slump)	15 cm
Tipo do cimento utilizado	3 1 CP III e IV 2 CPI e II 3 CPV-ARI
Idade do concreto	
no início do período considerado (t_0)	1
no final do período considerado (t)	69
Resultados	
Coeficiente de fluência $\Phi_{(t,t_0)}$	3,533
Retração do concreto $\epsilon_{cs(t,t_0)}$	-4,38E-04

[Fonte: próprio autor]

B.1 – Deformação por retração do concreto

O valor de ϵ_{1s} tem como referência a umidade relativa do ar (U) entre 40 e 90% e o abatimento entre 5 e 9cm. Para $U \leq 90\%$ e abatimento entre 0 e 4 cm são 25% menores e para abatimento entre 10 cm e 15 cm são 25% maiores.

$$\epsilon_{1s} = \left(-8,09 + \frac{U}{15} - \frac{U^2}{2284} + \frac{U^3}{133765} - \frac{U^4}{7608150} \right) \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_{1s} = \left(-8,09 + \frac{70}{15} - \frac{70^2}{2284} + \frac{70^3}{133765} - \frac{70^4}{7608150} \right) \cdot 10^{-4} = -6,16 \times 10^{-4}$$

Considerando abatimento de 15cm, tem-se:

$$\varepsilon_{1s} = 1,25 \cdot (-6,16 \cdot 10^{-4}) = -7,70 \times 10^{-4}$$

$$\text{Para } U \leq 90\% \rightarrow \gamma = 1 + e^{(-7,8+0,1 \cdot U)} = 1 + e^{(-7,8+0,1 \cdot 70)} = 1,45.$$

Define-se espessura fictícia como o seguinte valor:

$$h_{fic} = \gamma \cdot \frac{2 \cdot A_c}{u_{ar}} = 1,45 \cdot \frac{2 \cdot 1293}{462} = 8,11 \text{ cm} = 0,0811 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33+2 \cdot h_{fic}}{20,8+3 \cdot h_{fic}} = \frac{33+2 \cdot 8,11}{20,8+3 \cdot 8,11} = 1,09$$

$$\varepsilon_{CS\infty} = \varepsilon_{1s} \cdot \varepsilon_{2s} = -7,70 \cdot 10^{-4} \cdot 1,09 = -8,40 \times 10^{-4}$$

Com $h = h_{fic} = 0,0811 \text{ m}$.

$$A = 40$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8 = 11,25$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7 = 39,99$$

$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8 = 37,25$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8 = 1,52$$

A idade fictícia depende do tipo de cimento, com o cimento CP V-ARI para a verificação de retração $\alpha=1$ (tabela A.2 – ABNT NBR 6118:2014).

$$t_{0, fic} = t_{1, fic} = \alpha \cdot \frac{T+10}{30} \cdot t_0 = 1 \cdot \frac{20+10}{30} \cdot 1 = 1 \text{ dia}$$

$$t_{f, fic} = t_{69, fic} = \alpha \cdot \frac{T+10}{30} \cdot t_f = 1 \cdot \frac{20+10}{30} \cdot 69 = 69 \text{ dias}$$

Sendo:

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A \cdot \left(\frac{t}{100}\right)^2 + B \cdot \left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C \cdot \left(\frac{t}{100}\right)^2 + D \cdot \left(\frac{t}{100}\right) + E}, \text{ tem-se:}$$

$$\beta_s(t_{0, fic}) = \frac{\left(\frac{1}{100}\right)^3 + 40 \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^2 + 11,25 \cdot \left(\frac{1}{100}\right)}{\left(\frac{1}{100}\right)^3 + 39,99 \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^2 + 37,25 \cdot \left(\frac{1}{100}\right) + 1,52} = 0,0615$$

$$\beta_s(t_{f, fic}) = \frac{\left(\frac{69}{100}\right)^3 + 40 \cdot \left(\frac{69}{100}\right)^2 + 11,25 \cdot \left(\frac{69}{100}\right)}{\left(\frac{69}{100}\right)^3 + 39,99 \cdot \left(\frac{69}{100}\right)^2 + 37,25 \cdot \left(\frac{69}{100}\right) + 1,52} = 0,5825$$

A deformação do concreto por retração é dada pela expressão abaixo:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

$$\varepsilon_{cs(69,1)} = -8,40 \cdot 10^{-4} \cdot [0,5825 - 0,0615] = -4,38 \times 10^{-4}$$

B.2 – Coeficiente de fluência

A idade fictícia depende do tipo de cimento, com o cimento CPV-ARI para a verificação de fluência $\alpha=3$ (tabela A.2 – ABNT NBR 6118:2014).

$$t_{0,fic} = t_{1,fic} = \alpha \cdot \frac{T+10}{30} \cdot t_0 = 3 \cdot \frac{20+10}{30} \cdot 1 = 3 \text{ dias}$$

$$t_{f,fic} = t_{69,fic} = \alpha \cdot \frac{T+10}{30} \cdot t_f = 3 \cdot \frac{20+10}{30} \cdot 69 = 207 \text{ dias}$$

O coeficiente φ_a é função da resistência do concreto no tempo infinito e do tempo t_0 . Quando a verificação se faz na data t_0 dias tem-se:

$$\beta_1 = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t_0}\right)^{1/2}\right]\right\} = \exp\left\{0,20 \left[1 - \left(\frac{28}{1}\right)^{1/2}\right]\right\} = 0,4293, \text{ com:}$$

$s = 0,38$ para concreto de cimento CP III e IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CP I e II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CP V-ARI.

