

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE DE
LAJES ALVEOLARES PREENCHIDAS DE
PEQUENA ALTURA**

ROBERTA PAULA MEDEIROS SILVA

D0116E15
GOIÂNIA
2015

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação [] Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação


Nome completo do autor: *Roberta Paula Medeiros Silva*

Título do trabalho: *Resistência a força cortante de lajes alveolares preenchidas de pequena altura.*

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM [] NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 26 / 11 / 2024

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

ROBERTA PAULA MEDEIROS SILVA

**RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE DE LAJES
ALVEOLARES PREENCHIDAS DE PEQUENA
ALTURA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Mecânica das Estruturas
Orientador: Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo

D0116E15
GOIÂNIA
2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Silva, Roberta Paula Medeiros

Resistência à força cortante de lajes alveolares preenchidas de
pequena altura [manuscrito] / Roberta Paula Medeiros Silva. - 2015.
201 f.

Orientador: Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui abreviaturas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Concreto Pré-Moldado. 2. Lajes Alveolares Protendidas. 3.
Alvéolos preenchidos. 4. Cisalhamento. I. Araújo, Daniel de Lima,
orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Roberta Paula Medeiros Silva		
CPF:	003.989.671.48		
E-mail:	robertapms@yahoo.com.br		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo empregatício do autor:	Nenhum		
Agência de fomento:	Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	Go
CNPJ:			
Título:	Resistência à força cortante de lajes alveolares preenchidas de pequena altura.		
Palavras-chave:	Concreto Pré-fabricado. Lajes Alveolares Protendidas. Alvéolos preenchidos. Cisalhamento		
Título em outra língua:	Resistance the shear strength of filled hollow core slabs of small height.		
Palavras-chave em outra língua:	Precast concrete. Prestressed hollow core slab. Hollow core filled. Shear.		
Área de concentração:	Mecânica das estruturas		
Data defesa: (dd/mmm/aaaa)	26/08/2015		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil		
Orientador (a):	Prof.º Dr. Daniel de Lima Araújo		
E-mail:	dlaraujo@ufg.br		
Co-orientador (a):	-----		
E-mail:	-----		

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

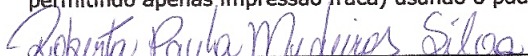
Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: 01, 02, 03 e 06

Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.



 Assinatura do (a) autor (a)

Data: 22 / 12 / 2015

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

Resistência à Força Cortante de Lajes Alveolares Preenchidas de Pequena Altura

Roberta Paula Medeiros Silva

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Daniel de Lima Araújo

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (GECON/UFG)

Sylvia Regina Mesquita de Almeida

Prof.^a Dr.^a Sylvia Regina Mesquita de Almeida (GECON/UFG)

Marcelo de Araujo Ferreira

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira (PPGECiv/UFSCar)

Goiânia, 26 de agosto de 2015.

*A Celita de Paula e José Geraldo, mamãe e papai, com
todo amor, admiração e respeito.*

AGRADECIMENTOS

Gratidão...

aos colegas de mestrado;

aos professores do programa de pós graduação GECON pela dedicação ao ensino;

ao meu orientador professor D.Sc. Daniel de Lima Araújo pela paciência, calma e principalmente pelos conteúdos transmitidos durante o período da dissertação, que foram decisivos para a sua elaboração e conclusão;

aos professores D.Sc. Renata Machado Soares e M.Sc. João Bosco da Costa pelas cartas de recomendação do mestrado. Saliento quanto a atenção, gentileza e carinho da professora Renata Machado, por todas as vezes que parou para me escutar e se dispôs a ajudar;

ao laboratorista Vitor Lopes e aos alunos Ramon Cirilo, Sérgio, Luís, Danielle e Valdivino pela ajuda fundamental nas concretagens, ensaios com as lajes e demais ensaios de controle do concreto;

ao meu amor Luciano Caetano do Carmo pelo carinho, paciência e apoio;

aos meus amigos que de alguma forma me ajudaram e incentivaram;

à minha mãe pelo estímulo, compreensão e amor imensurável.

Agradeço à empresa Chimica Edile Brasil pela doação do aditivo microexpansor.

Agradeço à MOLD pelo fornecimento dos materiais para os testes de dosagem, doação das lajes, mão de obra e transporte, principalmente ao engenheiro Wilson Cândido pelo apoio técnico.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudo, ao CNPq pelo financiamento de parte da pesquisa (Chamada pública MCTI/CNPq/MEC/Capes – Ação transversal n.º06/2011 – Casadinho/Procad).

RESUMO

A utilização de elementos pré-moldados na construção civil retrata uma evolução em termos construtivos, pois representa a aplicação da racionalização do sistema e o melhoramento das técnicas construtivas. Nesta pesquisa, é avaliado o comportamento e resistência de lajes alveolares protendidas com alvéolos preenchidos em etapa posterior à sua concretagem e submetidas à ruína por força cortante. É avaliada a influência da retração do concreto de preenchimento dos alvéolos, da extensão de preenchimento e do número de alvéolos preenchidos na resistência à força cortante da laje alveolar. Além disso, é avaliada também, a interferência da capa estrutural na resistência à força cortante das lajes alveolares protendidas. Por meio da comparação dos resultados obtidos nos modelos físicos com os resultados obtidos de equações disponíveis na literatura para lajes alveolares, é analisada a validade desses equacionamentos às lajes alveolares com alvéolos preenchidos em etapa posterior à liberação da protensão. Os resultados obtidos demonstram a necessidade de alteração de alguns modelos normativos de modo a adapta-los para adequada representação do comportamento de lajes alveolares protendidas preenchidas, principalmente para as lajes de menor altura, que é um modelo bastante utilizado no mercado brasileiro, principalmente na região centro oeste.

Palavras-chave: Concreto pré-moldado. Lajes Alveolares Protendidas. Alvéolos preenchidos. Cisalhamento.

ABSTRACT

The use of precast concrete elements in the construction industry reflects an evolution in constructive terms, it represents the application of the system rationalization and improvement of building techniques. In this study, it evaluates the behavior and resistance of prestressed hollow core slabs with hollow core filled at a later stage to its concrete and submitted to ruin by shear force. The influence of shrinkage of concrete filling of the hollow core, the fill extent and the number of hollow core filled in the shear strength of the hollow core slab is evaluated. Moreover, it is also evaluated, the interference of the structural layer in the shear strength of prestressed hollow core slabs. By comparing the results obtained in physical models with the results of previously published equations for hollow core slabs, it analyzes the validity of these balances between the hollow core slabs with hollow core filled at a later stage to the release of prestressing. The results show the need to change some normative models in order to adapt them to appropriate representation of the behavior of filled prestressed hollow core slabs, particularly for slabs of smaller size, which is a model widely used in Brazil, mainly in the region Centro-Oeste.

Keywords: Precast concrete. Prestressed hollow core slab. Hollow core filled. Shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Detalhe da seção transversal genérica de uma laje alveolar. [Adaptação de MOLD (2011)]	25
Figura 2.1 - Seção típica de laje alveolar protendida. [Adaptação de França (2012)]	29
Figura 2.2 – Seções transversais de acordo com a forma de produção. [THIEL ENGENARIA, 2013 e AECWEB, 2013].....	30
Figura 2.3 - Detalhe das ligações das lajes alveolares, formando as chaves de cisalhamento, dimensões (cm). [Adaptação de NBR 9062 (ABNT, 2006)]	31
Figura 2.4 - Emprego de capa estrutural de concreto moldado in loco. [Adaptação de NBR 9062 (ABNT, 2006)]	31
Figura 2.5 - (a) Vassoura para efetuar as ranhuras na face superior da laje alveolar. (b) Superfície rugosa em laje alveolar. (Arquivo pessoal).....	32
Figura 2.6 - Preenchimento dos alvéolos da laje alveolar na pista de protensão. (a) e (b) Abertura dos alvéolos e (c) Preenchimento dos alvéolos utilizando o mesmo concreto da laje. (ANTUNES, 2012)	35
Figura 2.7 - Arranjo do ensaio de cisalhamento padronizado pela norma EN 1168. [Adaptação de EN 1168 (CEN, 2008)].....	39
Figura 2.8 – Detalhes dos apoios segundo as recomendações.	39
Figura 2.9 – Lajes ensaiadas à flexão e ao cisalhamento respectivamente. (MERCX; WALRAVEN, 1983).....	40
Figura 2.10 – Seções transversais das lajes alveolares da série II de ensaios. (MERCX; WALRAVEN, 1983).....	41
Figura 2.11 – Características geométricas das lajes ensaiadas. (COSTA, 2009)	44
Figura 2.12 – Comparação entre os cortantes obtidos nos ensaios e os calculados. (COSTA, 2009).....	45
Figura 2.14 – Ruptura por torção na nervura externa da laje. (COSTA, 2009)	45
Figura 2.15 – Regiões críticas, formadas de acordo com o preenchimento. (CATÓIA, 2011)	48
Figura 2.16 - Dimensões das lajes ensaiadas. (ANTUNES, 2012)	48
Figura 2.17 - Disposição do preenchimento dos alvéolos. (ANTUNES, 2012).....	49

Figura 2.18 – Força cortante <i>versus</i> deslocamento e esquema de montagem das lajes. (MARQUESI, 2014).....	53
Figura 2.19 – Força cortante <i>versus</i> deslocamento de acordo com o balanço. (MARQUESI, 2014).....	55
Figura 2.20 - Lajes alveolares utilizadas e esquema de montagem do ensaio. (BRUNESI et al, 2014).....	57
Figura 3.1 – Tensões atuantes em uma viga não fissurada. [Adaptação de (MACGREGOR ; WIGHT, 2012)]	60
Figura 3.2 - Fluxo das tensões nas peças sem armadura transversal. [Adaptação de (MACGREGOR ; WIGHT, 2012)]	60
Figura 3.3 - Mecanismos básicos de transferência de força cortante. (MARQUESI, 2014)....	62
Figura 3.4 – Fatores que influenciam no mecanismo flexo-cortante. [Adaptação de (SANTOS, 2014)].....	62
Figura 3.5 – Posição do ponto crítico pelo modelo tradicional de cálculo da tração diagonal. [Adaptação de (PAJARI, 2005)]	63
Figura 3.6 – Ruptura por cisalhamento devido a compressão nas nervuras. (MACGREGOR ; WIGHT, 1983)	64
Figura 3.7 - Ruptura combinada: cisalhamento, flexão e escorregamento da armadura ativa. (ANTUNES, 2012).....	65
Figura 3.8 - Detalhe característico da fissuração ao redor das cordoalhas por perda de ancoragem.....	65
Figura 3.9 - Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e alvéolos preenchidos. [Adaptação da NBR 14861 (ABNT, 2011)]	66
Figura 3.10 – Momento estático. (CATÓIA, 2011)	70
Figura 3.11 - Parâmetro de cálculo para lajes com alvéolos preenchidos. FIP (1998)	72
Figura 3.12 - Pontos adotados sobre a linha inclinada para determinar a posição do ponto crítico. [Adaptado de Pajari (2005)]	73
Figura 3.13 - Diagrama de tensões no elemento “a”. (MARQUESI, 2014).....	76
Figura 3.14 – Localização do ponto crítico. (YANG, 1994).....	79
Figura 3.15 - Geometria do modelo e arranjo de ensaio (dimensões em mm). (GIRHAMMAR; PAJARI, 2008)	80
Figura 3.16 - Fissura de cisalhamento na nervura lateral da laje. (GIRHAMMAR; PAJARI, 2008).....	81
Figura 3.17 – Curva de resistência a força cortante.	83

Figura 4.1 - Seção transversal de projeto do modelo. Dimensões em milímetros [Adaptação de MOLD (2011)].....	85
Figura 4.2 - Medições das dimensões lajes.	85
Figura 4.3 – Concretagem, corte e armazenamento das lajes alveolares	86
Figura 4.4 - é mostrada a disposição dos alvéolos que foram preenchidos.....	88
Figura 4.5 - Posicionamento dos pinos nos corpos de prova para o ensaio de retração hidráulica.	90
Figura 4.6 - Acondicionamento dos corpos de prova de retração hidráulica para acompanhamento e leitura.	90
Figura 4.7 – Limpeza da pista de fabricação da laje e parte da laje moldada.	91
Figura 4.8 – Limpeza e posicionamento do isopor nos alvéolos.....	92
Figura 4.9 – Preenchimento parcial dos alvéolos das lajes.	93
Figura 4.10 – Procedimento para capeamento das lajes.....	93
Figura 4.11 – Capa de concreto aplicado a laje alveolar.	94
Figura 4.12 – Montagem e disposição das formas.	94
Figura 4.13 – Aplicação e adensamento do concreto.	95
Figura 4.14 – Ensaio de resistência a compressão.....	96
Figura 4.15 – Ensaio de flexão sob três pontos de carga com entalhe no meio do vão	97
Figura 4.16 – Criação da malha para medição com o rugosímetro.	99
Figura 4.17 – Posicionamento do rugosímetro sobre a malha.....	99
Figura 4.18 - Esquema de montagem para as lajes alveolares, com carga aplicada a 2,5h....	100
Figura 4.19 - Esquema de montagem para as lajes alveolares, com carga aplicada em 2h....	100
Figura 4.20 – Corte transversal do esquema de montagem das lajes.	101
Figura 4.21 – Marcações no bloco de concreto e posicionamento do aparelho de apoio.	102
Figura 4.22 – Aplicação da pasta de gesso e limpeza da região da viga de transferência.....	102
Figura 4.23 – Algumas etapas de limpeza e marcação da laje alveolar.	103
Figura 4.24 – Itens do sistema de aplicação do carregamento.	103
Figura 4.25 –Layout geral do posicionamento dos transdutores.	104
Figura 4.26 – Chapas auxiliares para posicionamento dos transdutores e modelo de transdutor utilizado.	104
Figura 4.27 - Equipamentos utilizados na aquisição de dados dos ensaios.....	105
Figura 4.28 – Esquema de ensaio	105
Figura 4.29 – Curvas força <i>versus</i> flecha para lajes alveolares.....	106
Figura 5.1 – Variação da temperatura e umidade durante o período de estudo da retração...	109

Figura 5.2 - Variação volumétrica média do concreto de preenchimento até os 210 dias.	109
Figura 5.3 –Perfis altimétricos de rugosidade nas direções longitudinal e transversal.	112
Figura 5.4 – Panorama de fissuração após a ruína do modelo M2-A.....	115
Figura 5.5 – Panorama de fissuração após a ruína do modelo M2-B.....	116
Figura 5.6 – Panorama de fissuração após a ruína modelo M2-A*.....	116
Figura 5.7 – Panorama de fissuração após a ruína dos modelos M2-B*, M3-A* e M3-B*...	117
Figura 5.8 – Mapeamento da fissuração da face inferior do modelo M2-B*.....	118
Figura 5.9 – Força cortante <i>versus</i> deslocamento lajes sem capa da Série II.....	119
Figura 5.10 – Gráfico força <i>versus</i> deslocamento médio laje M1-A e M1-B. [Adaptação de Antunes (2012)]......	120
Figura 5.11 – Localização do h_{pc} e determinação do l_x experimental.....	123
Figura 5.12 – Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, variando a seção de análise.....	126
Figura 5.13 – Ruptura do modelo M2-5-0-A.....	128
Figura 5.14 – Ruptura do modelo M2-5-0-A*.....	128
Figura 5.15 – Ruptura do modelo M2-5-0-B.....	129
Figura 5.16 – Ruptura do modelo M2-9-0-A*.....	129
Figura 5.17 – Ruptura do modelo M2-9-0-B*.....	129
Figura 5.18 – Força cortante <i>versus</i> deslocamento para lajes com capa, série II.....	130
Figura 5.19 – Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, variando a seção de análise para lajes com capa.	136
Figura 5.20 - Força <i>versus</i> deslocamento no ponto de aplicação do carregamento para lajes com alvéolos preenchidos, série II.	138
Figura 5.21 - Ruptura do modelo M2-0-5-50-N.....	139
Figura 5.22 – Ruptura do modelo M2-0-3-50-S.....	139
Figura 5.23 – Ruptura do modelo M2-0-3-81-N.....	140
Figura 5.24 – Ruptura do modelo M2-0-5-81-N.....	141
Figura 5.25 – Ruptura do modelo M2-0-5-81-S.....	141
Figura 5.26- Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com alvéolos preenchidos.....	145
Figura 5.27 - Força cortante <i>versus</i> deslocamento para lajes com capa e alvéolos preenchidos, série II.....	147
Figura 5.28 – Ruptura do modelo M2-9-5-50-N.....	148
Figura 5.29 – Ruptura do modelo M2-9-3-50-S.....	149

Figura 5.30 – Ruptura do modelo M2-9-3-81-N.	150
Figura 5.31 – Ruptura do modelo M2-9-5-81-N.	150
Figura 5.32 – Ruptura do modelo M2-9-5-81-S.	151
Figura 5.33 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-N-A.	151
Figura 5.34 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-S-A.	152
Figura 5.35 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-S-B.	153
Figura 5.36 – Ruptura do modelo M2-5-5-81-S-A.	153
Figura 5.37 – Ruptura do modelo M2-5-5-81-S-B.	154
Figura 5.38- Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com capa de 5 cm e alvéolos preenchidos	159
Figura 5.39 - Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com capa de 9 cm e alvéolos preenchidos	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resistência à força cortante observada (V_{obs}) e resistência à força cortante calculada (V_{pre}) usando o método do Eurocode 2. (PAJARI, 2005)	42
Tabela 2.2 - Resistência à força cortante observada (V_{obs}) e resistência à força cortante calculada (V_{pre}) pelo método de Yang. (PAJARI, 2005).....	42
Tabela 2.3 – Propriedades do concreto empregado nos ensaios de Antunes (2012).....	49
Tabela 2.4 - Comparação dos resultados experimentais de Antunes (2012) com resultados teóricos.	51
Tabela 2.5 - Média e desvio padrão de V_{obs} / V_{pre} , para o EC 2, Método de Yang (1994), ACI 318, CSA e MEF.	58
Tabela 4.1 – Propriedades geométricas médias da laje alveolar de referência.....	84
Tabela 4.2 – Características das armaduras de protensão.	85
Tabela 4.3 – Descrição dos grupos de lajes alveolares ensaiadas.	87
Tabela 4.4 - Traço do concreto auto-adensável para preenchimento dos alvéolos (kg/m^3).	88
Tabela 4.5 – Composição química aditivo Dry D1 NG. [(CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA, 2014)].....	89
Tabela 4.6 – Propriedades físicas e químicas do Dry D1 NG. [(CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA, 2014)].....	89
Tabela 4.7 – Corpos de prova para resistência a compressão.	96
Tabela 4.8 – Perda de protensão experimental	107
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas do concreto oriundos do estudo de retração.....	110
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos concretos.....	110
Tabela 5.3 – Força cortante última experimental para as lajes sem capa das séries I e II.....	113
Tabela 5.4 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: = 42,5 cm	122
Tabela 5.5 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$	122
Tabela 5.6 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: ℓ_x experimental	123