Se considerar o valor de $t = \infty$ o valor t/∞ tenderá a zero e, portanto a expressão anterior fica:

$$\beta_1 = \exp\{s[1 - (0)^{1/2}]\} = \exp\{s\}, \text{ o que resulta em:}$$

$$\text{CP III e IV com } s = 0,38 \rightarrow \beta_1 = \exp\{0,38\} = 1,4623$$

$$\text{CP I e II com } s = 0,25 \rightarrow \beta_1 = \exp\{0,25\} = 1,2840$$

$$\text{CP V-ARI com } s = 0,20 \rightarrow \beta_1 = \exp\{0,20\} = 1,2214$$

Com isso:

$$\varphi_a = 0,8 \cdot \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)}\right] = 0,8 \cdot \left[1 - \frac{0,4269}{1,2214}\right] = 0,5224$$

O valor de φ_{1s} para $U \leq 90\%$ e abatimento entre 0 e 4 cm são 25% menores e para abatimento entre 10 cm e 15 cm são 25% maiores.

$$\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035 \cdot U$$

$$\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035 \cdot 70 = 2,00$$

Considerando abatimento de 15cm, tem-se:

$$\varphi_{1c} = 1,25 \cdot 2,00 = 2,50$$

$$\varphi_{2c} = \frac{42+h_{fic}}{20+h_{fic}} = \frac{42+8,11}{20+8,11} = 1,7826$$

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c} = 2,50 \cdot 1,7826 = 4,4565$$

$$\varphi_{d\infty} = 0,4$$

$$\beta_d = \frac{t-t_0+20}{t-t_0+70} = \frac{207-3+20}{207-3+70} = 0,8175$$

Com $h = h_{fic} = 0,0811m$.

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113 = 158,42$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23 = 219,63$$

$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183 = 271,40$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 1931 = 4592,19$$

Sendo:

$$\beta_f(t) = \frac{t^2+A \cdot t+B}{t^2+C \cdot t+D}, \text{ tem-se:}$$

$$\beta_f(t_{0,fic}) = \frac{3^2+158,42 \cdot 3+219,63}{3^2+271,4 \cdot 3+4592,19} = 0,1300$$

$$\beta_f(t_{f,fic}) = \frac{207^2+158,42 \cdot 207+219,63}{207^2+271,4 \cdot 207+4592,19} = 0,7321$$

O coeficiente de fluência do concreto é dado pela expressão abaixo:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} \cdot [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \cdot \beta_d$$

$$\varphi_{(69,1)} = 0,5224 + 4,4565 \cdot [0,7321 - 0,1300] + 0,4 \cdot 0,8175 = 3,533$$

APÊNDICE C – PERDAS DE PROTENSÃO

De acordo com o roteiro apresentado em INFORSATO (2009) é apresentado o cálculo das perdas iniciais e diferidas para a seção transversal de projeto juntamente com as informações coletadas junto a fábrica. O período entre a produção das lajes e a realização dos ensaios foram de 69 dias.

C.1 – Perdas iniciais

$$t = 1 \text{ dia}, t_0 = 0$$

$$\sigma_{pi} = 155,13 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{g1} = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{0,1293 \cdot 25 \cdot 5,70^2}{8} = 13,13 \text{ kN/cm}^2$$

✓ **Deformação por ancoragem**

Com uma pista de pista de protensão com o comprimento $l=37,97\text{m}$ e uma acomodação da cunha Δl de $0,6 \text{ cm}$ tem-se:

$$\Delta l = \frac{\Delta \sigma_{ancor} \cdot l}{E_p}$$

$$\Delta \sigma_{ancor} = \frac{0,006 \cdot 2 \cdot 10^4}{37,97} = 3,16 \text{ kN/cm}^2$$

✓ **Relaxação da armadura**

Para o cálculo da perda por relaxação da armadura deve-se descontar a perda ocorrida pela ancoragem da armadura.

$$\sigma_{pi} = 155,13 - 3,16 = 151,97 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Psi(t, t_0) = \frac{\Delta \sigma_{pr}}{\Delta \sigma_{pi}}$$

$$\Psi(t, t_0) = \Psi_{1000} \cdot \left(\frac{t-t_0}{41,67} \right)^{0,15}$$

$$R = \frac{151,97}{190} = 0,80$$

Para cordoalha de baixa relaxação e com 80% da resistência a tração, na tabela 8.4 da norma ABNT NBR 6118:2014 calcula-se através de interpolação o valor para $\Psi_{1000} = 3,50$ em porcentagem.

$$\Psi(1,0) = \Psi_{1000} \cdot \left(\frac{t-t_0}{41,67}\right)^{0,15} = 3,50 \cdot \left(\frac{1-0}{41,67}\right)^{0,15} = 2,000$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \frac{2,000}{100} \cdot 151,97 = 3,04 \text{ kN/cm}^2$$

✓ Perda por deformação imediata do concreto

Como se tem o sistema de pré-tração com aderência inicial, isso implica que a tensão que atua na deformação imediata do concreto nesta fase é o valor inicial (σ_p) descontadas as duas perdas calculadas anteriormente, pois no momento dos cortes dos cabos (ou desprotensão da pista) é que efetivamente a tensão das cordoalhas é transferida para a peça. Neste momento os únicos carregamentos atuantes são a protensão e o peso próprio.

$$A_p = 6 \cdot 0,462 = 2,772 \text{ cm}^2$$

$$e_p = 7,46 - 3,0 = 4,46 \text{ cm}$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_p - (\Delta\sigma_{ancor} + \Delta\sigma_{pr}) = 155,13 - (3,16 + 3,04) = 148,93 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta\sigma_{cg} = \alpha_p \cdot \sigma_{c,p0+g1}$$

Considerando-se:

$$N_p = A_p \cdot \sigma_{pi} = 2,772 \cdot 148,93 = 412,83 \text{ kN}$$

$$M_p = A_p \cdot \sigma_{pi} \cdot e_p = 2,772 \cdot 148,93 \cdot 0,0446 = 18,41 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{c,p0+g1} = \frac{N_p}{A} + \left(\frac{M_p - M_{g1}}{I}\right) \cdot e_p$$

$$\sigma_{c,p0+g1} = \frac{412,83}{0,1293} + \left(\frac{18,41 - 13,13}{3 \cdot 10^{-4}}\right) \cdot 0,0446 = 3977,76 \text{ kN/m}^2$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{ci}} = \frac{200000}{30053} = 6,65$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{cj}} = 1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{20} = 30053 \text{ MPa}$$

$$\alpha_E = 1,2 \rightarrow \text{basalto}$$

$$\Delta\sigma_{cg} = \alpha_p \cdot \sigma_{c,p0+g1} = 6,65 \cdot 0,397 = 2,65 \text{ kN/cm}^2$$

Então, a tensão final considerando as perdas da primeira fase é:

$$\sigma_{p,1 \text{ dia}} = \sigma_p - \Delta\sigma_{ancor} - \Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{cg}$$

$$\sigma_{p,1 \text{ dia}} = 155,13 - 3,16 - 3,04 - 2,65 = 146,28 \text{ kN/cm}^2$$

Até esse instante a perda calcula é de 5,70%.