Tabela 5.7 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta \cdot h$ ($\varphi=0,5$ e $\beta = 0,66$ segundo Marquesi, (2014)).	125
Tabela 5.8 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=1,33$ e $\beta = 1,49$ médio).	125
Tabela 5.9 – Força cortante experimental para as lajes com capa e sem alvéolos preenchidos das séries I e II.	127
Tabela 5.10 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 2,5h$.	133
Tabela 5.11 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$.	133
Tabela 5.12 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: ℓ_x experimental	134
Tabela 5.13 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=0,5$ e $\beta = 0,67$ médio, segundo Marquesi, (2014)).	134
Tabela 5.14 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=1,33$ e $\beta = 1,51$ médio).	135
Tabela 5.15 – Força cortante experimental para as lajes com alvéolos preenchidos das séries I e II.	137
Tabela 5.16 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 2,5h$.	143
Tabela 5.17 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$.	143
Tabela 5.18 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: ℓ_x experimental	144
Tabela 5.19 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=0,5$ segundo MARQUESI, 2014).	144
Tabela 5.20 Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=1,33$)	144
Tabela 5.21 - Força cortante experimental para as lajes com capa e alvéolos preenchidos das séries I e II.	146
Tabela 5.22 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, seção analisada ($\ell_x = b + 2,5h$)	156

Tabela 5.23 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$	157
Tabela 5.24 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\square \ell_x$ experimental.	157
Tabela 5.25 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\square \ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=0,5$ segundo MARQUESI, 2014)	158
Tabela 5.26 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=1,33$)	158
Tabela 5.28 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, com a utilização do fator de proporção da protensão $\alpha=1$, para lajes de referência.....	161
Tabela 5.30 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, com a utilização do fator de proporção da protensão $\alpha=1$	162

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CEB	<i>Comité Euro International Du Béton</i>
EN	<i>Européen Normalisation</i>
EUROCODE	European Standard
FIB	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>
LABITECC	Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PCI	<i>Precast/Prestresses Concrete Institute</i>
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
UFG	Universidade Federal de Goiás

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos minúsculos:

a_v	vão submetido ao cisalhamento
b_c	largura dos alvéolos preenchidos quando transformados em uma seção retangular equivalente
b_w	soma das larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares
b'_w	soma das larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares com alvéolos preenchidos
d	altura efetiva da seção transversal do elemento de laje alveolar
d'	altura efetiva da seção transversal do elemento de laje alveolar de seção composta
d_p	distância da extremidade da fibra comprimida ao centro da armadura protendida
f'_c	resistência cilíndrica do concreto à compressão
f_{cmj}	resistência do concreto à compressão na data do ensaio
f_{ctd}	resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado
f'_{ctd}	resistência à tração de projeto do concreto dos alvéolos
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão
f_{cd}	resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ctm}	resistência do concreto à tração na data do ensaio
f_d	tensão devida a carga permanente, sem fator de segurança, na fibra externa da seção
f_{pc}	tensão resultante de compressão no concreto no centro da seção
f_{pe}	tensão de compressão no concreto devido ao efeito da força de protensão (após todas as perdas), na fibra extrema da seção
f_{pyd}	resistência de escoamento de cálculo do aço de protensão
f_{pyk}	resistência de escoamento característica do aço de protensão
g	aceleração da gravidade (admitida igual a $9,81 \text{ m/s}^2$);

h	altura útil da seção transversal da laje alveolar
k	coeficiente, $k = 1,6 - d \geq 1$
k'	coeficiente, $k' = 1,6 - d' \geq 1$
l_{pt2}	valor do limite superior do comprimento de transferência do elemento protendido
l_x	distância da seção considerada, a partir do ponto inicial do comprimento de transferência
n	quantidade de alvéolos preenchidos

Letras romanas maiúsculas

A	área da seção transversal da laje alveolar pré-moldada
A_c	área da seção transversal de concreto
A_p	área total da seção transversal de aço protendido
A_{st}	área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ além da seção considerada
A_{s1}	área da armadura longitudinal de tração
$C_{Rd,c}$	coeficiente igual a $0,18/\gamma_c$
E_c	módulo de elasticidade do material
E_c/E_p	relação entre o módulo de elasticidade do concreto de preenchimento dos alvéolos e do concreto pré-moldado
F	força aplicada
I	momento de inércia da seção bruta
I_o	momento de inércia do elemento composto
L	comprimento do corpo de prova (mm);
M_{cre}	momento que causa a fissuração na seção devida às forças externas
M_{max}	momento máximo de cálculo na seção devido às forças externas
N_{sd}	força longitudinal na seção devida a protensão ou carregamento
P_∞	força de protensão final depois de todas as perdas
S	momento estático da seção acima e em relação ao eixo central
S_o	momento estático do elemento composto
V_{ci}	força cortante resistente à fissuração da nervura devido ao cisalhamento e flexão

V_{cw}	força cortante resistente à fissuração da nervura devido o cisalhamento
V_d	força cortante na seção devida a carga permanente sem fator de segurança (I_b)
V_i	força cortante de cálculo na seção, devida a forças externas
V_p	componente vertical da força efetiva de protensão
$V_{Rd,c}$	força cortante resistente de cálculo
V_{Rdf}	força cortante resistente em zona de flexão, para lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos
$\overline{V_{Rdf}}$	força cortante resistente em zona de flexão, para lajes com capa estrutural
$\underline{V'_{Rdf}}$	força cortante resistente em zona de flexão, para lajes com capa estrutural e com preenchimento nos alvéolos
V_{Rd1}	força resistente de projeto ao cisalhamento
V_{Rd2}	força cortante resistente de cálculo para lajes sem capa
V'_{Rd2}	força cortante resistente de cálculo
V_{Sd}	força cortante solicitante de cálculo
V_u	força cortante última
$V_{u,exp}$	força cortante última obtida do ensaio.
Y_t	distância do eixo da seção bruta, desprezando a armadura, até a face tracionada

Símbolos Gregos

ϕ	fator de redução da resistência à força cortante
ρ_1	taxa de armadura da seção transversal da laje alveolar
ρ'_1	taxa de armadura da seção transversal da laje alveolar composta
ρ_t	coeficiente adimensional
σ_{cp}	tensão na seção de concreto
σ_{cpm}	tensão de compressão no concreto devido à força de protensão
τ_{Rd}	resistência de projeto ao cisalhamento
v	tensão de cisalhamento
δ	deslocamento
ν	coeficiente de Poisson

Sumário

CAPÍTULO 1 --INTRODUÇÃO	24
1.1 OBJETIVOS.....	26
1.2 JUSTIFICATIVA.....	26
1.3 APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS	27
CAPÍTULO 2 --CONCEITOS BÁSICOS E PESQUISAS CORRELATAS.....	29
2.1 UTILIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS.....	29
2.2 CAPEAMENTO ESTRUTURAL.....	31
2.2.1 Rugosidade da Superfície	32
2.3 LAJES ALVEOLARES PREENCHIDAS.....	35
2.4 DEFORMAÇÃO POR RETRAÇÃO DO CONCRETO.....	36
2.4.1 Retração por secagem	37
2.4.2 Retração Autógena	37
2.4.3 Outros tipos de retração	38
2.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES	38
2.6 PESQUISAS SOBRE LAJES ALVEOLARES	39
2.6.1 Merx e Walraven (1983).....	40
2.6.2 Pajari (2005).....	41
2.6.3 Costa (2009).....	43
2.6.4 Catóia (2011)	46
2.6.5 Antunes (2012)	48
2.6.6 Marquesi (2014)	53
2.6.7 Brunesi <i>et al</i> (2014)	56
CAPÍTULO 3 --MECANISMOS DE RUPTURA E MODELOS DE CÁLCULO	59
3.1 TENSÃO CISALHANTE	59
3.2 MECANISMO DE RUPTURA DE LAJES ALVEOLARES SUBMETIDAS À FORÇA CORTANTE	60
3.2.1 Flexo-cortante	61

3.2.2	Tração diagonal	62
3.2.3	Ruptura da nervura por compressão devida ao cisalhamento.....	64
3.2.4	Falha de ancoragem dos cabos	65
3.3	MODELOS DE CÁLCULO PARA LAJES ALVEOLARES.....	65
3.3.1	NBR 14861 (ABNT, 2011).....	66
3.3.2	Preenchimento de alvéolos antes da liberação de protensão	68
3.3.3	EUROCODE 2	70
3.3.4	ACI 318 (ACI, 2008).....	74
3.3.5	Modelo de Yang	76
3.3.6	GIRHAMMAR E PAJARI (2008)	79
3.4	EXEMPLO DE CÁLCULO	82
CAPÍTULO 4 --PROGRAMA EXPERIMENTAL		84
4.1	ASPECTOS GERAIS E DEFINIÇÃO DO GRUPO DE LAJES ENSAIADAS ..	84
4.2	TEOR DO ADITIVO MICROEXPANSOR.....	88
4.3	EXECUÇÃO DAS LAJES.....	91
4.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	95
4.4.1	Resistência à compressão do concreto	96
4.4.2	Módulo de elasticidade estático	96
4.4.3	Resistência a tração por compressão diametral	97
4.4.4	Ensaio de flexão sob três pontos de carga com entalhe no meio do vão	97
4.5	RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS LAJES ALVEOLARES.....	98
4.6	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE.....	99
4.6.1	Montagem e instrumentação	101
4.7	PERDAS DE PROTENSÃO	105
CAPÍTULO 5 --RESULTADOS E DISCUSSÃO		108
5.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO	108
5.2	RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA LAJE ALVEOLAR.....	111
5.3	LAJE ALVEOLAR SEM CAPA	113
5.3.1	Modo de ruptura e resistência à força cortante.....	113
5.3.2	Comparação com modelos de cálculo	120
5.4	LAJES ALVEOLARES COM CAPA	127
5.4.1	Modo de ruptura e resistência à força cortante.....	127
5.4.2	Comparação com modelos de cálculo	131

5.5	LAJE ALVEOLAR COM ALVÉOLOS PREENCHIDOS.....	137
5.5.1	Modo de ruptura e resistência à força cortante.....	137
5.5.2	Comparação com modelos de cálculo.....	141
5.6	LAJE ALVEOLAR COM CAPA E ALVÉOLOS PREENCHIDOS.....	145
5.6.1	Modo de ruptura e resistência à força cortante.....	146
5.7	COMPARAÇÃO COM MODELOS DE CÁLCULO.....	155
5.8	VERIFICAÇÃO DO FATOR DE PROPORÇÃO DE PROTENSÃO (α).....	161
	CAPÍTULO 6 --CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	165
	REFERÊNCIAS.....	166
	APÊNDICE A – CÁLCULO E DEFINIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES.....	170
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES DE DOSAGENS COM O CONCRETO DE PREENCHIMENTO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	173
	APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE DAS LAJES.....	175
	APÊNDICE D - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES.....	180
	APÊNDICE E – GRÁFICOS DE DESLOCAMENTO VERTICAL DAS LAJES.....	189
	APÊNDICE F –POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES.....	200

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Brasil, o uso de estruturas pré-moldadas cresce cada vez mais por elas possuírem características que contemplam redução do tempo de construção, maior controle de qualidade, eficiência estrutural e minimização de perdas e desperdícios, além da otimização dos canteiros de obra. Por possuírem grande versatilidade, as peças pré-moldadas podem ser empregadas em vários setores da indústria da construção civil, como, por exemplo, em construções industriais, comerciais, residenciais e obras de infraestrutura, ou em elementos fora da estrutura principal, como os painéis de fechamento. A utilização de elementos pré-moldados na construção civil retrata uma evolução em termos construtivos, pois representa a aplicação da racionalização do sistema e o melhoramento das técnicas construtivas. Melo (2007) afirma que os reflexos de tal desenvolvimento foram sentidos no Brasil a partir da década de 50, quando houve um impulso para o emprego da pré-moldagem no país.

Os elementos para 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. No Brasil culturalmente utiliza-se lajes mais baixas com maior força de protensão. Por mais de 30 anos os tipos de unidades produzidas pouco mudaram. Nos Estados Unidos, as peças típicas apresentavam altura de 300 mm. Houve um aumento de pesquisas realizadas na Europa na década de 1980 relacionadas com unidades de laje alveolar que conduziram a um avanço tecnológico e permitiram a produção econômica de unidades com alturas superiores a 300 mm. A produção desses tipos de lajes, então, espalhou-se pelos Estados Unidos. (CATÓIA, 2011).

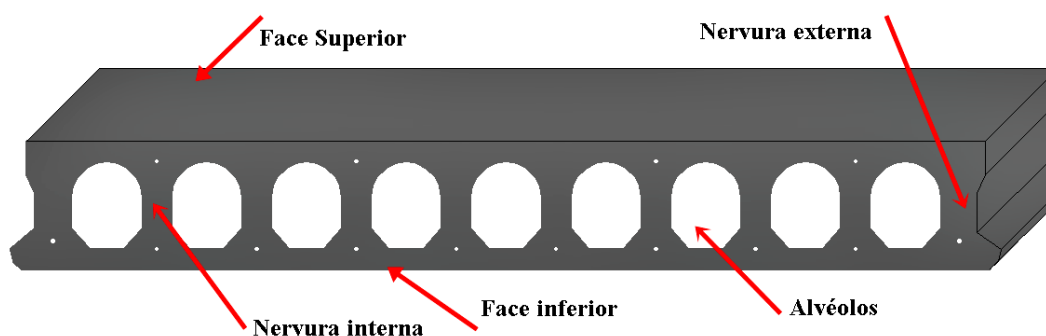
As lajes pré-moldadas protendidas têm conquistado mercado graças às suas características estruturais. Tais elementos podem ser apoiados tanto sobre estruturas de concreto pré-moldado como sobre estruturas de concreto moldado no local, ou, ainda, utilizadas em estruturas mistas aço e concreto. Para Catóia (2011), o grande emprego das lajes alveolares protendidas é justificado por suas inúmeras vantagens, entre as quais se podem citar:

- ◆ Grande gama de aplicações, como pisos, coberturas e paredes;
- ◆ Baixo custo de produção;

- ◆ Processo de produção altamente mecanizado e automatizado;
- ◆ Possibilidade de omissão de forros;
- ◆ Elevada esbelteza, decorrente do emprego de concreto de alta resistência e da alta taxa de protensão;
- ◆ Menor peso próprio devido à presença dos vazios nos alvéolos;
- ◆ Isolamento acústico.

Segundo a FIP (1998), as lajes alveolares protendidas podem suportar uma carga de utilização superior a 30 kN/m^2 e são geralmente empregadas para vencer vãos entre 4 m e 20 m, com alturas que variam de 100 mm a mais de 400 mm, sendo a largura padrão de 1200 mm. Porém, larguras maiores ou menores também são utilizadas. A Figura 1.1 apresenta uma seção transversal convencional de uma laje alveolar.

Figura 1.1 – Detalhe da seção transversal genérica de uma laje alveolar. [Adaptação de MOLD (2011)]



O procedimento de fabricação das lajes alveolares protendidas ocorre basicamente por dois tipos de processos: por extrusão, o mais utilizado, ou com formas deslizantes em longas pistas de concretagem. As lajes alveolares protendidas não possuem armadura de cisalhamento devido ao método de produção que impossibilita a inserção dos estribos antes da concretagem.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio norma NBR 6118 (ABNT, 2014) – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos, contempla o cálculo de resistência à força cortante para lajes maciças protendidas. No entanto, essa norma não disponibiliza equações específicas para o cálculo de lajes alveolares protendidas. Atualmente no Brasil a normatização utilizada é a NBR 14861 (ABNT, 2011) para as lajes alveolares pré-moldados de concreto protendido, dispõem requisitos e procedimentos e de maneira mais específica as equações para o cálculo da resistência à força cortante, levando em consideração a presença ou não de capa estrutural e preenchimento dos alvéolos. Porém, ainda há a premência de uma análise mais

aprofundada quanto ao preenchimento dos alvéolos, tanto em relação à quantidade de alvéolos preenchidos quanto ao momento do preenchimento, isto é, antes ou após a liberação da protensão.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento e a resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas de pequena altura.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ◆ Avaliar a influência da adição do aditivo microexpansor na retração do concreto de preenchimento dos alvéolos;
- ◆ Avaliar a influência da extensão de preenchimento e do número de alvéolos preenchidos;
- ◆ Verificar a importância da capa estrutural na resistência à força cortante das lajes alveolares protendidas;
- ◆ Avaliar a validade de equações disponíveis na literatura para a estimativa da resistência à força cortante de lajes alveolares com preenchimento posterior à liberação da protensão.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ao longo dos anos o principal desafio enfrentado pela indústria da construção pode ser resumido pela necessidade de reduzir custo, associado ao aumento da qualidade nos processos e produtos. Tudo isso com a inserção de procedimentos gerenciais mais eficientes e da racionalização das técnicas construtivas.

As lajes alveolares são elementos estruturais que contribuem para a sustentabilidade ambiental, visto que elas eliminam a necessidade de fôrmas e escoramento e utilizam quantidades de aço e concreto significativamente reduzidas em relação às estruturas com lajes convencionais de concreto armado (FRANÇA, 2012). É importante salientar que, por vencerem grandes vãos e reduzirem o número de pilares das edificações e, conseqüentemente, o volume de concreto e aço utilizado na estrutura, elas minimizam o impacto ambiental provocado pela produção desses materiais.

O critério de cálculo da resistência à força cortante mais recente publicado nacionalmente para lajes alveolares é a NBR 14681 (ABNT, 2011). Esta contempla o cálculo da resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas com seções simples, ou seja, sem capa estrutural, com capa e com preenchimento dos alvéolos. Entretanto, essa norma limita em dois o número de alvéolos preenchidos e considera no cálculo apenas os alvéolos preenchidos na pista de protensão, antes da liberação da protensão. No entanto, em muitos casos o preenchimento dos alvéolos é feito posteriormente na obra e em uma maior quantidade. Dessa forma, essa pesquisa busca contribuir para uma melhor avaliação da resistência à força cortante das lajes alveolares nessas situações.

1.3 APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A estrutura desta dissertação foi dividida em seis capítulos, além das referências bibliográficas e outros elementos integrados, como apêndice. Os seis capítulos foram estruturados como:

Capítulo 01 – composto por uma breve introdução ao assunto, seguido pelos objetivos gerais e específicos, além da justificativa do trabalho.

Capítulo 02 – apresentado um texto básico sobre as lajes alveolares, incluindo definição das lajes com capa estrutural e ainda sobre as lajes com preenchimento dos alvéolos. Contempla, ainda, os mecanismos de ruptura das lajes alveolares, alguns modelos de cálculo da resistência à força cortante segundo recomendações normativas e, ainda, algumas pesquisas relevantes sobre lajes alveolares.

Capítulo 03 – segue a revisão bibliográfica apresentando os mecanismos de ruptura desse tipo de elemento e ainda as recomendações sobre resistência à força cortante para peças sem armadura transversal dos principais modelos e códigos normativos.

Capítulo 04 – introduz ao programa experimental desenvolvido, descrição dos modelos utilizados, testes com as dosagens para definição do traço com e sem aditivo microexpansor para o concreto de preenchimento dos alvéolos. Processo de preenchimento dos alvéolos e confecção da capa nos modelos. Características físicas dos concretos utilizados, metodologia de ensaio de cisalhamento, determinação da rugosidade da superfície das peças, além do esquema de ensaio para verificação da resistência a força cortante e, ainda, cálculo da perda de protensão por meio de ensaio de flexão.

Capítulo 05 – apresenta os resultados com os ensaios de resistência a força cortante e discursões referentes aos ensaios realizados. Comparações com as formulações apresentadas pelos códigos normativos também são efetuados, afim de verificar a adequabilidade dessas normas aos modelos ensaiados.

Capítulo 06 – por fim as conclusões são apresentadas, seguidas pelas sugestões para trabalhos futuros. E ainda as referências bibliográficas e os apêndices desenvolvidos para auxiliar no entendimento dos assuntos abordados.

CAPÍTULO 2

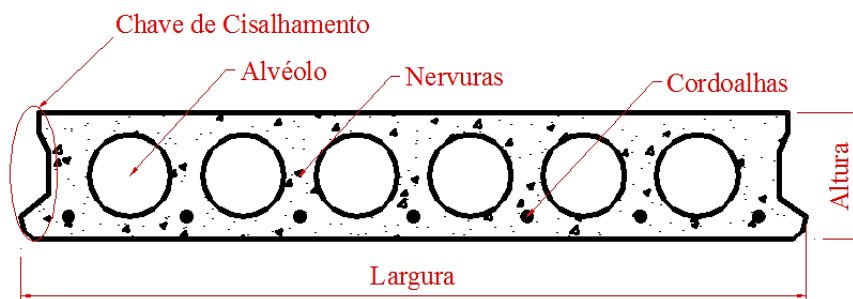
CONCEITOS BÁSICOS E PESQUISAS CORRELATAS

Neste capítulo é apresentado um texto sobre as lajes alveolares, as lajes com capa estrutural e o preenchimento dos alvéolos. Contempla, ainda, os mecanismos de ruptura das lajes alveolares, alguns modelos de cálculo da resistência à força cortante segundo recomendações normativas e, ainda, algumas pesquisas relevantes sobre lajes alveolares.

2.1 UTILIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

As lajes alveolares protendidas surgiram a partir da necessidade de redução do peso próprio, gerando ainda economia no custo de fabricação, além de permitir o uso em grandes vãos. Laje alveolar é um tipo especial de laje totalmente feita de concreto, com alvéolos no sentido longitudinal da peça, criando as chamadas nervuras. Essas lajes podem conter armaduras ativas (protendidas) ou armaduras passivas, sendo as lajes alveolares protendidas as mais utilizadas em todo mundo. Acker (2002) afirma que, comparando uma laje alveolar com uma maciça, a porcentagem de volume de vazios varia entre 30 a 50%. Por não possuir armadura transversal para suportar os esforços cisalhantes, a resistência da laje à força cortante depende da capacidade do concreto de resistir aos esforços de tração. A Figura 2.1, apresenta um exemplo de uma seção simples de laje alveolar protendida, com cordoalhas na face inferior da peça.

Figura 2.1 - Seção típica de laje alveolar protendida. [Adaptação de França (2012)]



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

Existem dois métodos para produção de lajes alveolares: por extrusão e por formas deslizantes. As lajes também podem ser moldadas em formas fixas, mas normalmente são executados pelos dois processos citados acima. Quando as lajes são produzidas pelo processo de extrusão, ocorre apenas uma etapa, sendo a máquina extrusora responsável por aplicar e compactar o concreto. Os alvéolos são formados pelos tubos helicoidais. No processo de forma deslizante, as lajes são produzidas a partir do deslizamento do molde. O concreto é lançado e compactado em camadas pela máquina de produção em dois ou quatro estágios. (ANTUNES, 2012)

Ferreira *et al* (2007) relatam que para as situações correntes de projeto no Brasil as lajes alveolares mais utilizadas são as de 150 e 200 mm de altura, enquanto que na Europa e nos EUA são comuns as aplicações de lajes alveolares entre 265 e 500 mm de altura. As variações do formato das seções transversais são mostradas na Figura 2.2. O formato do alvéolo irá depender do tipo de equipamento de produção. Quando há a utilização de formas deslizantes, o alvéolo se caracteriza pela forma oblonga. Já com as máquinas extrusoras, possuem formato circular.

Figura 2.2 – Seções transversais de acordo com a forma de produção. [THIEL ENGENARIA, 2013 e AECWEB, 2013]



a) Lajes produzidas por formas deslizantes

b) Lajes produzidas por extrusão

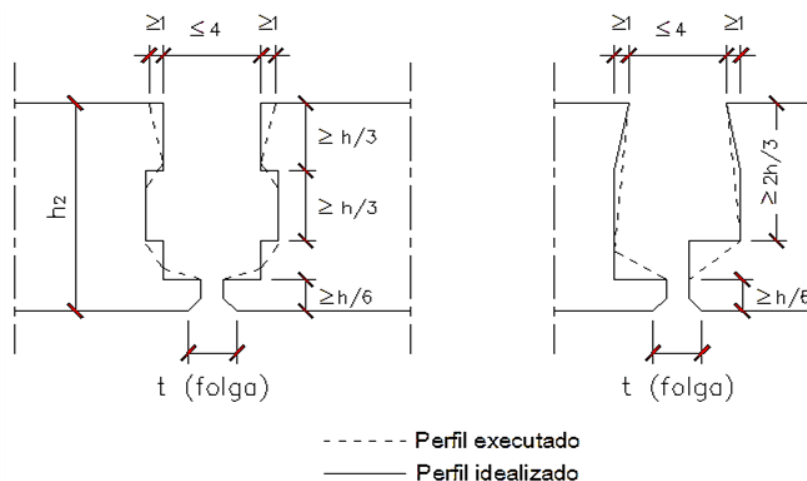
Outra característica geométrica das lajes alveolares são os detalhes laterais. Na montagem das peças, elas devem ser posicionadas justapostas, formando a chave de cisalhamento. Esse detalhe construtivo, com o devido preenchimento por concreto deve garantir a transmissão da força cortante.

A NBR 9062 (ABNT, 2006) - Projetos e execução de estruturas de concreto pré-moldado recomenda que, no caso de aplicação de cargas pontuais ou linearmente distribuídas paralelamente às juntas, deve-se fazer a verificação dos esforços de cisalhamento aplicados

nessas ligações nas situações em que não houver a aplicação de capa estrutural. A geometria indicada para as chaves de cisalhamento é mostrada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Detalhe das ligações das lajes alveolares, formando as chaves de cisalhamento, dimensões (cm).

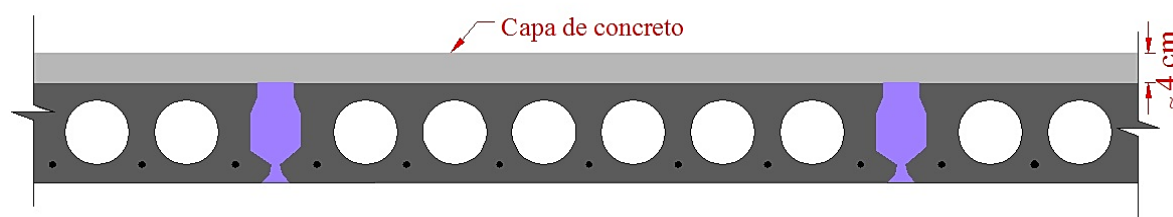
[Adaptação de NBR 9062 (ABNT, 2006)]



2.2 CAPEAMENTO ESTRUTURAL

A NBR 9062 (ABNT, 2006) salienta que, quando a solução de capeamento de concreto for empregada, a altura mínima da capa em pontos isolados não deve ser inferior a 3 cm, resultando em altura média de projeto acima de 4 cm. A Figura 2.4 mostra a seção transversal da laje com aplicação da capa.

Figura 2.4 - Emprego de capa estrutural de concreto moldado in loco. [Adaptação de NBR 9062 (ABNT, 2006)]



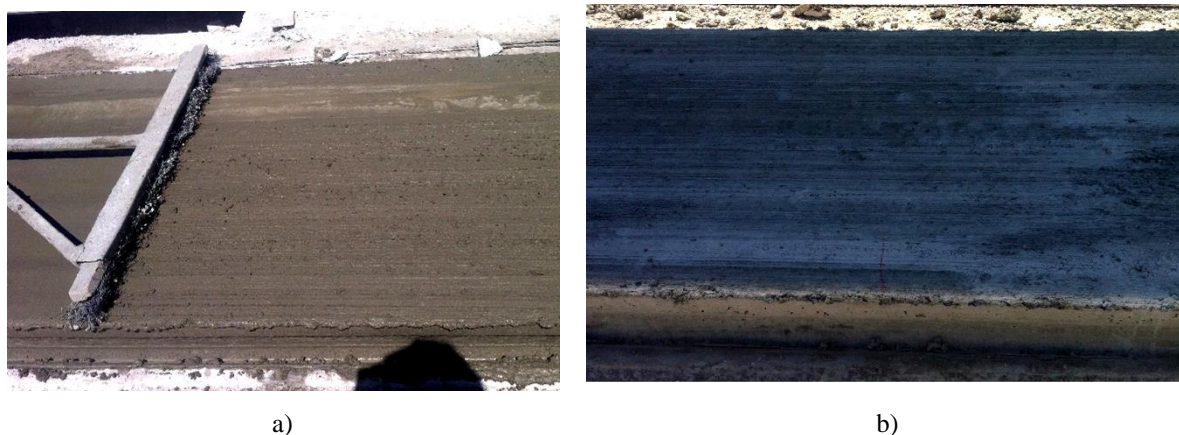
Caso não haja deslizamento na superfície de interface, o comportamento da seção corresponde ao de seção composta, com a seção integralizada pela parte pré-moldada com a parte moldada no local (EL DEBS, 2000).

O funcionamento da capa estrutural será garantido se, no processo de execução, as técnicas forem aplicadas de maneira correta. Essa etapa corresponde ao preparo da superfície, como a

limpeza do local e a retirada do material pulverulento, até os cuidados de manter a umidade para que não haja problemas com a aderência. A retirada dos materiais contaminantes na interface da laje com a capa deve ser feita cuidadosamente com jato d'água, limpeza a vácuo ou ar comprimido para garantir a efetiva limpeza da superfície. Limpezas com vassouras devem ser desprezadas, pois não eliminam de maneira correta e eficaz o material depositado na superfície da laje.

A ligação entre a camada de concreto da capa e a laje alveolar é extremamente influenciável pela rugosidade do substrato da superfície de acordo com Santos *et al* (2007). Para auxiliar o comportamento conjunto laje e capa, durante o processo de fabricação é criada uma superfície rugosa. Para isso, utiliza-se uma escova com cerdas metálicas acoplada à parte traseira da máquina moldadora. Assim, ao deslizar sobre o concreto fresco, ela cria as ranhuras no sentido horizontal da laje alveolar, como mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - (a) Vassoura para efetuar as ranhuras na face superior da laje alveolar. (b) Superfície rugosa em laje alveolar. (Arquivo pessoal)



2.2.1 Rugosidade da Superfície

Quando se utiliza a capa para solidarizar os pavimentos formados por elementos pré-moldados, tal como em lajes alveolares, tem-se o comportamento de elementos compostos. A transferência de tensões de cisalhamento na interface entre o concreto pré-moldado (laje alveolar) e concreto moldado no local (capa) é o item fundamental para garantir o comportamento da seção composta (SANTOS, 2014).

A execução de capeamento nas lajes alveolares não é obrigatória. Entretanto, sua execução aumenta o monolitismo do pavimento com a formação de um elemento composto de maior

inércia e resistência. Com isso, a rigidez do pavimento é aumentada, o que contribui com a redução de deflexões diferenciais devidas a cargas acidentais não uniformemente distribuídas nas juntas das lajes alveolares. Para contar com essa colaboração, entretanto, é fundamental garantir a atuação conjunta da laje com a capa estrutural, o que se dá pela garantia da adequada transferência de esforços pela interface da laje com a capa. Esses esforços são transmitidos principalmente por atrito, o que exige um nível mínimo de rugosidade da superfície superior da laje (ABNT, 2006; FIP, 1982).

Procedimentos impróprios de preparação da superfície oneram problemas para o comportamento estrutural da peça, onde o intuito é assumir a forma monolítica entre a laje e a capa de concreto.

Para El Debs (2000) o cisalhamento na interface entre dois concretos ocorre sempre que há tendência de deslizamento na superfície de contato. O autor classifica em dois efeitos, um é a transferência por meio de superfície de contato, sendo este dividido em três parcelas.

Adesão: é a parcela inicialmente mobilizada e se limita a baixas solicitações, pois ela é anulada se houver deslizamento.

Atrito: esta parcela se revela depois da parcela de adesão, e depende da tensão normal que atua na interface.

Mecânica: parcela devida aos ressaltos na superfície. As saliências mobilizam forças localizadas, aumentando significativamente a aderência.

O segundo efeito é o que ocorre por meio de armadura cruzando a superfície de contato. Este efeito é caracterizado por possuir duas parcelas.

Efeito de Pino, correspondente à resistência ao corte direto.

Tensão Normal à interface: este efeito ocorre de forma indireta, e é estimulada pelo deslocamento relativo entre as partes.

A resistência à força cortante na interface entre os dois concretos é influenciada principalmente pela resistência do concreto. El Debs (2000) afirma que quanto maior a resistência do concreto, maior a resistência à força cortante de interface. Outros fatores são a rugosidade da superfície

da peça, a armadura que cruza a interface, a tensão normal à interface e ações cíclicas. Os três últimos fatores não se aplicam aos modelos pesquisados.

Para classificar as superfícies de contato da peça pré-moldada em relação a rugosidade, utiliza-se usualmente as recomendações da FIP (1998) que indica os seguintes níveis:

- ◆ Nível 1 – superfície extremamente lisa, obtida pelo uso de formas metálicas ou de madeiras;
- ◆ Nível 2 – superfície que foi alisada, chegando a níveis bem próximos aos dos casos do Nível 1;
- ◆ Nível 3 – representada pela superfície que foi alisada (trazendo os finos do agregado à superfície), mas que ainda apresenta pequenas ondulações;
- ◆ Nível 4 – superfície executada por formas deslizantes ou régua vibratória;
- ◆ Nível 5 – superfície produzida por alguma forma de extrusão;
- ◆ Nível 6 – superfície que foi deliberadamente texturizada pelo escovamento do concreto ainda fresco;
- ◆ Nível 7 – como no nível 6, com maior texturização;
- ◆ Nível 8 – superfície em que o concreto foi perfeitamente vibrado, sem a intenção de fazer superfície lisa, ou fazendo com que os agregados graúdos fiquem expostos;
- ◆ Nível 9 – superfície jateada com água ou areia;
- ◆ Nível 10 – superfície propositadamente rugosa.

Afim de facilitar a aplicação destes níveis de rugosidade, eles foram acoplados em três tipos de superfícies de acordo com a FIP (1998):

- ◆ Superfície lisa – corresponde aos níveis 1 e 2;
- ◆ Superfície naturalmente rugosa – corresponde aos níveis 3 a 6,
- ◆ Superfície intencionalmente rugosa – corresponde aos níveis 7 ao 10.

A NBR 9062 (ABNT, 2006), conceitua a rugosidade como saliências e reentrâncias conseguidas por meio de apicoamento do concreto endurecido ou de dispositivos, ou processos especiais por ocasião da moldagem do concreto, de maneira a criar irregularidade na superfície

do elemento. Para os efeitos desta Norma, a rugosidade é medida pela relação entre as alturas das saliências ou reentrâncias e sua extensão. No item 6.3.4 da referida norma é estabelecido o valor para rugosidade intencional de, 5 mm a cada 3 cm nas duas direções.

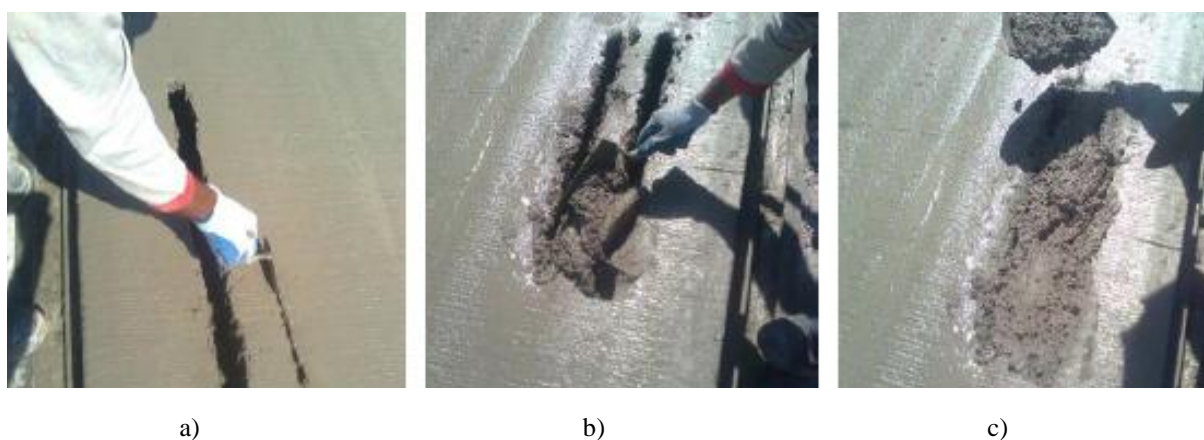
2.3 LAJES ALVEOLARES PREENCHIDAS

A fim de aumentar a capacidade resistente à força cortante das lajes alveolares, alguns procedimentos podem ser utilizados para melhorar o desempenho. Entre as possibilidades, pode-se aumentar a altura da laje, a resistência do concreto, o número de cordoalhas ou, ainda, preencher os alvéolos na região de maior força cortante.

Os alvéolos podem ser preenchidos na pista, juntamente com a moldagem das peças, fora dela, na fábrica ou, ainda, na obra. Quando o preenchimento é realizado na pista, geralmente emprega-se o mesmo concreto da laje e esse procedimento acontece antes da liberação da protensão (ANTUNES, 2012). A Figura 2.6 apresenta o preenchimento na pista, logo após a fabricação da laje.

Em outra condição quando o preenchimento ocorre fora da pista ou na obra, os concretos terão características diferentes, como a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade. Por isso devem ser adotados procedimentos para garantir uma boa aderência entre o concreto de preenchimento e o concreto da laje.

Figura 2.6 - Preenchimento dos alvéolos da laje alveolar na pista de protensão. (a) e (b) Abertura dos alvéolos e (c) Preenchimento dos alvéolos utilizando o mesmo concreto da laje. (ANTUNES, 2012)



Um gargalo encontrado no preenchimento dos alvéolos é a deformação por retração do concreto de preenchimento. Esse tipo de fenômeno é um ponto conflituoso e gerador de dúvidas quanto

à eficácia do tipo de preenchimento (na pista ou fora dela) e ainda sobre o desempenho quanto a resistência dos alvéolos preenchidos. O próximo item aborda de forma sucinta sobre a deformação do concreto ocasionada pela retração.

2.4 DEFORMAÇÃO POR RETRAÇÃO DO CONCRETO

O concreto está sujeito tanto a condições de secagem ambiental como a carregamentos constantes. Estas condições se refletem em variações dimensionais, que estão ligadas à remoção da água adsorvida da pasta de cimento. (METHA; MONTEIRO, 2006)

Hasparyk *et al* (2005) definem a retração como o “fenômeno associado a deformações em pastas de cimento, argamassas e concreto, sem que haja qualquer tipo de carregamento”. Saiba-se que sua principal causa é a perda de água da pasta de cimento.