C.2 – Perdas diferidas

Para se determinar os coeficientes de fluência e retração é utilizada uma planilha feita pelo autor, no programa Excel. No APÊNDICE B deste trabalho estão inseridas as etapas de cálculo detalhadas passo a passo que foram consideradas.

Para a seção transversal da laje alveolar moldada por fôrma fixa o coeficiente de fluência é determinado com os seguintes dados: área de concreto $A_c = 1293 \text{ cm}^2$, perímetro da seção em contato com o ar (U_{ar}) = 462 cm (todo o perímetro externo e interno, pois o EPS e poroso e não evita a perda de água), umidade relativa do ar em 70%, temperatura média 20°C, abatimento do concreto (slump) 15 cm e cimento tipo CP V-ARI.

O valor calculado para o coeficiente de fluência e retração tendo como t_0 o instante do carregamento e t o dia da realização dos ensaios é de $\varphi_{(t,t_0)} 3,533$ e $\epsilon_{cs(t,t_0)} -4,38 \times 10^{-4}$, respectivamente. As datas consideradas para o tempo t_0 é de 1 dia e para o tempo t de 69 dias.

✓ Perda por fluência

A perda por fluência é calculada segundo a recomendação de NAWY (1996), considerando os carregamentos com suas respectivas datas de atuação (data real de carregamento).

$$\Delta\sigma_{p,c} = \alpha_p \cdot \varphi_{(t,t_0)} \cdot \sigma_{c,p0+g1}$$

Onde:

$$\Delta\sigma_{p,c} = \alpha_p \cdot \varphi_{(69,1)} \cdot \left[\frac{N_p}{A} + \left(\frac{M_p - M_{g1}}{I} \right) \cdot e_p \right]$$

Considerando-se:

$$N_p = A_p \cdot \sigma_{pi} = 2,772 \cdot 146,28 = 405,50 \text{ kN}$$

$$M_p = A_p \cdot \sigma_{pi} \cdot e_p = 2,772 \cdot 146,28 \cdot 0,0446 = 18,09 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{c,p0+g1} = \frac{N_p}{A} + \left(\frac{M_p - M_{g1}}{I} \right) \cdot e_p$$

$$\sigma_{c,p0+g1} = \frac{405,50}{0,1293} + \left(\frac{18,09 - 13,13}{3 \cdot 10^{-4}} \right) \cdot 0,0446 = 3873,50 \text{ kN/m}^2$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{ci}} = \frac{200000}{42501} = 4,71$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{cj}} = 1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{40} = 42501 \text{ MPa}$$

$$\alpha_E = 1,2 \rightarrow \text{basalto}$$

$$\Delta\sigma_{p,c} = \alpha_p \cdot \varphi_{(69,1)} \cdot \left[\frac{N_p}{A} + \left(\frac{M_p - M_{g1}}{I} \right) \cdot e_p \right] = 4,71 \cdot 3,533 \cdot 0,388 =$$

$$6,44 \text{ kN/cm}^2$$

✓ Perda por retração do concreto

O coeficiente de retração é determinado com os seguintes dados: área de concreto $A_c = 1293 \text{ cm}^2$, perímetro da seção em contato com o ar (U_{ar}) = 462 cm, umidade relativa do ar em 70%, temperatura média 20°C, abatimento do concreto (slump) 15 cm e cimento tipo CP V-ARI, $t_0 = 1$ e $t = 69$ dias.

$$\varepsilon_{(69,1)} = -4,38 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\sigma_{p,s} = \varepsilon_{(t,t_0)} \cdot E_p = -4,38 \times 10^{-4} \cdot 2,0 \times 10^4 = -8,76 \text{ kN/cm}^2$$

✓ Relaxação da armadura

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{p0} \cdot \chi(t, t_0)$$

$$\chi(t, t_0) = -\ln[1 - \psi(t, t_0)]$$

$$\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \cdot \left(\frac{t-t_0}{41,67} \right)^{0,15}$$

$$R = \frac{146,28}{190} = 0,77$$

Para cordoalha de baixa relaxação e com 77% da resistência a tração, na tabela 8.4 da norma ABNT NBR 6118:2014 determina-se através de interpolação o valor para $\psi_{1000} = 3,20$ em porcentagem.

$$\psi_{(69,1)} = \psi_{1000} \cdot \left(\frac{t-t_0}{41,67}\right)^{0,15} = 3,20 \cdot \left(\frac{69-1}{41,67}\right)^{0,15} = 3,44$$

$$\chi_{(69,1)} = -\ln[1 - \psi(t, t_0)] = -\ln\left[1 - \frac{3,44}{100}\right] = 3,50 \times 10^{-2}$$

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{p0} \cdot \chi(t, t_0) = 146,28 \cdot 3,50 \times 10^{-2} = 5,13 \text{ kN/cm}^2$$

✓ Simultaneidades das perdas

A equação para o cálculo das perdas é dada pela expressão abaixo. A parcela referente o numerador já foi calculado nas etapas anteriores, restando agora o cálculo do denominador.

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p - \alpha_p \cdot \sigma_{c, p0} + g_1 \cdot \varphi(t, t_0) - \sigma_{p0} \cdot \chi(t, t_0)}{\chi_p + \chi_c \cdot \alpha_p \cdot \eta \cdot \rho_p}$$

$$\chi_p = 1 + \chi(t, t_0) = 1 + \chi_{(69,1)} = 1 + 3,50 \cdot 10^{-2} = 1,04$$

$$\chi_c = 1 + 0,5 \cdot \varphi(t, t_0) = 1 + 0,5 \cdot \varphi_{(69,1)} = 1 + 0,5 \cdot 3,533 = 2,77$$

$$\eta = 1 + e_p^2 \cdot \frac{A_c}{I_c} = 1 + 0,0446^2 \cdot \frac{0,1293}{3,0 \cdot 10^{-4}} = 1,86$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} = \frac{2,772}{1293} = 2,14 \times 10^{-3}$$

Com isso tem-se:

$$\Delta\sigma_{p(69,1)} = \frac{-8,76 - 6,44 - 5,13}{1,04 + 2,77 \cdot 4,71 \cdot 1,86 \cdot 2,14 \times 10^{-3}} = 18,71 \text{ kN/cm}^2$$

Então chega-se a tensão final nos cabos consideradas todas as perdas.

$$\sigma_{p(69,1)} = \sigma_p - \Delta\sigma_p = 146,28 - 18,71 = 127,57 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto chega-se a uma perda diferida de 12,79% e uma perda de protensão total (perda inicial mais diferidas) de 18,49%.

APÊNDICE D – FLEXÃO EM LAJE ALVEOLARES

É apresentado o exemplo numérico para a análise da flexão. Será considerado a seção do meio do vão. As características geométricas do tipo de laje a ser dimensionada se encontra no Apêndice A, item (1.1).

1. LAJE ALVEOLAR COM FÔRMA FIXA

Este exemplo numérico considera flexão em laje sem capa e a seção do meio do vão. Será determinado o momento de fissuração e o momento resistente da seção transversal.

1.1 MOMENTO DE FISSURAÇÃO

A tensão na borda tracionada é dada por:

$$\sigma_i = \frac{N_p}{A} + \frac{M_p \cdot y_t}{I} - \frac{M_r \cdot y_t}{w_i}$$

Igualando ao valor da tensão de tração que provoca a primeira fissura, tem-se:

$$-\alpha \cdot f_{ctk,inf} = \frac{N_p}{A} + \frac{M_p \cdot y_t}{I} - \frac{M_r \cdot y_t}{w_i}$$

Isolando o valor do momento de fissuração (M_r) e considerando a homogeneização da seção, chega-se a:

$$M_r = \left(\alpha \cdot f_{ctk,inf} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \cdot \frac{I_{hom}}{y_{cg,hom}} + N_p \cdot e_p$$

N_p : Força normal de protensão da seção considerada (Perdas 18,49%).

$$N_p = \sigma_{p(-18,49\%)} \cdot A_p = 1,26 \cdot 1,453 \cdot 277,20 = 350,44 \text{ kN}$$

e_p = excentricidade da armadura protendida

$$e_p = y_{cg} - d' = 74,60 - 30 = 44,60 \text{ mm}$$

α : 1,2 para as seções em forma de “T” ou duplo “T”, 1,3 para seções “I” ou “T” invertido e 1,5 para as seções retangulares (ABNT NBR 6118:2014 – item 17.3.1).

Neste caso : $\alpha = 1,5$.

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

$$f_{ctk,inf} = 0,21 \cdot f_{ck}^{2/3} \rightarrow f_{ctm} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} = 2,456 \text{ MPa} = 2,456 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

E_{cs} : módulo de deformação secante.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,9 \cdot 42,50 = 38,25 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \rightarrow \alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{40}{80} = 0,90$$

E_{ci} : módulo de elasticidade inicial ($\alpha_E = 1,2$ para basalto).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{40} = 42501 \text{ MPa} = 42,50 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

α_p : relação entre os módulos de deformação longitudinal do aço ($E_p = 200 \text{ GPa}$) e concreto (E_{cs}).

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cs}} = \frac{200}{38,25} = 5,23$$

A_{hom} : área de concreto da seção transversal homogeneizada.

$$A_{hom} = A_c + A_p \cdot (\alpha_p - 1) = 129300 + 277,20 \cdot (5,23 - 1) = 130472 \text{ mm}^2$$

$y_{cg,hom}$: distância do centro de gravidade à fibra inferior da seção homogeneizada.

$$y_{cg,hom} = \frac{A_c \cdot y_{cg} + A_p \cdot (\alpha_p - 1) \cdot d'}{A_{hom}}$$

$$y_{cg,hom} = \frac{129300 \cdot 74,60 + 277,20 \cdot (5,23 - 1) \cdot 30}{130472} = 74,20 \text{ mm}$$

I_{hom} : momento de inércia da seção transversal homogeneizada.

$$I_{hom} = I + A_c \cdot (y_{cg,hom} - y_{cg})^2 + A_p \cdot (\alpha_p - 1) \cdot (y_{cg,hom} - d')^2$$

$$I_{hom} = 316863953 + 129300 \cdot (74,20 - 74,60)^2 + 277,20 \cdot (5,23 - 1) \cdot (74,20 - 30)^2 = 319174653 \text{ mm}^4$$

Resulta:

$$M_r = \left(\alpha \cdot f_{ctk,inf} + \frac{N_p}{A_{hom}} \right) \cdot \frac{I_{hom}}{y_{cg,hom}} + N_p \cdot e_p$$

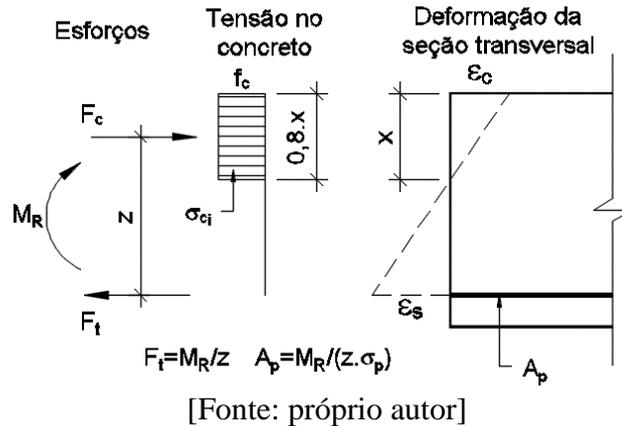
$$M_r = \left(1,5 \cdot 2,456 \times 10^{-3} + \frac{350,44}{130472} \right) \cdot \frac{319174653}{74,20} + 350,44 \cdot (74,20 - 30) = 49890 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$M_r = 42,89 \text{ kN.m}$$

1.2 MOMENTO RESISTENTE NA SEÇÃO CENTRAL

O momento resistente da seção (sem coeficientes de majoração de ações e de minoração da resistência dos materiais) é calculado com base na Figura 8-5.