No concreto endurecido, a perda de água ocorre quando este é exposto a ambiente com umidade relativa inferior a 100%, ocorrendo, então, a chamada retração hidráulica ou por secagem. A perda de água capilar ou livre é considerada a principal causa da retração por secagem. (TAVARES, 2008)

A partir do processo de mistura, lançamento, adensamento, cura e endurecimento do concreto, podem ocorrer variações volumétricas no material, como resposta às reações químicas de hidratação da pasta de cimento. As variações dimensionais podem ser ocasionadas, ainda, pela variação da temperatura, pela absorção ou pela perda de umidade com o meio externo, como consequência das reações álcali-agregado, pela ação de agentes deletérios, tais como os íons sulfato ou pela aplicação de cargas. (RODRIGUES, 2010)

O efeito físico da retração está associado a uma contração volumétrica da pasta de cimento, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas (autógena, química, por carbonatação), mas principalmente pela perda de água devido a secagem ou a auto dessecação. Nesta esteira cabe salientar que em virtude do caráter exotérmico das reações de hidratação do cimento, a associação entre a liberação de calor e suas condições de dissipação, pode resultar em grande aumento na temperatura do concreto após o lançamento. E ainda a retração pode acontecer em diferentes fases do processo de endurecimento da mistura. (METHA; MONTEIRO, 2006)

A retração é um fenômeno que pode ser dividido em alguns tipos: Retração por secagem, retração autógena, retração por carbonatação e retração térmica. Esses tipos são apresentados logo em seguida.

2.4.1 Retração por secagem

Balthar (2004) define a retração por secagem como um fenômeno inevitável em estruturas de concreto armado em ambientes cuja umidade está abaixo da condição de saturação, pois o fenômeno decorre da perda de água das estruturas de concreto para o ambiente. E, ainda, pode ser definida como a propriedade que consiste na contração irreversível decorrente da variação de umidade das pastas de cimento, argamassa ou concreto, assim como em outros materiais cuja estrutura interna seja de natureza porosa. (FURNAS, E., L.,C., 1997).

A retração por secagem pode ser definida como uma deformação dependente do tempo devido à perda de água em condições de temperatura e umidade relativa constante. Assim, a diferenciação principal entre a retração autógena e a retração por secagem reside no fato de que, no primeiro fenômeno, a perda de água se deve à auto dessecação e, na retração por secagem, a perda de água se processa pelo desenvolvimento de um gradiente de umidade entre o volume interno e o ambiente no qual o elemento de concreto encontra-se inserido. (RODRIGUES, 2010)

Alguns fatores que podem influenciar na retração por secagem são: a umidade relativa do ar; o teor de cimento e o fator água/cimento; o tipo de agregado utilizado; a geometria da peça de concreto, dentre outros.

2.4.2 Retração Autógena

A retração autógena ocorre devido ao fenômeno de auto secagem e corresponde à redução da água livre nos poros do esqueleto cimentício que migra, seja para participar da reação de hidratação, seja para absorver-se na superfície dos recém-formados silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Dessa maneira, formam-se meniscos (interface água/ar nos poros) cujos esforços resultantes da tensão superficial induzem à retração autógena. (BALTHAR, 2004) O fenômeno de retração autógena é a variação de volume do concreto sem trocas de umidade com o ambiente externo e à temperatura constante. Geralmente ocorre em grandes massas de concreto e/ou grandes seções.

Ela pode ser definida como a redução macroscópica dos materiais cimentícios após o início de pega, em condições de “isolamento” específicas, sem que ocorra mudança de volume devido à perda ou ao ingresso de substâncias, variação da temperatura ou aplicações de forças externas. A retração autógena ocorre devido ao fenômeno de auto secagem, que corresponde a uma redução da água livre nos poros do material cimentício. Esse tipo de retração é também conhecido como retração por hidratação e retração química. (BALTHAR, 2004)

Tanto as retrações autógenas como por secagem possuem características parecidas quanto às causas. Porém, a retração autógena se desenvolve sem qualquer perda de massa e a retração por secagem não. A retração autógena se desenvolve de forma isotrópica dentro do concreto, sem qualquer gradiente de temperatura, enquanto a retração por secagem se processa de fora para dentro, ou seja, da superfície para o núcleo da peça.

2.4.3 Outros tipos de retração

A **retração por carbonatação** é causada pela reação da pasta de cimento hidratada com o dióxido de carbono no ar na presença de umidade. Segundo Neville (1994), a retração por carbonatação é causada pela dissolução de cristais de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ que se encontram sob tensão de compressão resultante da retração hidráulica, e pela deposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em espaços não sujeitos a tensão.

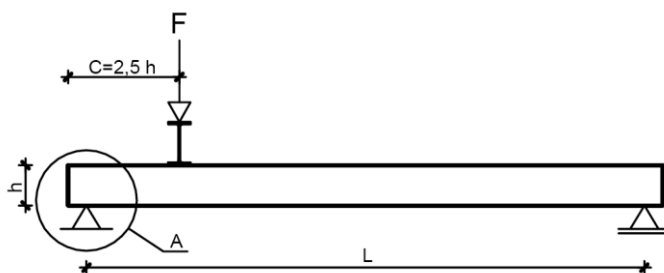
A **retração térmica** tem origem após a ocorrência do pico de evolução da temperatura por acúmulo de calor de hidratação e ao sofrer aquecimento por uma fonte de calor externa. Essa deformação ocorre devida à contração térmica quando o concreto quente é resfriado à temperatura ambiente. Ocorre geralmente em elementos com grande volume de concreto. (BALTHAR, 2004)

2.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES

Para verificar a resistência à força cortante das lajes alveolares, costuma-se adotar o ensaio padrão indicado na norma europeia EN 1168 (CEN, 2008). Os equipamentos utilizados nos ensaios estão descritos no item 4.2 da EN 12390-4 (CEN, 2000). A Figura 2.7 apresenta as orientações de montagem do ensaio de cisalhamento em lajes alveolares, descritas na norma europeia.

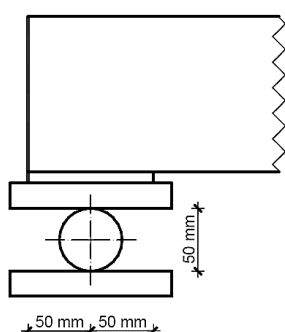
As amostras devem ser fabricadas na mesma linha de produção e com a mesma classe de concreto. Sob a viga de transferência é recomendado a utilização de material para a distribuição da carga e regularização da superfície da laje. Os materiais recomendados são o neoprene, argamassa ou gesso.

Figura 2.7 - Arranjo do ensaio de cisalhamento padronizado pela norma EN 1168. [Adaptação de EN 1168 (CEN, 2008)]



A força deve ser aplicada a uma distância de $2,5h$. Esse comprimento compreende o eixo do apoio mais próximo até o eixo da viga de transferência. A viga de transferência deve ter pelo menos 150 mm de largura e material em aço. Para o apoio mais próximo do ponto de aplicação da carga móvel, recomenda-se um apoio de primeiro gênero. Assim, nenhuma força axial deve ser gerada pela rotação do elemento no apoio. Já no segundo apoio da laje pode ser utilizado um apoio de segundo gênero. A Figura 2.8 apresenta as recomendações quanto ao apoio utilizado no esquema estático do ensaio.

Figura 2.8 – Detalhes dos apoios segundo as recomendações.



a) Suporte segundo as recomendações da EN 1168



b) Detalhe do apoio (TKALČIĆ ET AL, 2007)

2.6 PESQUISAS SOBRE LAJES ALVEOLARES

Várias pesquisas já foram realizadas com relação às lajes alveolares em todo mundo. Neste item, procura-se apresentar de maneira resumida alguns estudos realizados em lajes alveolares

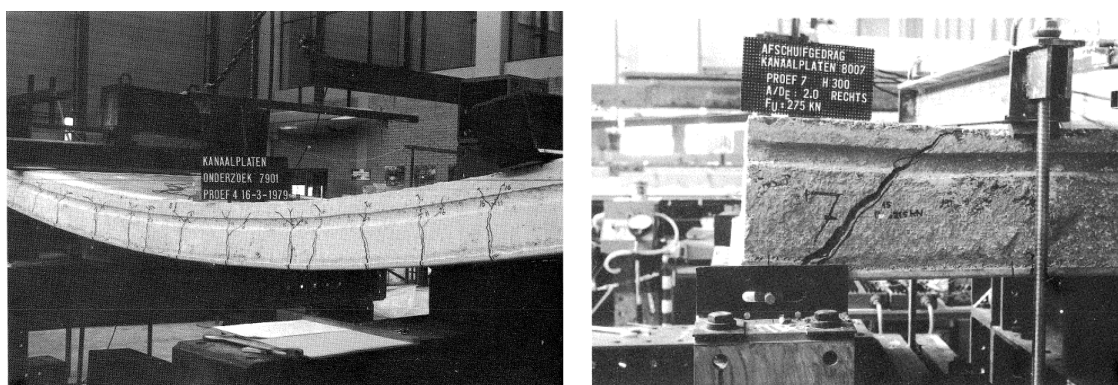
protendidas submetidas a tensões de cisalhamento oriundas de força cortante. Nesses trabalhos, destacam-se os ensaios com seções transversais simples, com aplicação de capa e com preenchimento de alvéolos. Ressalta-se que o intuito dessa pesquisa restringe-se a resistência à força cortante.

2.6.1 Mercx e Walraven (1983)

Mercx e Walraven (1983) realizaram um programa experimental afim de aprimorar os critérios de projetos de lajes alveolares. Os autores realizaram duas séries de testes, uma em 1979 com doze ensaios à flexão em lajes alveolares e outra em 1981, quando realizaram trinta ensaios em lajes alveolares submetidas à força cortante. Esses experimentos contribuíram para a identificação dos mecanismos de ruptura deste tipo de elemento. Esses valores experimentais foram comparados a uma formulação bem parecida com a apresentada no Eurocode 2.

Dos ensaios das lajes alveolares à flexão foram observados os mecanismos de ruptura por flexão pura e por falha na ancoragem. Já nas lajes submetidas à força cortante, o comportamento verificado foi a ruptura por tensão cisalhante e a ruptura por cisalhamento e compressão. A Figura 2.9 apresenta as peças ensaiadas por flexão e respectivas fissuras, assim como outra peça ensaiada por cisalhamento e a fissura característica desse tipo de ruptura.

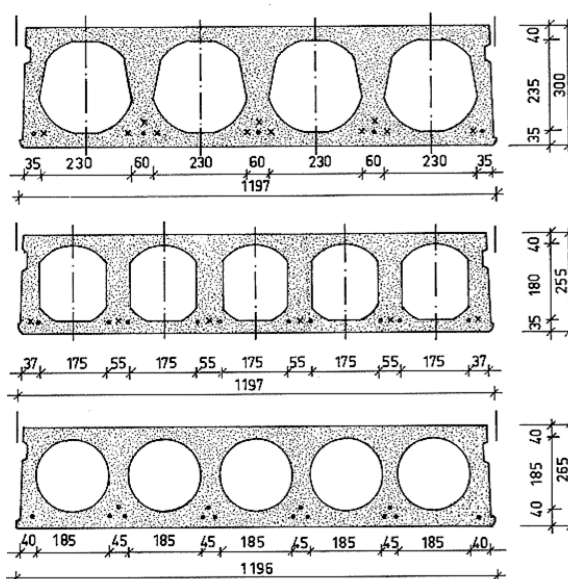
Figura 2.9 – Lajes ensaiadas à flexão e ao cisalhamento respectivamente. (MERCX; WALRAVEN, 1983)



Na primeira série de experimentos, com lajes alveolares moldadas por máquinas extrusadoras e submetidas a ensaios de flexão. Cada peça possuía 7200 mm de comprimento, 200 mm de altura e 1196 de largura. As cordoalhas das seções apresentavam diâmetro de 9,5 mm. Na série I todas as doze lajes romperam por flexão e em duas lajes ocorrem deslizamento das cordoalhas.

Para a segunda série de ensaios com lajes alveolares solicitadas por força cortante, os autores utilizaram 30 exemplares com características diferentes, principalmente na forma geométrica. Utilizaram lajes com alvéolos circulares e oblongos e a altura das lajes variou de 225 a 300 mm, como mostrado na Figura 2.10. Nesta série de ensaios as lajes romperam por cisalhamento, falha na ancoragem, flexão ou combinação das anteriores.

Figura 2.10 – Seções transversais das lajes alveolares da série II de ensaios. (MERCX; WALRAVEN, 1983)



A formulação apresentada para tração diagonal, conta com um pequeno diferencial quanto ao Eurocode 2, essa modificação aconteceu na utilização da resistência a tração do concreto, onde foi utilizado o valor do f_{ct} e não o $f_{ct,inf}$ e ainda, foi adicionado um fator redutor global para a equação com valor de 0,75. Os autores optaram por essa modificação devido aos resultados contra a segurança, principalmente para as lajes com alvéolos oblongos. Essa observação foi feita, pois as lajes com alvéolos oblongos apresentam maiores regiões com probabilidade de ruptura do que as lajes com alvéolos circulares, onde a largura da nervura é mínima em apenas um ponto.

2.6.2 Pajari (2005)

Na Finlândia, as primeiras lajes alveolares protendidas possuíam de 150 a 265 milímetros de altura. A partir do início da década de oitenta do século passado, seções transversais de 400 mm de altura começaram ser produzidas. Desde 1990, a *Technical Research Centre of Finland* realizou centenas de testes de carga em lajes alveolares protendidas. Os objetivos desses testes

variaram. Houve ensaios de homologação, ensaios de controle de qualidade (a maioria), testes realizados em projetos de pesquisa ou para produtos em desenvolvimento, entre outros.

Pajari (2005) ensaiou 49 lajes alveolares protendidas para avaliar a resistência à força cortante. As alturas das lajes variaram de 200 a 500 mm. As características geométricas da laje alveolar foram medidas a cada ensaio, isto é: comprimento da laje; largura total da seção na parte inferior, região central e superior da laje; largura e altura de cada alvéolo; altura mínima do flange superior, inferior e de cada nervura. Os resultados experimentais foram comparados com os teóricos obtidos das recomendações do Eurocode 2 (CEN, 2004) e do método de Yang (1994).

A Tabela 2.1 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios experimentais e os valores de resistência a força cortante obtidos pela formulação do Eurocode 2. E a Tabela 2.2 mostra os resultados observados em ensaios e os valores das resistências as forças cortantes pelo método de Yang. Os autores consideraram dois valores para as perdas de protensão (5% e 15%) e dois valores de resistência à tração.

Tabela 2.1 - Resistência à força cortante observada (V_{obs}) e resistência à força cortante calculada (V_{pre}) usando o método do Eurocode 2. (PAJARI, 2005)

Perda de Protensão		Resistência média à tração				Resistência característica à tração			
		5%		15%		5%		15%	
Laje	V_{obs} (kN)	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}
31200	90,2	145,7	0,619	143,9	0,626	107,3	0,840	105,5	0,854
33200	115,6	142,7	0,810	141,0	0,819	105,2	1,099	103,4	1,118
40200	106,0	218,7	0,484	216	0,491	161,1	0,658	158,4	0,669
63200	137,5	165,6	0,830	163,8	0,839	121,6	1,131	119,7	1,148

Tabela 2.2 - Resistência à força cortante observada (V_{obs}) e resistência à força cortante calculada (V_{pre}) pelo método de Yang. (PAJARI, 2005)

Perda de Protensão		Resistência média à tração				Resistência característica à tração			
		5%		15%		5%		15%	
Laje	V_{obs} (kN)	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}	V_{pre} (kN)	V_{obs}/V_{pre}
31200	90,2	128,040	0,704	126,690	0,712	93,1	0,969	92,0	0,980
33200	115,6	124,560	0,928	123,340	0,937	90,2	1,281	89,3	1,294
40200	106,0	193,440	0,548	190,550	0,556	142,9	0,742	140,4	0,755
63200	137,5	148,070	0,928	146,080	0,941	108,9	1,263	107,2	1,283

A resistência à força cortante calculada usando tanto o Eurocode 2 quanto o método de Yang são apresentadas na forma de V_{obs} / V_{pre} , sendo que V_{obs} se refere à resistência à força cortante medida (força cortante no apoio) e V_{pre} é a resistência prevista pelo modelo de cálculo

O valor de cálculo da resistência à força cortante foi obtido assumindo que a resistência característica inferior à tração é de 70% da resistência à tração média. A média da relação V_{obs} / V_{pre} deveria ser aproximadamente igual a 1,0 para que os modelos de cálculo fossem válidos.

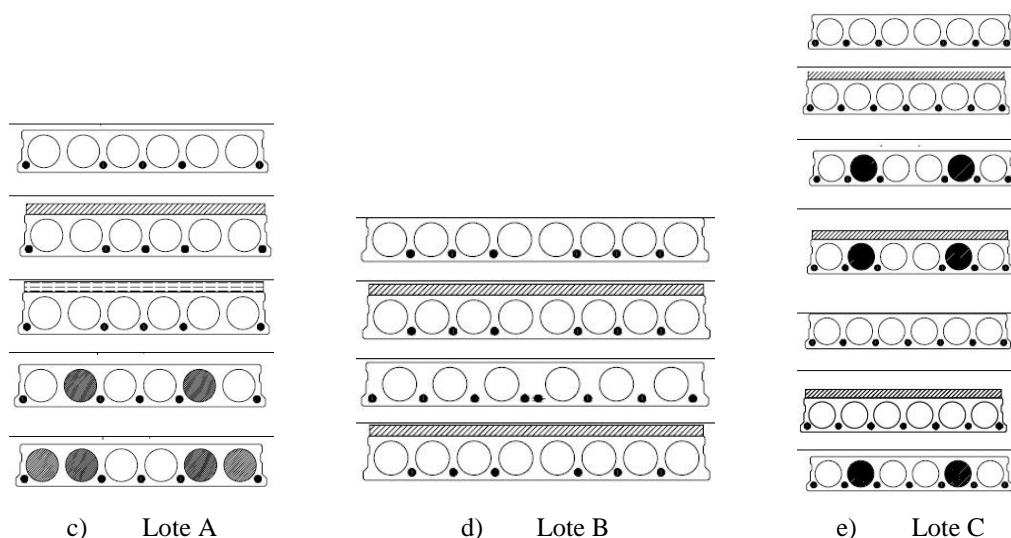
A resistência calculada pelo método de Yang representou de 89% a 98% do valor da resistência experimental. Já o método do Eurocode 2 (CEN, 2004) superestimou a resistência à força cortante para as lajes ensaiadas. Dessa forma, os autores concluíram que o método de Yang para projetos em que se considera ruptura por cisalhamento da nervura pode substituir o método recomendado pelo Eurocode 2 (CEN, 2004), por possuir um melhor ajuste com os resultados experimentais. Ainda salienta que a solução obtida a partir do método recomendado pela norma europeia deve ser verificada por análise numérica e/ou experimental, antes de ser utilizada.

2.6.3 Costa (2009)

Em sua pesquisa, Costa (2009) investigou as lajes alveolares com foco nos tipos de procedimentos de ensaios aplicados, segundo as recomendações da FIB e da norma europeia EN 1168. Foram realizados ensaios de cisalhamento, ensaios de flexão para a obtenção da força de protensão e da resistência à tração do concreto e ensaio de interação de cisalhamento e flexão.

Os valores de resistência à força cortante teóricos foram obtidos por meio da aplicação da NBR 6118 (ABNT, 2014), e ainda para o cálculo foram considerados de perda de protensão inicial de 10%. Na análise da resistência à força cortante a autora reuniu ensaios realizados entre os anos de 2006 à 2009. E as peças foram obtidas de três fabricantes distintos, e nomeados como A, B e C (Figura 2.11). O grupo A possuíam 4,0 metros de comprimento, já as lajes do grupo B apresentavam 6,5 metros de comprimento. Por fim a lajes do grupo C possuíam os seguintes comprimentos: 4,0 m, 4,15 m e 4,65 m.

Figura 2.11 – Características geométricas das lajes ensaiadas. (COSTA, 2009)



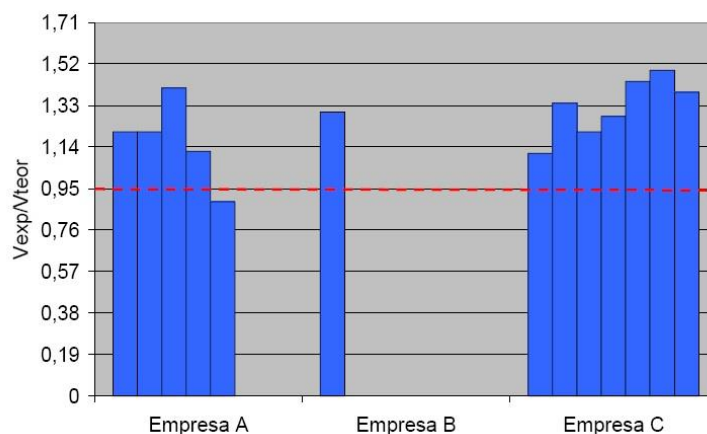
O grupo A as lajes possuem lajes com altura de 200 mm cada, a armadura é composta por $5\phi 12,5$ mm. Este grupo é composto por lajes de referência, peças com capa de concreto (convencional e outra com adição de fibra metálica), neste conjunto havia lajes com alvéolos preenchidos (preenchimento de 2 alvéolos e com 4 alvéolos).

O grupo B era composto por lajes com altura de 15 cm e cordoalhas $6\phi 12,5$ mm e outros modelos com 20 cm e armadura composta por $8\phi 12,5$ mm. Nos modelos de 15 cm de altura foi aplicado capa estrutural de 5 cm de altura, da mesma forma nos modelos de 20 cm foi aplicado capa estrutural de 5 cm.

Para o grupo C todas as peças possuíam 20 cm de altura. Neste grupo as lajes foram diferenciadas por modelos com $6\phi 12,5$ outros modelos com $7\phi 12,5$ mm. Nos quatro primeiros modelos são caracterizados como: lajes de referências, lajes com capa de 5 cm, modelos com 2 alvéolos preenchidos e por fim peças com capa de 5 cm e dois alvéolos preenchidos após a protensão. As outras três lajes com área de aço maior são caracterizadas por: lajes de referências, peças com capa de 5 cm de altura e outro modelo com dois alvéolos preenchidos.

No lote A foi observado nos resultados dos ensaios que as lajes possuíam comportamento semelhante, ocorrendo interação entre cisalhamento e flexão, sendo apenas um exemplar com combinação de cisalhamento, flexão e torção. Nos outros lotes, B e C as rupturas ocorreram por cisalhamento. A Figura 2.12 apresenta o gráfico de comparação geral dos resultados experimentais dos modelos ensaiados com os valores de cálculo.

Figura 2.12 – Comparação entre os cortantes obtidos nos ensaios e os calculados. (COSTA, 2009)



A relação entre os valores dos cortantes obtidos por meio de ensaio de cisalhamento e os valores de cálculo resultaram em valores superiores 0,95, valor recomendado pela norma EN 1168. Com exceção de um modelo fornecido pela empresa A que resultou em valor inferior ao recomendado. A comparação com os resultados experimentais, foram calculados os valores teóricos de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), item 19.4.1, sem considerar os coeficientes de segurança de projeto e foi considerada perda inicial de 10%. Para as lajes de 20 cm com capa de 5 cm de altura, em alguns exemplares houve o descolamento da capa, o autor ressalta que para aplicação da capa de concreto não foi realizada a limpeza da superfície, que pode ter contribuído para o descolamento da capa de alguns exemplares.

Já o lote de ensaios com lajes com alvéolos preenchidos com concreto simples, foram observadas fissuras com efeito combinado entre cisalhamento, flexão e fendilhamento do concreto com falha de ancoragem. Em um exemplar de laje com preenchimento parcial dos alvéolos, foi verificado o efeito de torção durante o ensaio, conforme apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Ruptura por torção na nervura externa da laje. (COSTA, 2009)



Esse tipo de ruptura tem como característica uma fissura no sentido horizontal da laje na face superior da peça. A autora constatou que as lajes com alvéolos preenchidos não alcançaram os resultados esperados, tudo isso provocado pela falta de aderência em entre o concreto da laje e o concreto de preenchimento do alvéolo.

2.6.4 Catóia (2011)

O principal objetivo da pesquisa de Catóia (2011) foi analisar o comportamento e o desempenho mecânico de lajes alveolares protendidas quanto ao cisalhamento em região fissurada por flexão. Foram consideradas diferentes situações de projeto, com e sem capa estrutural, com e sem alvéolos parcialmente preenchidos, e realizados ensaios experimentais e análise dos mecanismos resistentes. Foram ensaiadas 65 lajes para verificar a capacidade resistência à força cortante.

Os ensaios foram realizados seguindo a recomendação do manual FIP (1992), com aplicação da força a 2,5 h do apoio. A taxa de carregamento utilizada no ensaio foi de, aproximadamente, 40 kN/min. Nos ensaios foram medidos a força aplicada e os deslocamentos verticais. As lajes protendidas utilizadas nos ensaios foram fabricadas por quatro diferentes empresas brasileiras, compondo quatro lotes, X, Y, Z e W. Os lotes X, Y e W foram ensaiados durante a pesquisa e o modelo do lote Z foi ensaiado anteriormente.

Nas lajes sem capa a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias variou de 40 a 50 MPa. Já para as lajes com capa estrutural, a resistência à compressão do concreto da laje variou de 48 a 56 MPa e o concreto da capa de 27 à 34 MPa. Para as lajes com alvéolos preenchidos, a resistência à compressão do concreto da laje ficou em torno 54 MPa e o concreto de preenchimento apresentou resistência de 50,4 MPa. As lajes possuíam altura entre 15 e 26 centímetros.

A resistência das lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos foi avaliada segundo o equacionamento recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para lajes maciças e que é mostrado na equação 2.1. A autora observou que a resistência experimental média foi 34% superior à resistência teórica avaliada por essa equação.

$$V_{rd1} = [\tau_{rd} k (1,2 + 40 \rho_t) + 0,15 \sigma_{cp}] b_w d \quad (2.1)$$

A variável V_{rdl} corresponde a força cortante resistente; f_{ctd} consiste na resistência a tração do concreto pré-moldado, valor de projeto $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$; a taxa de armadura da seção transversal a laje é calculada por, $\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,2$; σ_{cpm} é a tensão de compressão no concreto devido à força de protensão, $\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$; k corresponde ao fator de escala, definido como: $k=1,6-d \geq 1$; A_{s1} é a área da armadura de tração; b_w largura mínima da seção ao longo da altura útil d e N_{sd} força longitudinal na seção devida a protensão ou carregamento (compressão positiva).

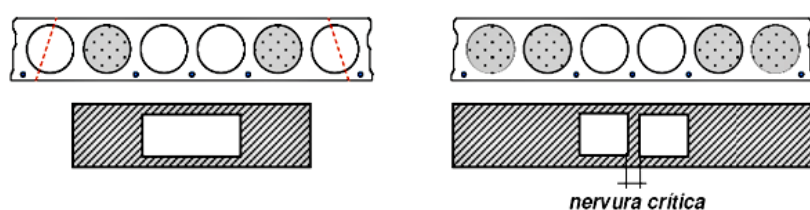
Esta equação também foi utilizada para lajes com capa e com alvéolos preenchidos, com algumas adaptações. Catóia (2011), considerou a altura útil, para o caso sem capa, e altura útil total (altura útil da laje somada à altura da capa). Os preenchimentos dos alvéolos nestes modelos foram realizados antes da protensão. Para os modelos com alvéolos preenchidos foram feitas algumas considerações. No somatório das nervuras foram consideradas as larguras dos alvéolos preenchidos e na área da seção transversal também foram adicionadas às áreas desses alvéolos.

Catóia (2011) comparou, também, os valores experimentais com os obtidos pela norma americana ACI 318 (ACI, 2008) e concluiu que essa equação produziu valores mais próximos dos resultados experimentais para as lajes sem capa. A pesquisadora observou que no caso das lajes com capa (com tela e com fibra metálica) e boa aderência laje-capa, os resultados experimentais foram bem superiores aos estimados teoricamente pela equação da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Isso ocorreu devido à mudança do mecanismo de ruptura proporcionada pelo aumento da altura da laje, aproximando-se de uma ruptura por tração diagonal.

Os resultados obtidos pela pesquisadora para as lajes com alvéolos preenchidos do lote Y mostraram que essas lajes não alcançaram a resistência prevista teoricamente pela equação da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). O modo de ruptura dessas lajes foi bem semelhante, com a ocorrência de fissuras longitudinais na face superior e inferior da laje, fissuras de flexão na face lateral, fissuras de cisalhamento com flexão e fendilhamento do concreto com falha de ancoragem na extremidade da laje. Já as lajes com dois alvéolos preenchidos do lote Z obtiveram resultados melhores (valores de V_{exp} / V_{Rk} superiores a 0,95). Contudo, as lajes com quatro alvéolos preenchidos do mesmo lote apresentaram menor relação V_{exp} / V_{Rk} . Nesse caso, o aumento do número de alvéolos preenchidos proporcionou um aumento de apenas 4% na força cortante resistente.

Quando apenas dois alvéolos foram preenchidos, o ponto fraco foi formado nos alvéolos de extremidade e na nervura central. Quando quatro alvéolos foram preenchidos o ponto fraco formou-se somente na nervura central. Assim, ficou evidente que a contribuição do preenchimento de dois alvéolos foi mais eficiente que com o preenchimento dos quatro alvéolos. A Figura 2.14 apresenta as regiões críticas, devido à disposição do preenchimento parcial dos alvéolos.

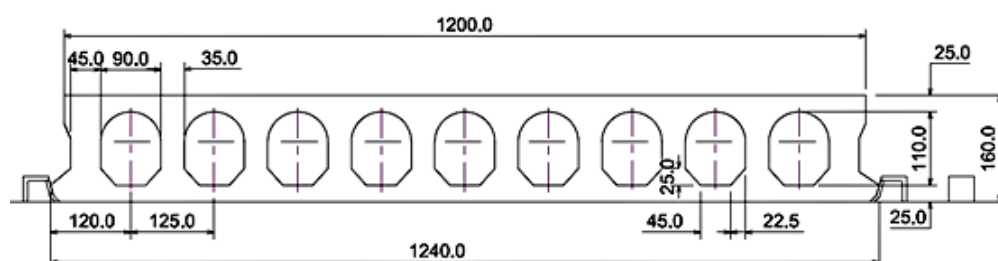
Figura 2.14 – Regiões críticas, formadas de acordo com o preenchimento. (CATÓIA, 2011)



2.6.5 Antunes (2012)

Nesse estudo foram ensaiadas oito lajes alveolares com o objetivo de estudar a influência do preenchimento dos alvéolos em etapa posterior à liberação da protensão na resistência à força cortante, utilizando modelos físicos e computacionais. As lajes alveolares utilizadas no estudo possuíam 16 cm de altura, 120 cm de largura e 4 m de comprimento, de acordo com a Figura 2.15.

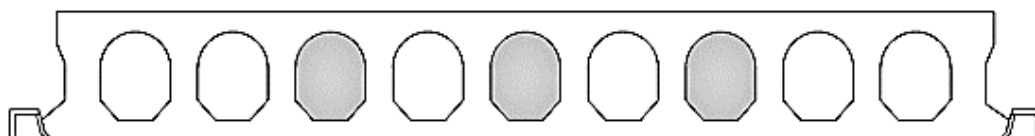
Figura 2.15 - Dimensões das lajes ensaiadas. (ANTUNES, 2012)



As variáveis do estudo experimental foram o preenchimento dos alvéolos e a presença da capa estrutural. As lajes foram classificadas de acordo com a presença ou não de capa estrutural, a qual era formada por uma camada de concreto com altura de 5 cm de espessura, e ainda se havia ou não o preenchimento dos alvéolos.

A armadura de protensão da região superior da laje era composta por 4 cordoalhas de 6,5 mm (CP 190 RB 3x3,0) e na região inferior eram distribuídas 10 cordoalhas de 9,5 mm (CP 190 RB 9,5). A concretagem parcial dos alvéolos dos grupos 2 e 4 foi definida conforme mostrado na (Figura 2.16). O comprimento do preenchimento dos alvéolos foi de 50 cm, medida esta que foi baseada na distância do ponto de aplicação da força até a extremidade da laje.

Figura 2.16 - Disposição do preenchimento dos alvéolos. (ANTUNES, 2012)



O ensaio para determinação da resistência à força cortante das lajes de referência foi realizado 28 dias após a concretagem das lajes. Já as lajes com alvéolos preenchidos foram ensaiadas 28 dias depois da concretagem dos alvéolos, enquanto as lajes com capa foram ensaiadas 28 dias após a concretagem da capa estrutural.

Na montagem do ensaio utilizaram-se dois apoios do tipo rolete, sendo o apoio mais distante do ponto de aplicação da força fixado para restringir a movimentação da laje no sentido horizontal. A largura do apoio, próximo ao ponto de aplicação do carregamento, foi adotada igual a 100 mm. A força foi aplicada em uma viga de transição de aço com 15 cm de altura por 14 cm de largura por meio de um conjunto formado por atuador hidráulico e célula de carga, ambos com capacidade de 500 kN. A força foi aplicada em incrementos de 10 kN até a ruptura da laje, sendo o seu valor continuamente registrado por meio de um sistema de aquisição de dados. Os deslocamentos verticais da laje foram medidos por meio de relógios comparadores. As propriedades do concreto da laje alveolar, do concreto de preenchimento dos alvéolos e do concreto da capa utilizado pela autora estão mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades do concreto empregado nos ensaios de Antunes (2012).

Concreto	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{ctm} (MPa)
Laje alveolar	42,6	27,00	3,75
Alvéolos	46,6	24,40	4,06
Capa	49,2	24,53	3,16

Na Tabela 2.4 são mostrados os valores da força cortante resistente encontrados nos ensaios. A partir dos resultados do modelo 1, nota-se que a resistência à força cortante do modelo 2, com alvéolos preenchidos, caiu 10%. A autora concluiu que o preenchimento parcial dos alvéolos não contribuiu para a resistência à força cortante.

Já a resistência à força cortante do modelo 3 foi muito próxima da obtida no modelo 1, demonstrando que a capa não aumentou a resistência à força cortante da laje. Isso ocorreu, segundo a autora, devido ao descolamento da capa. Assim, a presença da capa de concreto, quando sem aderência adequada com a laje alveolar, pouco contribuiu no aumento da resistência ao cisalhamento, aumentando apenas o peso próprio da laje e, conseqüentemente, os esforços. A partir do modelo 4, no qual não houve o descolamento da capa, a autora novamente observou que o alvéolo não contribuiu para a resistência à força cortante e que a capa contribuiu com um aumento de, pelo menos, 30% na força cortante resistente em relação ao modelo 1.

De forma geral, as lajes sem capa pertencentes ao grupo 1 apresentaram resultados ao cisalhamento melhores que os obtidos pelas lajes com alvéolos preenchidos parcialmente. A autora afirma que a aderência entre os materiais não foi concebida de forma perfeita, e houve a formação de uma fissura que se encaminhou pela nervura, contornando o preenchimento e rompendo as nervuras intermediárias. Assim, a laje foi à ruína do mesmo modo que na laje sem preenchimento dos alvéolos.

Os resultados de Antunes (2012) demonstraram que a força cortante resistente das lajes foi afetada por mecanismos de torção, flexão e fendilhamento na região das cordoalhas, o que, para a pesquisadora, pode justificar a não contribuição dos alvéolos preenchidos. Antunes (2012) não comparou os resultados experimentais da sua pesquisa com as equações de avaliação da resistência à força cortante recomendadas pela norma NBR 14861 (ABNT, 2011) uma vez que essa norma foi publicada após a conclusão da referida pesquisa. A Tabela 2.4 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e os resultados teóricos obtidos pelas equações presentes na NBR 6118 (ABNT, 2014) e na FIB (2000).

Tabela 2.4 - Comparação dos resultados experimentais de Antunes (2012) com resultados teóricos.

Laje	b_w (mm)	d (mm)	V_{exp} (kN)	V_{Rd} (kN) NBR 6118	V_{Rd}' (kN) FIB (2000)	$\frac{V_{Rd}}{V_{ex}}$	$\frac{V_{Rd}'}{V_{ex}}$
M1-A	406,39	126,890	154,59	146,277	146,277	0,95	0,95
M1-B	403,95	127,31	159,26	145,856	145,856	0,91	0,91
M1-0-3-50-N-A	672,73	129,08	118,04	244,002	183,895	2,06	1,59
M1-0-3-50-N-B	671,88	135,20	138,32	254,462	185,092	1,84	1,37
M1-5-0-A	387,51	195,12	143,82	207,102	228,850	1,44	1,59
M1-5-0-B	406,93	186,74	154,94	208,855	228,922	1,35	1,48
M1-5-3-50-N-A	673,05	191,42	175,22	351,361	270,477	2,00	1,54
M1-5-3-50-N-B	665,92	183,57	208,06	334,635	272,339	1,60	1,31

Para uma de suas comparações a autora utilizou o manual de projetos de lajes alveolares da FIB (2000), e as equações para determinação da força cortante resistente de lajes alveolares com capa e/ou alvéolos preenchidos e apresentadas de acordo com as equações abaixo.