Figura 8-5: Esquema para o cálculo da seção resistente da seção transversal.



Como não há força externa e a força atuante no concreto (F_c), deve ser igual a força atuante na armadura (F_t).

$$F_c = F_t \rightarrow (f_c \cdot b_f \cdot 0,8 \cdot x) = A_p \cdot \sigma_p$$

Para uma primeira tentativa impõe que a laje alveolar moldada por fôrma fixa está trabalhando no domínio 2, portanto $\epsilon_s = 10\%$ e que a posição da linha neutra esteja na altura do talão superior, assim a expressão da linha neutra é dada por:

$$x = \frac{A_p \cdot \sigma_p}{0,8 \cdot b_f \cdot f_c}$$

Com o valor da deformação total é possível determinar a tensão no aço de protensão através da Tabela 8-2 VASCONCELOS (1980).

Tabela 8-2: Tensão no aço σ_{sd} (MPa).

$\epsilon(\%)$	5,25	6,794	7,438	8,167	9,000	9,962	10,00	12,50	15,00	17,50
CP175	1025	1264	1316	1344	1365	1368	1368	1378	1388	1397
CP190	1025	1314	1411	1459	1482	1486	1486	1496	1507	1517

$\epsilon(\%)$	20,00	22,50	25,00	27,5	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00
CP175	1407	1416	1426	1436	1445	1455	1464	1474	1484
CP190	1527	1538	1548	1559	1569	1579	1590	1600	1611

Com a tensão no cabo no tempo infinito considerando uma perda total de 18,49% $\sigma_{p,inf} = 1264$ MPa determina-se o pré-alongamento da armadura ativa ε_p de acordo com a Tabela 8-2, para isso basta fazer uma interpolação linear entre o valores.

$\varepsilon(\text{‰})$	5,25	ε_p	6,794
CP190	1025	1264	1314

$$\frac{6,794-5,25}{1314-1025} = \frac{\varepsilon_p-5,25}{1264-1025} \rightarrow \varepsilon_p = 6,53 \text{ ‰}$$

Com isso a deformação total ε_t é:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s + \varepsilon_p = 10 + 6,53 = 16,53 \text{ ‰}$$

Com ε_t na mesma Tabela 8-2 é possível determinar σ_{pd} .

$\varepsilon(\text{‰})$	15,00	16,53	17,50
CP190	1507	σ_{pd}	1517

$$\frac{1517-1507}{17,50-15,00} = \frac{\sigma_{pd}-1507}{16,53-15,00} \rightarrow \sigma_{pd} = 1513,1 \text{ MPa} = 151,31 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{pk} = 1,15 \cdot \sigma_{pd} = 1,15 \cdot 151,31 = 174,01 \text{ kN/cm}^2$$

Assim, a força resultante na armadura pode ser determinada da seguinte forma:

$$F_p = A_p \cdot \sigma_p = 2,772 \cdot 174,01 = 482,35 \text{ kN}$$

Igualando as expressões da força de tração e compressão, considerando o digrama retangular simplificado, determina-se o valor da linha neutra x dada por:

$$x = \frac{F_p}{0,8 \cdot b_f \cdot f_c} \rightarrow \frac{482,35}{0,8 \cdot 1230 \cdot 4,0 \times 10^{-2}} = 12,25 \text{ mm}$$

Através da determinação da posição da linha neutra (x), faz-se uma verificação se a laje realmente se encontra no domínio 2, como hipótese considerada anteriormente.

No final do domínio 2, a posição da linha neutra corresponde a:

$$x_2 = 0,259 \cdot d = 0,259 \cdot 120 = 31,08 \text{ mm}$$

Como a posição da linha neutra está a $x = 12,25\text{mm}$ e o limite do domínio 2 está a $x_2 = 33,08\text{mm}$, a peça encontra-se, de fato, no domínio 2. Com isso o momento resistente é dado por:

$$M_{ELU} = F_p \cdot z = F_p \cdot (d - 0,4 \cdot x) = 482,35 \cdot (120 - 0,4 \cdot 12,25) = 55518 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$\boxed{M_{ELU} = 55,52 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

APÊNDICE E – CISALHAMENTO EM UNIDADES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Apresentam-se exemplos numéricos para a análise de cisalhamento em zona fissurada por flexão, considerando os diferentes tipos de lajes ensaiadas: sem e com armadura transversal de cisalhamento. Emprega-se as equações recomendadas pela ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 14861:2011. As características geométricas do tipo de laje a ser dimensionada se encontra no Apêndice A, item (1.1).

1. RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE DE ACORDO COM A ABNT NBR 14861:2011

Exemplo numérico sobre a análise do cisalhamento em lajes alveolares, e nos subsequentes, serão determinados valores teóricos característicos, sem a consideração de coeficientes parciais de segurança, para melhor comparação com os valores experimentais obtidos nos ensaios.

Deve-se ser calculada a capacidade a resistência ao cisalhamento da laje alveolar pela ABNT NBR 14861:2011 através das seguintes expressões, tanto para laje com ou sem capa estrutural.

$$V_{Rk1} = V_{c,1} + V_{p,1}$$

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

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

V_{Rk1} : é a força resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural.

f_{ct} : é a resistência a tração do concreto pré-moldado e do moldado no local.

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}^2} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{40^2} = 2,456 \text{ MPa} = 2,456 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2$$

f_{cj} : é a resistência do concreto a compressão aos j dias (dia da realização do ensaio).