Laje alveolar sem capa estrutural

$$V_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V_{Rd2} \quad (2.1)$$

Laje alveolar com capa estrutural

$$\overline{V_{Rdf}} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40 \rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (2.2)$$

Laje alveolar sem capa estrutural e alvéolos preenchidos

$$V'_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V'_{Rd2} \quad (2.3)$$

Laje alveolar com capa estrutural e alvéolos preenchidos

$$\overline{V'_{Rdf}} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40 \rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (2.4)$$

A variável A_p representa a área total da seção transversal do aço; b_w é o somatório nervuras das unidades de lajes alveolares; b_w' é soma das larguras das nervuras das lajes com alvéolos preenchidos, sendo ($b_w' = b_w + n b_c E_c/E_p$); b_c é a largura dos alvéolos preenchidos; E_c/E_p é a relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado no local e módulo de elasticidade do concreto pré-moldado; d altura efetiva da seção transversal; d' altura efetiva da seção transversal composta e f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto pré-moldado;

O coeficiente adimensional é dado por $k = 1,6 - d \geq 1$ (d em metros) e para lajes com capa o coeficiente corresponde a $k' = 1,6 - d' \geq 1$ (d' em metros); n equivale ao número de alvéolos preenchidos; ρ_1 e ρ'_1 são as taxas de armadura para a seção simples e seção composta, respectivamente. São calculadas pelas equações (2.5) e (2.6).

$$\rho_1 = \frac{A_p}{b_w d} \quad (2.5)$$

$$\rho'_1 = \frac{A_p}{b'_w d'} \quad (2.6)$$

Onde:

$$\sigma_{cpm} = \frac{P_\infty}{A} \quad (2.7)$$

A tensão de compressão do concreto devida à força de protensão e obtida por meio da força final de protensão, após todas as perdas é dado P_∞ ; V_{Rdf} é a força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos; V'_{Rdf} consiste na força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes sem capa estrutural e com preenchimento dos alvéolos. \overline{V}_{Rdf} : força cortante resistente de cálculo, para lajes com capa estrutural; \overline{V}'_{Rdf} é definido como a força cortante resistente de cálculo em zona de flexão, para lajes com capa estrutural e com preenchimento dos alvéolos e V_{Rd2} é o valor limite da força cortante resistente de cálculo;

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} v f_{cd} b_w 0,9 d \quad (2.8)$$

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (2.9)$$

$$V'_{Rd2} = \frac{1}{2} v f_{cd} b'_w 0,9 d' \quad (2.10)$$

Antunes (2012) afirma que pela forma como as equações (2.3) e (2.4) foram escritas, pode-se deduzir que elas se aplicam à situação dos alvéolos são preenchidos posteriormente à liberação da protensão, que atua na laje alveolar.

Dessa comparação, observa-se que as duas normas representaram bem os resultados experimentais para as lajes do grupo 1, ou seja, sem capa e sem alvéolos preenchidos. Para o restante das lajes, as resistências teóricas apresentaram valores superiores às obtidas no ensaio.

Antunes (2012) destaca, ainda, que os resultados podem ter sido influenciados pela baixa altura das lajes utilizadas e que há a possibilidade de que seja diferente em lajes com outras alturas e níveis de protensão.

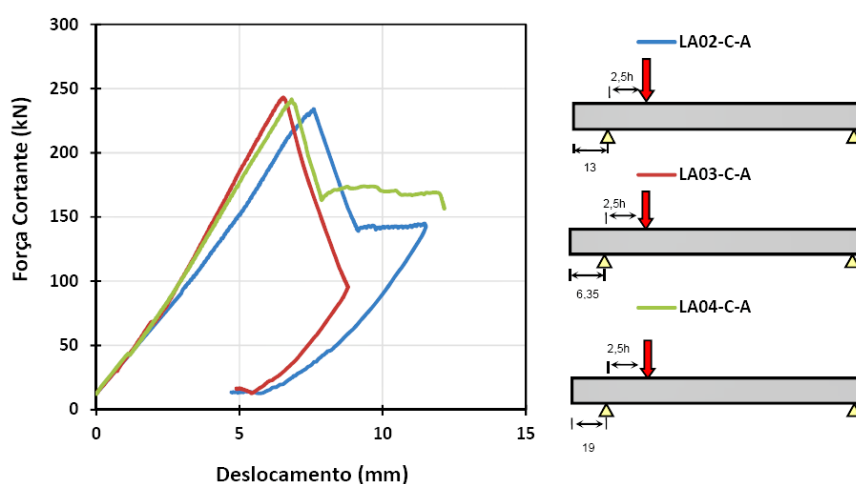
2.6.6 Marquesi (2014)

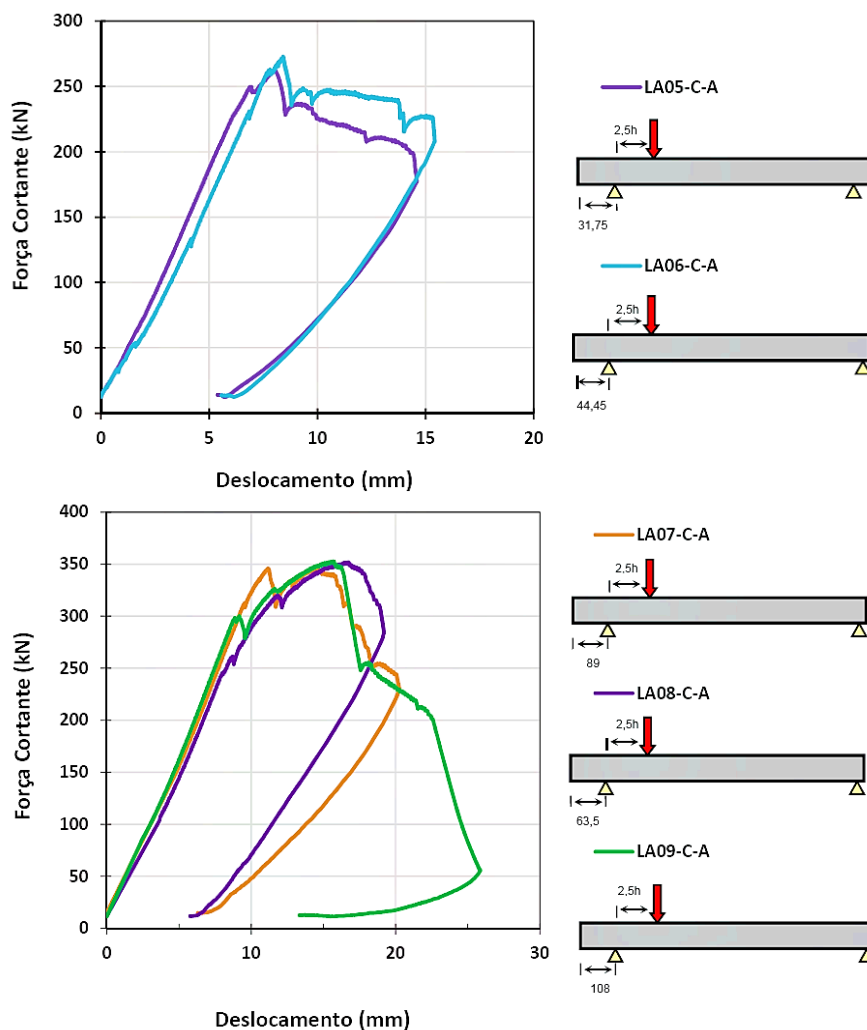
Esse autor desenvolveu um programa experimental em que foram ensaiadas 15 lajes alveolares variando a distância entre a extremidade da laje e seu apoio mais próximo. O autor realizou uma vasta revisão bibliográfica, contemplando os mecanismos relativos à ruptura por força cortante em lajes alveolares, isto é, flexo-cortante e tração diagonal.

A ruptura de todas as lajes se deu por tração diagonal. O comprimento de transferência da força de protensão estabelecido pela NBR14861 (ABNT, 2011) estabelece o valor de 85ϕ foi considerado adequado para representar a resistência à força cortante das lajes, porém o autor optou por utilizar um comprimento de transmissão para considerações da pesquisa utilizou-se o comprimento de transmissão igual a 60ϕ .

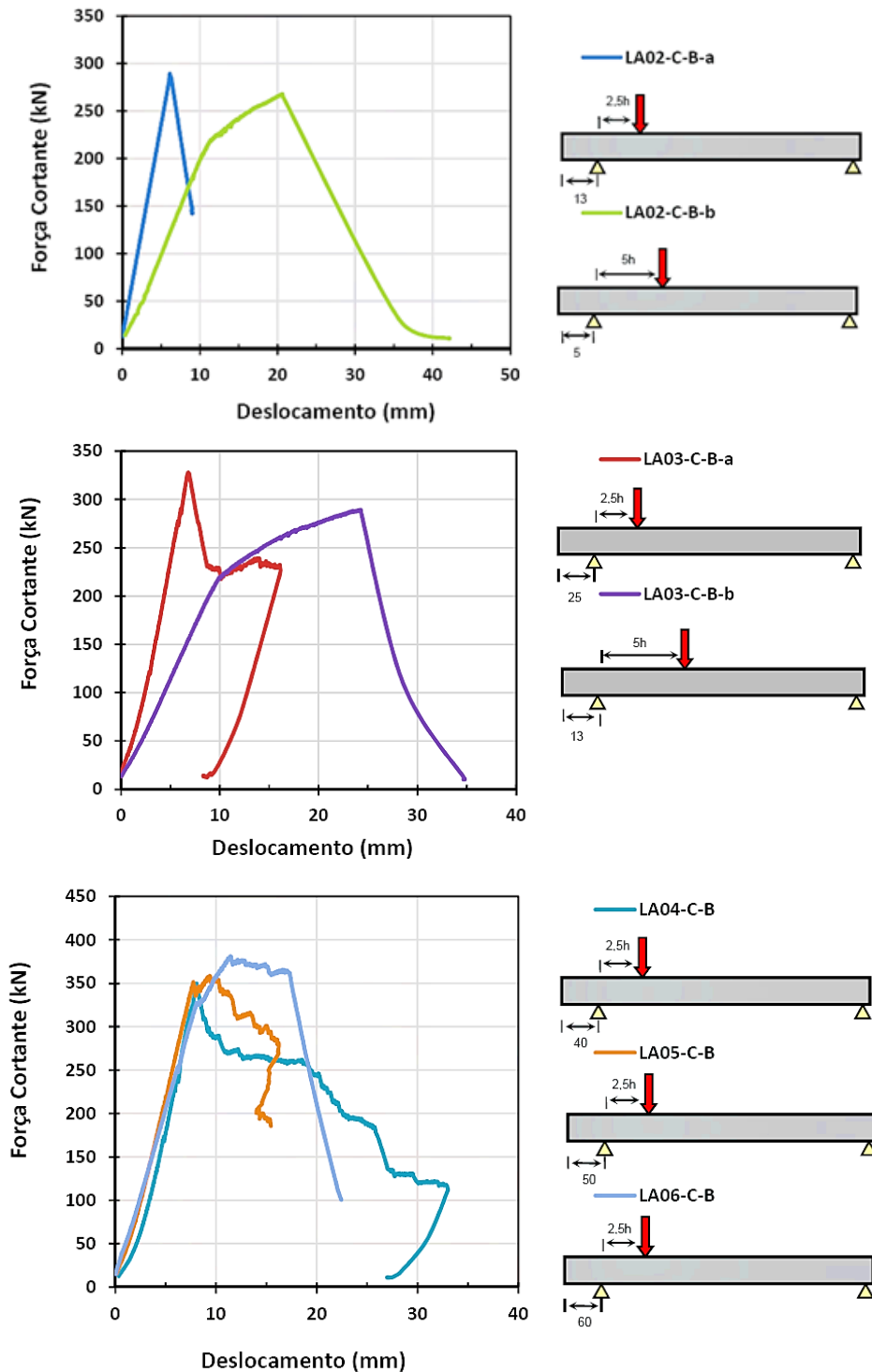
Os ensaios foram divididos em dois grupos. As lajes do grupo A possuíam 26,5 cm de altura e do grupo B possuíam 26 cm de altura. Todas as lajes possuíam 6 metros de comprimento. Para os dois grupos de ensaio, o esquema de montagem sofreu variações no comprimento do trecho das lajes em balanço. A Figura 2.17 apresenta os gráficos de deslocamento e os esquemas de montagem das lajes.

Figura 2.17 – Força cortante *versus* deslocamento e esquema de montagem das lajes. (MARQUESI, 2014)





Algumas lajes, como por exemplo, a LA05, tiveram rupturas de nervuras antes da carga máxima final. Isso pode ser observado no gráfico quando uma queda súbita de carga ocorre, mas logo em seguida o carregamento continua a crescer. Em geral, a ruptura total da laje ocorre muito próxima a eventuais rupturas isoladas de nervuras. As lajes LA07, LA08 e LA09 tiveram crescimento mais acentuado no valor da carga resistida. Os respectivos comprimentos de apoio são 63,5 cm, 89 cm e 108 cm. A Figura 2.18 apresenta as curvas das forças cortantes pelo deslocamento de acordo com o balanço e o ponto de aplicação da força, para as lajes do grupo B.

Figura 2.18 – Força cortante *versus* deslocamento de acordo com o balanço. (MARQUESI, 2014)

Por estas curvas, nota-se claramente que houve perda de rigidez por conta da fissuração na seção imediatamente a aplicação da carga além de deslocamentos maiores que os respectivos ensaios a 2,5h. Nos gráficos, as inclinações iniciais das curvas são alteradas por volta dos 10 mm de deslocamento. Mesmo realizando os ensaios com 5h e no caso do experimento LA02-C-B-b com comprimento de apoio de 5 cm, as rupturas verificadas foram por tração diagonal,

sem qualquer escorregamento das cordoalhas antes da fissura diagonal crítica. (MARQUESI, 2014)

Os valores experimentais dos 2 grupos foram comparados com os modelos teóricos dispostos na NBR 14861 (ABNT, 2011), pelo Eurocode 2 (CEN, 2004), por EN 1168 (CEN, 2008), o ACI 318 (ACI, 2008) e pela Proposta apresentada pelo autor.

Para o grupo A, o modelo NBR 14861, a média da relação V_{exp}/V_{calc} foi excessivamente alta (1,96), como esperado, uma vez que descreve o mecanismo a flexo-cortante. O Eurocode 2 apresentou melhor resultado com valor de 1,18, seguido do ACI 318 com média de 1,32. A Proposta desenvolvida pelo autor, por sua vez apresenta valor de 1,30 e por fim o modelo pela norma EN 1168 atingiu 1,51. Este valor elevado foi obtido devido a formulação apresentar um coeficiente de minoração da resistência global por um valor de 0,80.

No grupo B o média da relação V_{exp}/V_{calc} para o modelo da norma brasileira NBR 14861 foi de 2,16, este valor já era esperado, pois esta norma descreve o mecanismo de flexo-cortante. Os modelos do Eurocode 2 e o da Proposta apresentaram valores próximos, 1,40 e 1,42 respectivamente. A norma americana ACI 318 atingiu 1,50 e por fim a norma EN 1168 apresentou-se com valores seguros com média 1,80.

Marquesi (2014) concluiu que considerando um padrão mínimo de qualidade das lajes alveolares protendidas, numa situação bi-apoiada, e com carregamento predominantemente distribuído, o potencial mecanismo de ruptura nas proximidades dos apoios é por tração diagonal nos modelos.

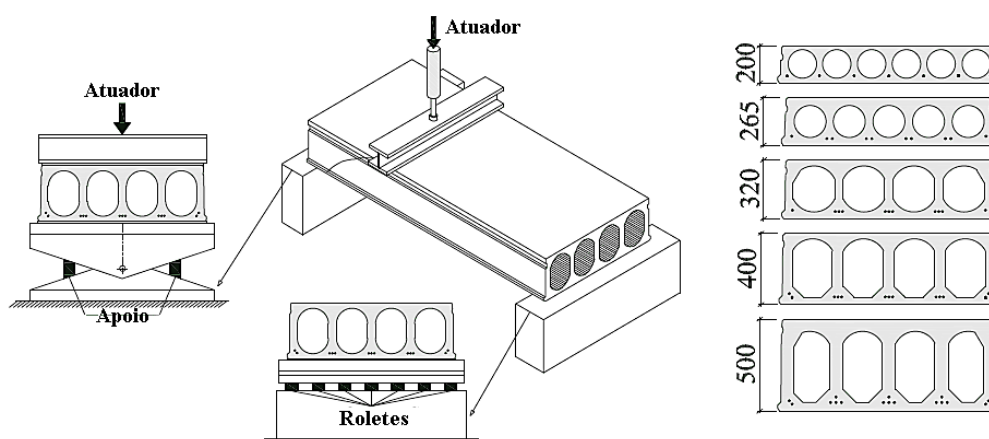
A resistência à força cortante foi influenciada pela tensão normal introduzida na seção analisada pela força de protensão. Dessa forma, o aumento do comprimento do apoio pode ser considerado em projeto como uma forma eficaz de aumentar a capacidade resistente à força cortante da laje alveolar. E quanto à forma dos alvéolos, o autor salienta que as lajes com alvéolos oblongos necessitam de mais experimentos para sua melhor caracterização.

2.6.7 Brunesi *et al* (2014)

Esses autores montagem um banco de dados com experimentos de lajes alveolares ensaiadas à força cortante por vários outros autores. Foram reunidos 49 ensaios de cisalhamento em lajes alveolares, todas com características parecidas, isto é, lajes simplesmente apoiadas, com

carregamento vertical aplicado em forma de linha sobre a seção transversal e a uma distância $a > 2,4d$. As lajes possuíam seções transversais formadas por extrusão e por formas deslizantes, e suas alturas variavam de 200 mm a 500 mm. A Figura 2.19 mostra a seção transversal das lajes ensaiadas.

Figura 2.19 - Lajes alveolares utilizadas e esquema de montagem do ensaio. (BRUNESI et al, 2014)



Brunesi *et al* (2014) num primeiro momento realizaram o cálculo analítico da resistência à força cortante por meio de três Códigos: o Eurocode 2 (2004), o ACI 318 (ACI, 2008) e o CSA (2001)¹, além do método de cálculo de Yang (1994). Pelos resultados obtidos, os métodos do Eurocode 2 e de Yang (1994) mostraram-se conservadores quanto à avaliação da capacidade resistente ao cisalhamento, ao contrário dos códigos do ACI 318 e CSA. Segundo os autores isso, demonstra a imprecisão das normas atuais.

A segunda etapa da pesquisa foi a realização de uma análise não linear via método dos elementos finitos dos 49 modelos de lajes alveolares ensaiadas experimentalmente. Por meio da análise numérica, os autores buscavam avaliar o desempenho das lajes com o emprego de modelos tridimensionais baseados na mecânica da fratura não linear. Cada laje foi modelada de acordo com a seção transversal individual e, assim, foi verificada a influência da forma do alvéolo. Assim, a eficácia da aplicação do MEF representou bem a resistência à força cortante obtida dos ensaios, conforme mostrado na Tabela 2.5.

¹ Canadian Standards Association. CSA (2001) A23.3-04 – Desing of concrete structures

Tabela 2.5 - Média e desvio padrão de V_{obs} / V_{pres} , para o EC 2, Método de Yang (1994), ACI 318, CSA e MEF.

Lajes	Eurocode 2		Yang (1994)		ACI 318		CSA		FEM	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Todas	0,778	15,7%	0,867	15,7%	1,094	24,1%	1,199	27,1%	0,998	2,8%

Perda de protensão inicial: 5%

Assim, a comparação dos valores experimentais com os valores obtidos por meio dos métodos analíticos e por modelagem numérica teve um comportamento satisfatório, pois a variação entre eles foi de 0,778 até 1,199. Já a variação dos valores experimentais com os resultados do MEF foi de 2,8%. Dessa maneira, a modelagem numérica é uma alternativa para representar a capacidade de resistência ao cisalhamento desse tipo de elemento pré-moldado.

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DE RUPTURA E MODELOS DE CÁLCULO

As lajes alveolares quando submetidas à ação de forças cortantes possuem um comportamento peculiar e preocupante, pois a ruptura acontece de maneira brusca, diferentemente da ruptura provocada por flexão, onde a ductilidade é predominante e assim há a predominância de grandes deformações.

3.1 TENSÃO CISALHANTE

A partir da teoria tradicional para vigas homogêneas em regime elástico e não fissurada, a intensidade da tensão cisalhante devido a força cortante pode ser expressa de acordo com a equação (3.1).

$$\vartheta = \frac{V Q}{I b} \quad (3.1)$$

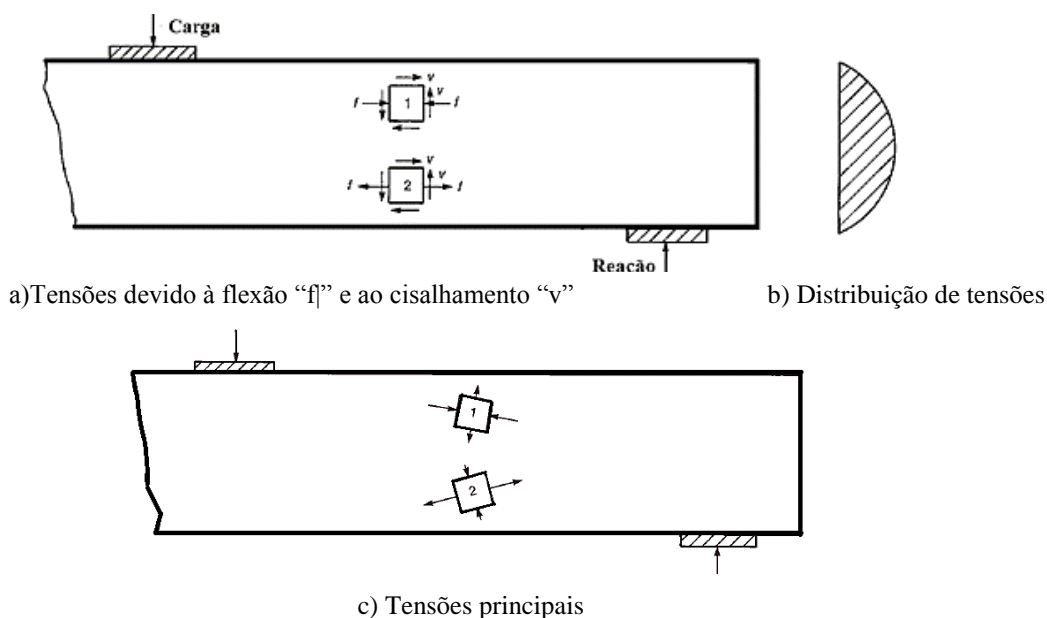
Onde as variáveis são:

- V - força cortante atuante na seção analisada;
- Q - momento estático ou momento de primeira ordem;
- I - momento de inércia ou momento de segundo ordem;
- b - largura do elemento na seção analisada.

As tensões de cisalhamento são iguais e existem em ambos os planos, vertical e horizontal por meio de um elemento, como mostrado na Figura 3.1. As tensões oriundas da força cortante na parte superior e na parte inferior dos elementos formam binário no sentido horário e os lados verticais do elemento formam outro binário no sentido anti-horário. Estes dois pares são iguais e possuem mesma grandeza e são opostos e, portanto, se anulam. (MACGREGOR ; WIGHT, 2012).

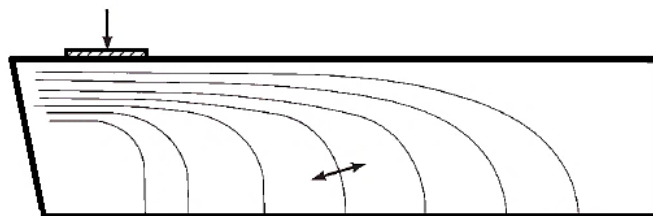
A teoria atribui que os elementos na Figura 3.1 letra a) são submetidos a ações combinadas normais devido à flexão, “ f ”, e tensões de cisalhamento, “ v ”. As orientações das tensões principais sobre os elementos são apresentados na Figura 3.1, letra c).

Figura 3.1 – Tensões atuantes em uma viga não fissurada. [Adaptação de (MACGREGOR ; WIGHT, 2012)]



Para uma peça sem armadura transversal, no caso de viga ou lajes, o aparecimento de fissuras inclinadas se dá a partir de fissuras de flexão, caracterizando um padrão de fissuração semelhante ao das trajetórias das tensões principais. A Figura 3.2 apresenta o percurso dessas fissuras.

Figura 3.2 - Fluxo das tensões nas peças sem armadura transversal. [Adaptação de (MACGREGOR ; WIGHT, 2012)]



3.2 MECANISMO DE RUPTURA DE LAJES ALVEOLARES SUBMETIDAS À FORÇA CORTANTE

A literatura descreve quatro formas típicas de ruptura por força cortante em lajes alveolares: flexo-cortante, tração diagonal, compressão e falha na ancoragem de armadura de protensão.

Marquesi (2014), em sua pesquisa, abordou os dois principais tipos de ruptura, isto é, flexo-cortante e tração diagonal. Palmer e Schultz (2009) também descrevem em seu trabalho esses mesmos tipos de ruptura e afirmam que diversos fatores podem influenciar no tipo de ruptura. A tração diagonal ocorre frequentemente em elementos com nervuras relativamente finas, com elevados níveis de protensão e situações onde o carregamento é concentrado próximo ao apoio. Já a ruptura por flexo-cortante ocorre em situações contrárias.

3.2.1 Flexo-cortante

O mecanismo de flexo-cortante é o resultado das forças cortantes e momentos fletores atuando conjuntamente na peça estrutural. De acordo com Marquesi (2014), o mecanismo flexo-cortante é difícil de ser analisado, pois tensões complexas de redistribuição ocorrem após a fissuração e essas tensões são influenciadas por muitos fatores. Por esta razão, equações empíricas foram desenvolvidas elegendo as variáveis mais importantes e calibrando-as com ensaios (Figura 3.5).

Macgregor e Wight (2012) citam os principais fatores que influenciam a capacidade resistente à flexo-cortante para peças sem armadura transversal. São cinco os fatores principais que podem influenciar a capacidade resistente ao mecanismo de flexo-cortante.

- ◆ Resistência à tração do concreto;
- ◆ Taxa de armadura longitudinal;
- ◆ Efeito escala;
- ◆ Influência do esforço axial;
- ◆ Tipo e tamanho do agregado;

Marquesi (2014) apresenta os mecanismos básicos para a transferência de esforço cortante ao longo da fissura crítica em elementos sem armadura transversal. Para o autor, esses mecanismos são: V_1 , que representa a parcela transmitida pelo banzo comprimido pela flexão, e V_2 , que representa a parcela correspondente às tensões residuais de tração devido às “pontes de concreto” ao longo da fissura. Já V_3 representa a rugosidade local existente ao longo das fissuras, sendo tanto maior quanto maior forem os agregados. Assim, uma rugosidade significativa devido aos agregados contribui para impedir o escorregamento das faces da fissura, transmitindo assim o esforço cortante. Por fim, V_4 refere-se à armadura longitudinal que contribui para re-

sistência à força cortante devido ao efeito de pino, além de combater maiores aberturas de fissuras e contribuindo com os outros mecanismos de transferência de esforço. A Figura 3.3 apresenta esses mecanismos de ruptura.

Figura 3.3 - Mecanismos básicos de transferência de força cortante. (MARQUESI, 2014)

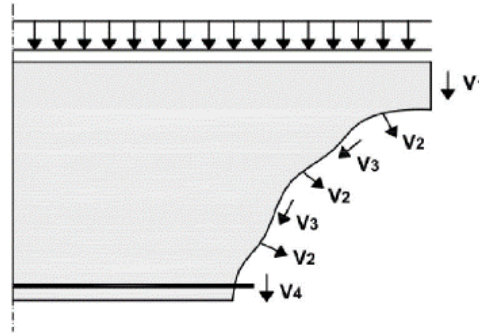


Figura 3.4 – Fatores que influenciam no mecanismo flexo-cortante. [Adaptação de (SANTOS, 2014)]

EUROCODE 2: 2004	
<i>taxa de armadura</i>	<i>efeito da protensão</i>
$V_{Rd1} = \left\{ 0,18 \left[\frac{1 + \sqrt{200/d}}{d} \right] \cdot \sqrt{100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck}} \right\} \cdot b_w \cdot d + 0,15 \sigma_{cp} \cdot b_w \cdot d$	
<i>Fator escala</i>	<i>tensão de tração</i>
NBR 6118:2014	
<i>tensão de tração</i>	<i>taxa de armadura</i>
$V_{Rd1} = \left[0,25 \cdot f_{ctd} \cdot (1,6 - d) (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$	
<i>Fator escala</i>	<i>efeito da protensão</i>

3.2.2 Tração diagonal

Nos ensaios de lajes alveolares submetidas à força cortante, o mecanismo de ruptura por tração diagonal do concreto é o mais comum. Esse tipo de ruptura ocorre quando a tensão principal de tração se iguala ao valor da resistência à tração do concreto. A característica predominante é a formação de uma fissura inclinada próximo ao apoio da laje. As tensões normais (σ_x) e cisalhantes (τ) em um elemento nessa região podem ser escritas como:

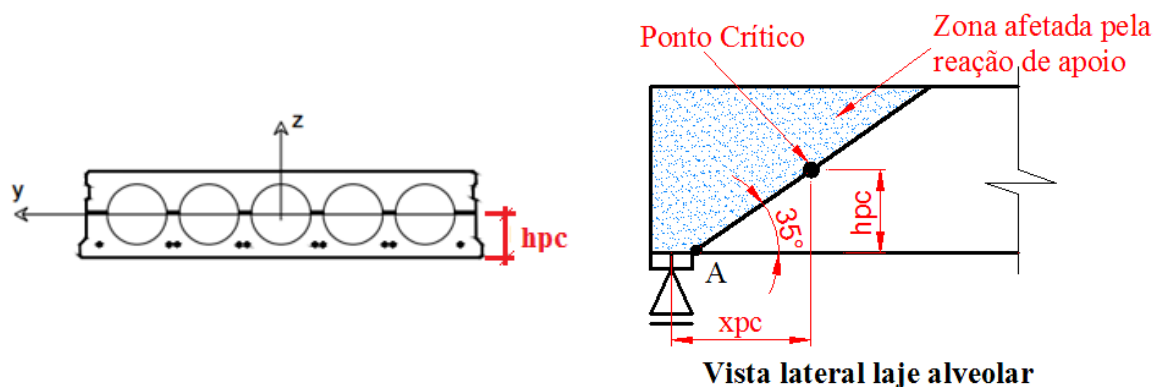
$$\sigma_x = -\frac{P(x)}{A} \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{S_y(z)}{b(z) I_y} V \quad (3.3)$$

Onde P é a força normal de protensão; A é a área da seção transversal; x é a posição longitudinal da seção analisada a partir do centro do apoio; $S_{y,(z)}$ é o momento estático em relação a fibra da seção transversal localizada na altura z ; b é a largura da seção transversal na altura z ; I_y é o momento de inércia principal da seção; e, por fim, V é a força cortante.

Essas tensões se combinam de modo que sejam máximas em um ponto crítico com coordenadas (h_{pc}, x_{pc}) . Para lajes com alvéolos circulares, h_{pc} é a distância do centro de gravidade da seção à fibra inferior e x_{pc} é a distância horizontal do centro do apoio ao ponto crítico, tomada igual a $h/2$ (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Posição do ponto crítico pelo modelo tradicional de cálculo da tração diagonal. [Adaptação de (PAJARI, 2005)]



Ao assumir que a ruptura por tração diagonal ocorre quando a máxima tensão principal σ_1 na alma ou nervura do elemento atinge a resistência à tração do concreto, tem-se:

$$f_{ct} = \sigma_1 = -\frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(-\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (-\tau)^2} \quad (3.4)$$

Substituindo as equações (3.2) e (3.3) na equação (3.4) e, ainda, admitindo $z = 0$ e isolando V , tem-se:

$$V = \frac{b I_y}{S_y} \sqrt{f_{ct}^2 + \frac{P(x)}{A} f_{ct}} \quad (3.5)$$

A norma Americana ACI 318 (ACI, 2008) a resistência ao cisalhamento devido à tração diagonal adota a equação (3.14). São adotadas algumas simplificações, elas são mostradas abaixo:

$$\sigma_1 = f_{ct} = 0,29\sqrt{f'_c} \quad (3.6)$$

$$d = \frac{1}{M_e} \quad (3.7)$$

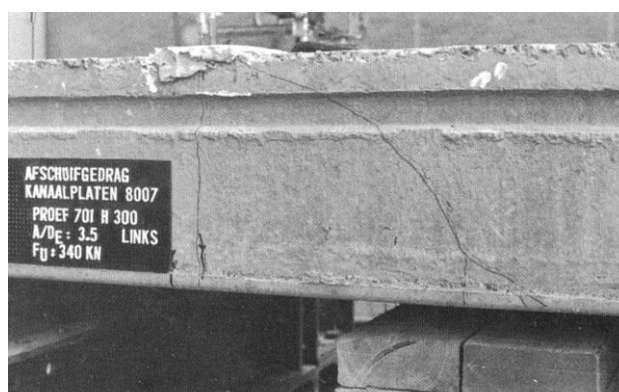
$$\sigma_x = 0,3 \sigma_{cp} = 0,3 f_{pc} \quad (3.8)$$

$$V_{cw} = (0,29\sqrt{f'_c} + 0,3 f_{pc})b_w d \quad (3.9)$$

3.2.3 Ruptura da nervura por compressão devida ao cisalhamento

Esse tipo de fissura acontece quando a tensão principal de compressão na nervura alcança a resistência do concreto à compressão. Catóia (2011) conceitua que esse tipo de ruptura pode acontecer na região de concreto entre fissuras inclinadas de cisalhamento e, assim, pode colaborar com o surgimento de novas fissuras por conta da tensão de compressão elevada e da tensão de tração perpendicular a ela. Esse tipo de abertura de fissura durante o ensaio de resistência à força cortante é conhecido como ruptura por compressão devida ao cisalhamento. Os pesquisadores Mercx e Walraven (1983) também observaram esse tipo de ruptura, como mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Ruptura por cisalhamento devido a compressão nas nervuras. (MACGREGOR e WIGHT, 1983)



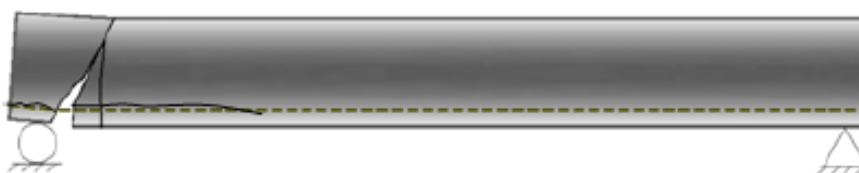
Segundo Kong e Evans (2001), quando a carga concentrada está aplicada a uma distância do apoio que respeita a relação $1 < a/d < 2,5$, frequentemente a fissura diagonal se forma independentemente e não como desenvolvimento de uma fissura de flexão. A peça usualmente permanece estável após tal fissuração. Neste caso, o aumento adicional na força cortante irá fazer com

que a fissura diagonal penetre na zona de compressão do concreto, no ponto de carregamento, até, eventualmente, ocorrer a ruptura por esmagamento do concreto.

3.2.4 Falha de ancoragem dos cabos

Para a pré-tração, a transferência da força da protensão faz-se por meio da aderência aço-concreto, não havendo dispositivo de ancoragem ou de distribuição de tensão. Em princípio, as armaduras ativas pré-tracionadas apresentam comportamento similar ao das armaduras passivas quanto à aderência, existindo os fenômenos de adesão, atrito e engrenamento mecânico. Segundo Catóia (2011), no Estado Limite Último ocorre o deslizamento da armadura ativa e um estado de tensões complexo, causando a fissuração no concreto como mostrado na Figura 3.8

Figura 3.7 - Ruptura combinada: cisalhamento, flexão e escorregamento da armadura ativa. (ANTUNES, 2012)



Nesse tipo de ruptura, ocorre a formação de fissuras inclinadas a partir da borda da laje combinada a fissuras horizontais na região de posicionamento das cordoalhas devido à falta de ancoragem.

Figura 3.8 - Detalhe característico da fissuração ao redor das cordoalhas por perda de ancoragem.

(FRANÇA, 2012)



3.3 MODELOS DE CÁLCULO PARA LAJES ALVEOLARES

Neste item são apresentados, de maneira breve, alguns modelos de cálculo nacionais e internacionais que contemplam o cálculo da resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas.

3.3.1 NBR 14861 (ABNT, 2011)

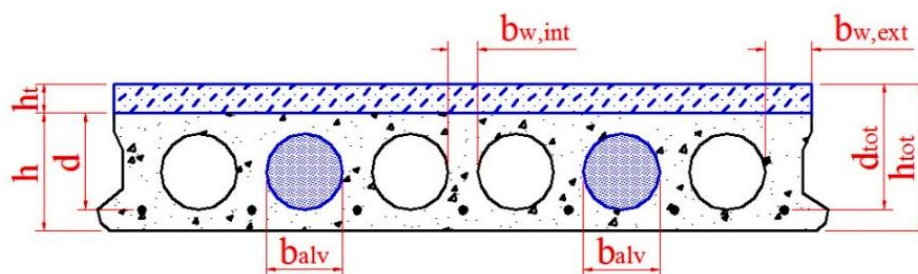
Essa norma estabelece os requisitos e os procedimentos a serem atendidos nos projetos, nas etapas de produção e montagem das lajes alveolares protendidas. Para o cálculo da resistência ao esforço cortante, a norma NBR 14861 (ABNT, 2011) apresenta formulações que indicam o mecanismo de ruptura por flexo-cortante, que são relativas às regiões fissuradas com presença de flexão.

As equações contemplam situações de lajes simples ou com a presença de capa estrutural, lajes com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão e, ainda, equações para as lajes em que os alvéolos foram preenchidos após a liberação da protensão.

Na Figura 3.9 é mostrado um exemplo de seção transversal de uma laje alveolar protendida, com aplicação de capa estrutural e preenchimento de alvéolos com simetria. Nela são indicadas as variáveis utilizadas no cálculo da resistência à força cortante das lajes alveolares protendidas.

Figura 3.9 - Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e alvéolos preenchidos.