$\Sigma b_{w,1}$: largura total da nervura da laje, $\Sigma b_{w,1} = 520 \text{ mm}$.

d : é a altura efetiva da seção da laje, $d = 150 - 30 = 120 \text{ mm}$.

k : coeficiente correspondente a:

$$k = 1,6 - d \geq 1 \rightarrow k = 1,6 - 0,12 = 1,48m$$

ρ_1 : corresponde a taxa de armadura específica para a laje alveolar pré-moldada.

$$\rho_1 = \frac{A_p}{\sum b_{w,1} \cdot d} = \frac{277,2}{520 \cdot 120} = 0,0044$$

A_p : área da seção transversal da armadura protendida: $6\phi 3 \times 4,5\text{mm} - A_p = 6 \times 46,2\text{mm}^2 = 277,2\text{mm}^2$.

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

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} = \frac{1,26 \cdot 277,20}{129300} = 2,710 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

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

$$\sigma_{p(-18,49\%)} = 0,8151 \cdot 1551 = 1264 \text{ MPa} = 1,26 \text{ kN/mm}^2$$

A_c : é a área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada, $A_c = 129300 \text{ mm}^2$.

Finalmente:

$$V_{Rk1} = V_{c,1} + V_{p,1}$$

$$\boxed{V_{Rk1} = 78,13 + 25,37 = 103,49 \text{ kN}}$$

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot 2,456 \times 10^{-3} \cdot 1,48 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,0044) \cdot (520 \cdot 120) = 78,13 \text{ kN}$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot 2,710 \times 10^{-3} \cdot (520 \cdot 120) = 25,37 \text{ kN}$$

2. RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE DE ACORDO COM A ABNT NBR 6118:2014

Exemplo numérico sobre a análise do cisalhamento considerando o posicionamento de armadura transversal (estribos) e protensão, desta maneira considera-se para efeito de verificação da laje o comportamento de viga, e nos subsequentes, serão determinados valores

teóricos característicos, sem a consideração dos coeficientes parciais de segurança, para melhor comparação com os valores experimentais obtidos nos ensaios.

Calcula-se a capacidade resistente da laje alveolar com estribos pela ABNT NBR 6118:2014 através das seguintes expressões:

$$V_{Rk3} = V_c + V_{sw}$$

$$V_c = V_{c0} \cdot (1 + M_0/M_{Sd,máx}) \leq 2V_{c0}$$

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha)$$

V_{Rd3} : é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal.

V_c : é a parcela da força cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo em treliça.

V_{c0} : é o valor de referência para o V_c , quando $\theta = 45^\circ$.

f_{ctd} : é a resistência inferior a tração do concreto , com $\gamma_c = 1,0$.

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

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} = 2,456 \text{ MPa} = 2,456 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2$$

b_w : largura total da somatória das nervuras da laje, $b_w = 520\text{mm}$.

d : é a altura efetiva da seção da laje, $d = 150-30 = 120\text{mm}$ para a armadura ativa e $d = 150-15 = 135\text{mm}$ par armadura passiva.

$$V_{c0} = 0,6 \cdot 2,456 \times 10^{-3} \cdot 520 \cdot 135 = 103,45 \text{ kN}$$

V_{sw} : é a parcela da força cortante resistida pela armadura transversal.

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{con}\alpha) = (6 \cdot 28/100) \cdot 0,9 \cdot 135 \cdot 0,6 \cdot (\text{sen}90 + \text{cos}90) = 122,47 \text{ kN}$$

f_{bp} : resistência de aderência de cálculo da armadura ativa.

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd}$$

η_{p1} e η_{p2} : coeficientes para o cálculo da tensão de aderência da armadura ativa, $\eta_{p1} = 1,2$ (cordoalhas de três e sete fios) e $\eta_{p2} = 1,0$ (situação de boa aderência).

f_{ctd} : é a resistência inferior a tração do concreto, considerando a idade do concreto na data de protensão para o cálculo do comprimento de transferência, com $\gamma_c = 1,0$.

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

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}^2} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{20^2} = 1,547 \text{ MPa} = 1,547 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2$$

$$f_{bp} = 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,547 \times 10^{-3} = 1,857 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2$$

l_{bpt} : é o comprimento de transferência, para cordoalhas de três e sete fios:

$$l_{bpt} = 0,5 \cdot l_{bp} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}}$$

l_{bp} : é o comprimento de ancoragem básico para armadura ativa, para cordoalhas de três e sete fios:

$$l_{bp} = \frac{7\phi}{36} \cdot \frac{f_{pyd}}{f_{bpd}}$$

σ_{pi} : é a tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão. Descontadas as perdas iniciais (5,70%) $\sigma_{pi} = 0,943 \cdot 1551 = 1462 \text{ MPa} = 1,46 \text{ kN/cm}^2$.

Finalmente o comprimento de transferência é:

$$l_{bpt} = 0,5 \cdot \frac{7\phi}{36} \cdot \frac{f_{pyd}}{f_{bpd}} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} = \frac{3,5\phi}{36} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{f_{bpd}} = \frac{3,5 \cdot 9,6}{36} \cdot \frac{1,46}{1,857 \times 10^{-3}} = 735 \text{ mm}$$

Com a liberação da protensão de forma não gradual o comprimento de transferência é majorado em 1,25: $l_{bpt} = 1,25 \cdot 735 = 919 \text{ mm}$.

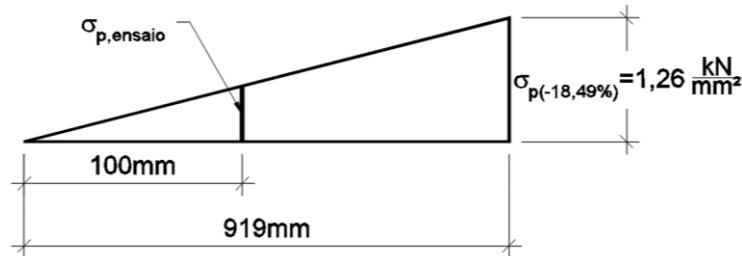
M_0 : é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão da borda da seção (tracionada por $M_{d,máx}$), provocada pelas forças normais de diversas origens concomitantes com V_{sd} , sendo essa tensão calculada com valores de γ_f e γ_p iguais a 1,0 e 0,9, respectivamente; os momentos correspondentes a essas forças normais não podem ser

considerados no cálculo dessa tensão, pois são considerados em M_{sd} ; devem ser considerados apenas os momentos isostáticos de protensão.

$$M_0 = (\gamma_p \cdot N_p + \gamma_f \cdot N_{g+q}) \cdot \frac{W_i}{A} + \gamma_p \cdot \overbrace{N_p \cdot e_p}^{M_p}$$

$$\sigma_{p,ensaio} = \frac{\sigma_{p(-18,49\%)} \cdot l_{análise}}{l_{bpt}} = \frac{1,26 \cdot 100}{919} = 0,1376 \text{ kN/mm}^2$$

Figura 8-6: Variação linear do efeito da protensão.



[Fonte: próprio autor]

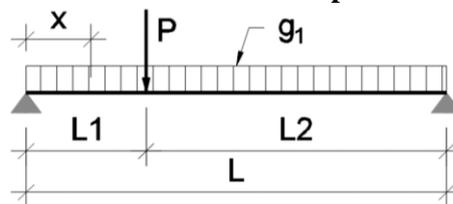
$$N_p = \sigma_{p,ensaio} \cdot A_p = 0,1376 \cdot 6 \cdot 46,2 = 38,13 \text{ kN}$$

$$M_0 = (0,9 \cdot 38,13 + 0) \cdot \frac{4247506}{129300} + 0,9 \cdot 38,13 \cdot 44,60 = 2658,05 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$M_{sd,máx}$: é o momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise, que pode ser tomado como o de maior valor no semitramo considerado (para esse cálculo não se consideram os momentos isostáticos de protensão, apenas os hiperestáticos).

Para determinar o $M_{sd,máx}$ é necessário conhecer o carregamento P. A Figura 8-7 apresenta o esquema estrutura considerado.

Figura 8-7: Esquema estrutural considerado para determinação do $M_{sd,máx}$.



[Fonte: próprio autor]

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \rightarrow V_{Rd3} = V_{sd} = P \cdot \frac{L2}{L} + g_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)$$

Isolando P, tem-se:

$$P = \left[\frac{V_{Rk3} \cdot L}{L2} - g_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \right]$$

$$M_{Sd,máx} = \frac{P \cdot L1 \cdot L2}{L} + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}$$

Substituindo P em $M_{Sd,máx}$:

$$M_{Sd,máx} = \left[\frac{V_{Rk3} \cdot L}{L2} - g_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \right] \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}$$

$$M_{Sd,máx} = \frac{V_{Rk3} \cdot L \cdot L1 \cdot L2}{L2 \cdot L} - g_1 \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}$$

$$M_{Sd,máx} = V_{Rk3} \cdot L1 - g_1 \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}$$

Sendo:

$$V_{Rk3} = V_{c0} \cdot \left(1 + \frac{M_0}{M_{Sd,máx}} \right) + V_{Sw}$$

Substituindo $M_{Sd,máx}$ em V_{Rk3} , tem-se:

$$V_{Rk3} = V_{c0} \cdot \left(1 + \frac{M_0}{V_{Rk3} \cdot L1 - g_1 \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}} \right) + V_{Sw}$$

$$V_{Rk3} = V_{c0} + \frac{V_{c0} \cdot M_0}{\underbrace{V_{Rk3} \cdot L1 - g_1 \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}}_k} + V_{Sw}$$

Considerando: $k = -g_1 \cdot \frac{L1 \cdot L2}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + g_1 \cdot \frac{(L \cdot L1 - L1^2)}{2}$, tem-se:

$$V_{Rk3} = V_{c0} + \frac{V_{c0} \cdot M_0}{V_{Rk3} \cdot L1 + k} + V_{Sw}$$

Aplicando o mínimo múltiplo comum no lado direito da equação, chega-se em:

$$V_{Rk3} = \frac{V_{c0} \cdot (V_{Rk3} \cdot L1 + k) + V_{c0} \cdot M_0 + V_{Sw} \cdot (V_{Rk3} \cdot L1 + k)}{V_{Rk3} \cdot L1 + k}$$

Desenvolvendo a equação:

$$V_{Rk3}^2 \cdot L1 + V_{Rk3} \cdot k = V_{c0} \cdot V_{Rk3} \cdot L1 + V_{c0} \cdot k + V_{c0} \cdot M_0 + V_{Sw} \cdot V_{Rk3} \cdot L1 + V_{Sw} \cdot k$$

Reagrupando os termos:

$$V_{Rk3}^2 \cdot L1 + V_{Rk3} \cdot k - V_{c0} \cdot V_{Rk3} \cdot L1 - V_{c0} \cdot k - V_{c0} \cdot M_0 - V_{Sw} \cdot V_{Rk3} \cdot L1 - V_{Sw} \cdot k = 0$$

$$\underbrace{L1}_{a} \cdot V_{Rk3}^2 + \underbrace{(k - V_{c0} \cdot L1 - V_{sw} \cdot L1)}_b \cdot V_{Rk3} - \underbrace{(V_{c0} \cdot k + V_{c0} \cdot M_0 + V_{sw} \cdot k)}_c = 0$$

$$V_{Rk3} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

$$V_{Rk3} = \frac{-k + V_{c0} \cdot L1 + V_{sw} \cdot L1 + \sqrt{(k - V_{c0} \cdot L1 - V_{sw} \cdot L1)^2 + 4 \cdot L1 \cdot (V_{c0} \cdot k + V_{c0} \cdot M_0 + V_{sw} \cdot k)}}{2 \cdot L1}$$

Resolvendo k, tem-se:

$$k = -129300 \cdot 25 \times 10^{-9} \cdot \frac{375 \cdot 5325}{5700} \cdot \left(\frac{5700}{2} - 100 \right) + 129300 \cdot 25 \times 10^{-9} \cdot \frac{(5700 \cdot 375 - 375^2)}{2} = 113,74 \text{ kN}$$

Portanto, V_{Rk3} é:

$$V_{Rk3} = \frac{-113,74 + 103,45 \cdot 375 + 122,47 \cdot 375 + \sqrt{(113,74 - 103,45 \cdot 375 - 122,47 \cdot 375)^2 + 4 \cdot 375 \cdot (103,45 \cdot 113,74 + 103,45 \cdot 2658,05 + 122,47 \cdot 113,74)}}{2 \cdot 375} = 229,12 \text{ kN}$$

$$V_{Rk3} = V_c + V_{sw} \rightarrow V_c = V_{Rk3} - V_{sw} = 229,12 - 122,47 = 106,65 \text{ kN}$$

Na flexo-compressão $V_c \leq 2V_{c0}$ sendo assim, a parcela $(1 + M_0/M_{sd,m\acute{a}x})$ deverá estar no intervalo entre 1 e 2, chama-se aqui está parcela de k' .

$$k' = \left(1 + \frac{M_0}{M_{sd,m\acute{a}x}} \right) = \left(1 + \frac{M_0}{V_{Rd3} \cdot L1 + k} \right) = \left(1 + \frac{2658,05}{229,12 \cdot 375 + 113,74} \right) = 1,031$$

Finalmente:

$$V_{Rk3} = V_c + V_{sw}$$

$$\boxed{V_{Rk3} = 106,65 + 122,47 = 229,12 \text{ kN}}$$

$$V_c = 103,45 \cdot 1,031 = 106,65 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) = (6 \cdot 28/100) \cdot 0,9 \cdot 135 \cdot 0,6 \cdot (\text{sen}90 + \text{cos}90) = 122,47 \text{ kN}$$

APÊNDICE F – RUPTURA POR ANCORAGEM

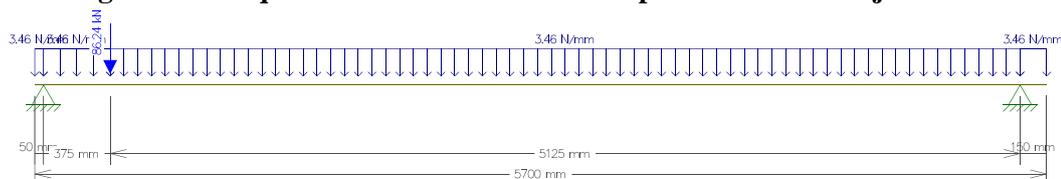
Para melhor clareza ao leitor é apresentado a verificação por falha de ancoragem de acordo com a proposta apresentada em ARAÚJO (2011).

1. RUPTURA POR ANCORAGEM

Para o desenvolvimento numérico deste exemplo, são utilizados os resultados experimentais para a análise da laje L04A.

A Figura 8-8 apresenta uma laje alveolar carregada com carga concentrada e com o peso próprio. Neste ensaio, a primeira seção fissurada aparece em baixo da carga concentrada e nela deve-se verificar se o comprimento disponível até o fim da laje é suficiente para ancorar a armadura ativa.

Figura 8-8: Esquema estrutural considerado para o ensaio da laje L04A.



[Fonte: imagem do programa Ftool]

Na Tabela 8-3 são apresentadas as propriedades da laje alveolar e os esforços obtidos no ensaio.

Tabela 8-3: Propriedades da laje alveolar e dos esforços do ensaio.	
Resistência à tração do concreto na liberação da protensão	1,55 MPa
Resistência à tração do concreto de projeto	2,46 MPa
Altura útil	15,01 cm
Protensão inferior	6 ϕ 3x4,5mm (2,772 cm ²)
Tensão aplicada na armadura	1551 MPa
Tensão na armadura no ato da protensão	1464 MPa
Tensão na armadura após as perdas (data do experimento)	1284 MPa
Momento de fissuração da seção analisada	28,64 kN.m
Momento fletor experimental na seção analisada	33,48 kN.m
Força cortante experimental na seção analisada	88,57 kN

[Fonte: próprio autor]

Verificação da ancoragem pela EC 2. Percebe-se que pela tabela acima, o momento de fissuração é ultrapassado necessitando, portanto, a verificação da ancoragem da armadura ativa.

- Resistência de aderência na liberação da protensão.

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ct}(t) = 4,95 \text{ MPa.}$$

Onde:

$$\eta_{p1} = 3,2 \text{ cordoalhas de 3 e 7 fios;}$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ condição de boa aderência;}$$

$$f_{ct} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_{c \rightarrow 1,0}} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{20^2} = 1,55 \text{ MPa.}$$

- Comprimento de transferência.

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt} = 674 \text{ mm.}$$

Onde:

$$\alpha_1 = 1,25 \text{ liberação não gradual;}$$

$$\alpha_2 = 0,19 \text{ cordoalhas de 3 a 7 fios;}$$

$$\phi = 9,6 \text{ mm;}$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ condição de boa aderência;}$$

$$\sigma_{pm0} = 1551 - 5,60\% = 1464 \text{ MPa.}$$

- Valor de projeto do comprimento de transferência.

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt} = 809 \text{ mm.}$$

- Resistência de aderência na ancoragem.

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} = 2,95 \text{ MPa.}$$

Onde:

$$\eta_{p2} = 1,20 \text{ cordoalhas de 3 a 7 fios;}$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ condição de boa aderência;}$$

$$f_{ct} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_{c \rightarrow 1,0}} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} = 2,46 \text{ MPa.}$$

- Comprimento de ancoragem necessário.

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \alpha_2 \cdot \phi \cdot \left(\frac{\sigma_p - \sigma_{pm}}{f_{bpd}} \right) = 870 \text{ mm.}$$

Onde:

$$d_v = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot (0,1537 - 0,0275) = 0,1136 \text{ m;}$$

$$\sigma_p = \frac{V+M/d_v}{A_p} = \frac{88,57+33,48/0,1136}{2,772} = 1383 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pm} = 1551 - 17,18\% = 1284 \text{ MPa.}$$

$$\alpha_2 = 0,19 \text{ cordoalhas de 3 a 7 fios;}$$

$$\phi = 9,6 \text{ mm;}$$

- Verificação com o comprimento disponível.

Como $l_{bpd} = 870 \text{ mm} > l_{disponível} = 50 + 375 = 425 \text{ mm}$. A condição de ancoragem da armadura ativa não está atendida, pode haver ruptura por escorregamento da armadura.