[Adaptação da NBR 14861 (ABNT, 2011)]



Legenda

- Alvéolo sem preenchimento
- Alvéolo com preenchimento
- Capa estrutural

Realizando o preenchimento dos alvéolos e/ou a moldagem da capa estrutural na laje alveolar, poderá aumentar a resistência à força cortante. No caso do preenchimento dos alvéolos, o comprimento longitudinal de preenchimento ao longo da laje deve ser maior que o valor de L_{pr} , isto é:

$$L_{pr} = l_{pt2} + l_{fc} \quad (3.10)$$

Onde:

l_{pt2} - valor superior de projeto para o comprimento de transmissão 85ϕ ;

\emptyset - diâmetro da cordoalha;

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

A equação (3.11) é recomendada para a determinação da força cortante resistente de cálculo (V_{Rd1}) para laje alveolar com ou sem a presença de capa estrutural.

$$V_{Rd1} + V_{p,1} \quad (3.11)$$

Nessa equação, as duas parcelas resistentes são calculadas como:

$$V_{c,1} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40 \rho_1) \sum b_{w,1} d \quad (3.12)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \sigma_{cp,1} b_{w,1} d \quad (3.13)$$

$$\sum b_{w,1} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} \quad (3.14)$$

A taxa de armadura da seção transversal da laje alveolar protendida, a tensão de compressão devida à protensão e, ainda, o fator de escala k são apresentados nas equações seguintes:

$$\rho_1 = \frac{A_s}{(\sum b_{w,1} d)} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \alpha \quad (3.16)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1 \quad (3.17)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (3.18)$$

Onde:

A_c - área da seção transversal;

N_p - força normal de protensão;

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

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

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

$\sum b_{w,1}$ - somatório das nervuras (internas e externas, conforme figura 2.24) da laje;

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

α - relação entre a distância da seção x estudada a partir do final da laje e o valor do comprimento de transmissão;

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

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

3.3.2 Preenchimento de alvéolos antes da liberação de protensão

Nas condições em que as lajes alveolares possuem alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão, a equação (3.19) é utilizada para o cálculo da força cortante resistente de cálculo.

$$V_{Rd1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (3.19)$$

Sendo:

$$V_{c,2} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40\rho_2) \sum b_{w,2} d \quad (3.20)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \sigma_{cp,2} \sum b_{w,2} d \quad (3.21)$$

$$\sum b_{w,2} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} + 0,5 n b_{alv} \frac{E_c}{E_p} \quad (3.22)$$

$$\rho_2 = \frac{A_s}{(\sum b_{w,2} d)} \quad (3.23)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \alpha \quad (3.24)$$

$$A_{c,2} = A_c + n A_{alv} \quad (3.25)$$

Onde:

$V_{RD1,a1}$ - força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

- $\sum b_{w,2}$ - somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos;
- ρ_2 - corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje pré-moldada com alvéolo preenchido;
- $\sigma_{cp,2}$ - tensão de compressão do concreto devida à força de protensão de projeto para o caso da laje com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;
- n - quantidade de alvéolos preenchidos ($n \leq 2$).

A NBR 14861 (ABNT, 2011) faz ressalvas para aplicação de preenchimento em mais de dois alvéolos. O Item 7.3.2.7 orienta que

De acordo com o item 7.3.2.7 da NBR 14861 (ABNT, 2011) orienta que a consideração em projeto de mais do que dois alvéolos preenchidos, pode ser feita desde que fundamentada em evidência científica, com base na literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental. Se adotada comprovação experimental, recomenda-se a utilização dos arranjos de ensaio apresentados na EN 1168 (CEN, 2008). A consideração em projeto de mais do que dois alvéolos preenchidos podem ser feitos desde que fundamentada em evidência científica, com base na literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental. Se adotada comprovação experimental, recomenda-se a utilização dos arranjos de ensaio apresentados na EN 1168 (CEN, 2008).

A área da seção transversal do alvéolo, apresentada pela variável A_{alv} com seção circular é calculada pela equação:

$$A_{alv} = \frac{\pi b_{alv}^2}{4} \quad (3.26)$$

b_{alv} - largura horizontal do alvéolo a ser preenchido.

E_c / E_p - relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado no local (E_c) e o módulo de elasticidade do concreto pré-moldado (E_p);

Outra situação de projeto que ocorre é quando os alvéolos são preenchidos após a liberação da protensão na pista. Assim, a força cortante resistente é calculada pela somatória das seguintes parcelas:

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (3.27)$$

A NBR 14861 (ABNT, 2011) esclarece que o preenchimento dos alvéolos pode ser realizado antes ou depois da liberação da protensão, segundo critério de projeto. Porém o momento do preenchimento do alvéolo influencia nas considerações de cálculo.

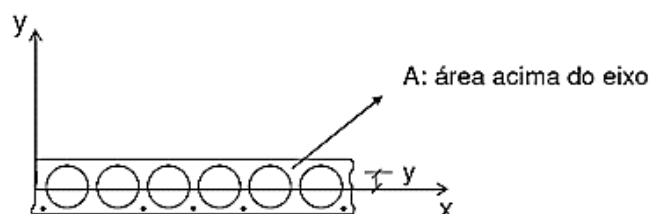
3.3.3 EUROCODE 2

A norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004) para projetos de estruturas de concreto recomenda para as peças protendidas em um único vão, sem armadura de cisalhamento, que a força cortante resistente nas regiões não fissuradas à flexão seja calculada pela equação (3.28).

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (3.28)$$

Onde I corresponde ao momento de inércia à flexão; b_w é a menor largura da seção transversal na área tracionada (mm); e S representa o primeiro momento de área, ou momento estático da seção, acima e em relação ao eixo que passa no centroide da seção transversal (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Momento estático. (CATÓIA, 2011)



α_1 - $l_x / l_{pt2} \leq 1$ para armaduras pré-tracionadas e $\alpha_1 = 1$ para outros tipos de protensão;

l_x - distância da seção considerada, a partir do ponto inicial do comprimento de transmissão

l_{pt2} - valor do limite superior do comprimento de transmissão da armadura protendida, equivalente a $1,2 l_{pt}$;

l_{pt} - comprimento de transmissão da armadura protendida;

τ_{cp} - tensão de compressão do concreto no eixo central devida à força de protensão;

f_{ctd} - resistência à tração do concreto, valor de cálculo.

Para as lajes compostas, onde há a presença da capa estrutural, a equação 3.29 é indicada pela FIP (1998) para determinar a força cortante resistente.

$$V_{II,d} = b_w \frac{I_0}{S_0} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha f_{ctd} \sigma_{cpm}} - V_{I,d} \left[\frac{I_0}{I} \frac{S}{S_0} \right] \quad (3.29)$$

O momento de inércia da peça composta é representado por I_0 ; I é o momento de inércia da laje alveolar; b_w corresponde somatório das larguras das nervuras das unidades da peça composta; S é o momento estático da laje alveolar; S_0 se aplica ao momento estático da peça composta; f_{ctd} é a resistência à tração, valor de projeto, do concreto pré moldado da laje; a tensão de compressão no concreto devida à força de protensão é apresentado por σ_{com} ; $V_{I,d}$ é o valor igual ao da resistência à força cortante de projeto para laje sem capa $V_{Rd,c}$ e por fim α corresponde ao fator de redução devido ao fato que na região crítica a pré-tração ainda não está totalmente desenvolvida.

Segundo a FIP (1998), para verificar a resistência ao cisalhamento de uma laje alveolar com alvéolos preenchidos, é acrescida a parcela referente ao preenchimento dos alvéolos, onde considera-se a contribuição de apenas 2/3 dos alvéolos, como mostrada na equação 3.30:

$$V_{Rd} = V_0 + \frac{2}{3} n b_c d f'_{ctd} \quad (3.30)$$

Sendo:

V_0 - resistência à força cortante da laje alveolar;

n - número de alvéolos preenchidos;

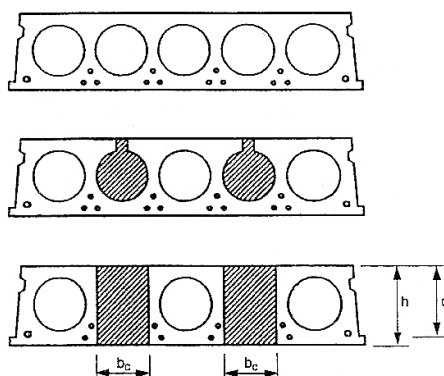
b_c - largura dos alvéolos preenchidos quando transformados em uma seção retangular equivalente;

d - altura do topo da laje alveolar até as cordoalhas;

f'_{ctd} - resistência à tração do concreto dos alvéolos, valor de projeto.

A largura dos alvéolos preenchidos é obtida efetuando a transformação dos alvéolos preenchidos em uma seção retangular equivalente, como mostrado na abordagem simples da Figura 3.11.

Figura 3.11 - Parâmetro de cálculo para lajes com alvéolos preenchidos. FIP (1998)



Já nas regiões submetidas à flexão, a norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004) recomenda para as lajes protendidas em um único vão, sem armadura de cisalhamento, que a resistência ao cisalhamento nas regiões fissuradas à flexão seja calculada por:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp}] b_w d \quad (3.31)$$

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0 \quad (3.32)$$

A taxa de armadura longitudinal da laje é representada por ρ_1 e é calculada pela equação que relaciona a área da armadura de tração, largura da seção transversal.

$$\rho_1 = A_{st} / b_w d \leq 0,2; \quad (3.33)$$

A_{st} - é a área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ além da seção considerada e b_w é a menor largura da seção transversal na área tracionada (mm);

$$\sigma_{cp} = N E_d / A_c < 0,2 f_{cd} \quad (3.34)$$

$N E_d$ - força normal na seção devida às ações aplicadas ou a protensão (N);

A_c - área da seção transversal de concreto (mm²);

$V_{Rd,c}$ - força cortante resistente de cálculo (N).

A norma europeia EN 1168 (CEN, 2008) recomenda a equação (3.35) para avaliar a força cortante resistente de cálculo em zonas não fissuradas à flexão, admitindo que as lajes alveolares não possuem armadura de cisalhamento e o mecanismo de ruptura aconteça em regiões não fissuradas à flexão (onde a tensão de tração seja menor do que $f_{ctd} = f_{ctk 0,05} / \gamma_c$).

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w(y)}{S(y)} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp}(y) f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right) \quad (3.35)$$

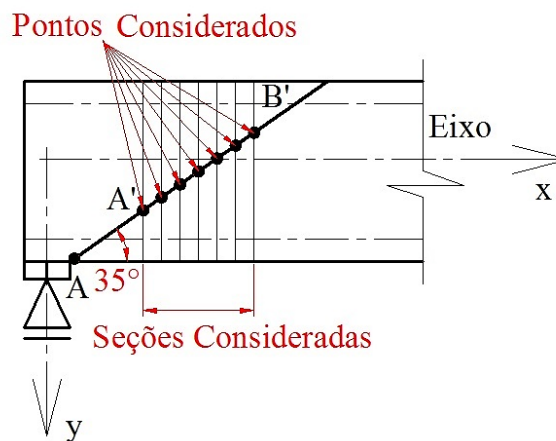
Onde:

$$\sigma_{cp}(y) = \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{A_i} + \frac{(Y_c - y)(Y_c - Y_{pt})}{I} \right] P_t(I_x) \right\} - \frac{M_{Ed}}{I} (Y_c - y) \quad (3.36)$$

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{A_c(y)}{A_i} - \frac{S_c(y)(Y_c - Y_{pt})}{I} + C_{pt}(y) \right] \frac{dP_t(I_x)}{d_x} \right\} \quad (3.37)$$

Essa expressão deve ser aplicada tendo como referência um segmento de reta, interpretada como linha de ruptura, que tem como ponto inicial a face interna do apoio e possui um ângulo de inclinação de 35° em relação ao eixo horizontal. A posição onde o resultado da expressão do $V_{Rd,c}$ for menor é o ponto crítico. A Figura 3.12 esboça os pontos considerados para a determinação do ponto crítico.

Figura 3.12 - Pontos adotados sobre a linha inclinada para determinar a posição do ponto crítico. [Adaptado de Pajari (2005)]



As variáveis dessas equações são:

I - momento de inércia da seção transversal da laje alveolar;

$b_w(y)$ - largura da seção transversal na altura y ;

Y_c - altura do centro de gravidade da seção da laje;

$S_c(y)$ - momento estático da área acima da altura y em relação ao centro de gravidade da laje;

- y - altura do ponto analisado na linha de ruptura em relação a parte inferior da laje;
- l_x - distância do comprimento de transferência da protensão até a projeção do ponto crítico
- $\sigma_{cp}(y)$ - tensão de compressão no ponto a y do eixo vertical e l_x do eixo horizontal;
- n - número de camadas de cordoalhas;
- A_i - área da seção transversal da laje;
- $P_t(l_x)$ - força de protensão na camada de cordoalha em relação ao comprimento l_x ;
- M_{ed} - momento fletor devido às cargas verticais, que neste caso pode ser desconsiderado ($M_{ed}=0$);
- $\tau_{cp}(y)$ - tensão de cisalhamento no ponto a y do eixo vertical e l_x do eixo horizontal;
- $A_c(y)$ - área da seção transversal acima da altura y da laje;
- $C_{pt}(y)$ - fator que leva em conta a posição da camada de cordoalha considerada;
- $C_{pt} = -1$ se $y \leq y_{pt}$
- $C_{pt} = 0$ se $y > y_{pt}$
- y_{pt} - altura da camada de cordoalhas considerada, em relação ao eixo inferior da laje;

Como alternativa às expressões acima, a EN 1168 (CEN, 2008) modifica a formulação do EUROCODE 2 (CEN, 2004) para o cálculo da resistência a força cortante em regiões não fissuradas à flexão. E adiciona coeficientes redutores de resistência, onde $\varphi=0,80$ é o fator redutor global e $\beta=0,90$ é o fator redutor da contribuição da protensão.

$$V_{Rdc} = \varphi \frac{Ib_w}{S} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \beta \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \right) \quad (3.38)$$

A norma faz uma ressalva quanto às peças com altura maior que 450 mm, onde a resistência à força cortante, seja em regiões fissuradas ou não por flexão, deve ser minorada por um fator de redução global de 0,90.

3.3.4 ACI 318 (ACI, 2008)

Para o ACI 318 (ACI, 2008) a resistência nominal à força cortante da laje alveolar deve ser o menor valor entre a força cortante resistente relativa ao mecanismo de flexo-cortante (ϕV_{ci}) e a

força cortante resistente relativa à tração diagonal (ϕV_{cw}), sendo ϕ o fator de redução para cálculo de cisalhamento igual a 0,75.

A força cortante resistente relativa à tração diagonal pode ser calculada por:

$$V_{cw} = (0,29 \sqrt{f'_c} + 0,3 f_{pc}) b_w d_p + V_p \quad (3.39)$$

f'_c - resistência cilíndrica do concreto a compressão;

f_{pc} - tensão resultante de compressão no concreto no centro da seção transversal;

b_w - largura total da nervura;

d_p - distância da extremidade da fibra comprimida ao centro da armadura protendida, que deve ser maior que $0,80.h$;

h - altura total da laje, incluindo a capa de concreto;

V_p - componente vertical da força efetiva de protensão, para cordoalhas retas essa componente é nula.

Já a força cortante resistente relativa ao mecanismo de flexo-cortante pode ser calculada por:

$$V_{ci} = 0,05 \sqrt{f'_c} b_w d_p + V_d + \left(V_i M_{cre} / M_{max} \right) \geq 0,14 \sqrt{f'_c} b_w d_p \quad (3.40)$$

V_d - força cortante na seção devida à carga permanente, sem fator de segurança;

V_i - força cortante de cálculo na seção, devida a forças externas, ocorrendo simultaneamente com $M_{máx}$;

M_{max} - momento máximo de cálculo na seção devido às forças externas;

M_{cre} - momento causador da fissuração na seção, provocado pelas forças externas;

$$M_{cre} = (I/Y_t) (0,5 \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad (3.41)$$

A variável f_d é a tensão de tração ocasionada pela ação da carga permanente, sem fator de segurança e na fibra externa da seção; f_{pe} representa a tensão de compressão no concreto devido ao efeito da força de protensão, posterior às perdas, na fibra extrema da seção, onde a tensão de tração é causada por forças externas; e Y_t é a distância do eixo da seção bruta, desprezando a armadura, até a face tracionada.

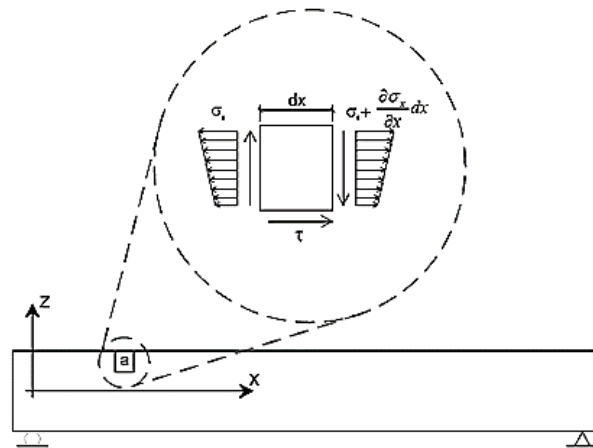
3.3.5 Modelo de Yang

Se a resistência à tração do concreto é elevada na nervura da laje alveolar, numa região não fissurada por flexão, uma fissura inclinada pode ocorrer quando a tensão principal de tração na nervura se iguala à resistência a tração do concreto. A fissura diagonal propaga-se tanto para cima quanto para baixo e a ruptura é brusca. Esse é o mecanismo típico de ruptura por tração diagonal.

O modelo de cálculo tradicional não contemplava o efeito das tensões de protensão. Então, Yang (1994) apresentou um modelo de cálculo considerando o efeito das tensões adicionais devido à protensão. O autor também apresentou as coordenadas de localização do ponto crítico (x_{pc} , h_{pc}).

A formulação para a tração diagonal desenvolvida por Yang (1994) inicia-se do diagrama de corpo livre de um elemento infinitesimal a e comprimento dx em uma peça bi-apoiada, exibido na Figura 3.13.

Figura 3.13 - Diagrama de tensões no elemento "a". (MARQUESI, 2014)



Para demonstrar o equilíbrio horizontal do elemento a , as parcelas são mostradas na equação (3.42):

$$-\int_{z_0}^{z_t} \sigma_x b(z) dz + \tau b(z) dx + \int_{z_0}^{z_t} \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) b(z) dz = 0 \quad (3.42)$$

Simplificando a equação (3.42), e aplicando os limites de integração do elemento a , a equação apresentará a seguinte forma:

$$\tau = \frac{1}{b(z)} \int_{z_0}^{z_t} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dA \quad (3.43)$$

Tendo a tensão normal a equação (3.44), e posteriormente generalizando-a, chega-se a equação (3.45).

$$\sigma_x = -\frac{P(x)}{A} \quad (3.44)$$

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} + Pe \frac{z}{I_y} - M \frac{z}{I_y} \quad (3.45)$$

A variável e é a excentricidade de protensão e M é o momento fletor atuante. Derivando a equação (3.45) em função de x , tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{ez}{I_y} \frac{\delta P}{\delta x} - \frac{z}{I_y} \frac{\delta M}{\delta x} \quad (3.46)$$

Reescrevendo a equação (3.46), tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \left(-\frac{1}{A} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{ez}{I_y} \right) \frac{\delta P}{\delta x} - \frac{z}{I_y} V \quad (3.47)$$

Inserindo a equação (3.47) na equação (3.43),

$$\tau = -\frac{1}{b(z)} \left[\frac{\partial P}{\partial x} \left(-\frac{1}{A} \int_{z_0}^{z_t} dA + \frac{e}{I_y} \int_{z_0}^{z_t} z dA \right) - \frac{V}{I_y} \int_{z_0}^{z_r} z dA \right] \quad (3.48)$$

Com $b(z)=b_0$ e $\int_{z_0}^{z_t} dA = A_0$, $\int_{z_0}^{z_t} z dA = S_0$ a equação (3.48), apresenta a seguinte configuração:

$$\tau = -\frac{1}{b_0} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_0}{A} - \frac{eS_0}{I_y} \right) + \frac{VS_0}{b_0 I_y} \quad (3.49)$$

A variável A_0 representa a área acima do ponto no qual a tensão de cisalhamento é calculada, S_0 corresponde ao momento estático em relação a este ponto e b_0 é a largura da seção transversal na altura analisada. As parcelas de tensão de cisalhamento, τ_p corresponde a introdução da protensão e τ_c representa a parcela do carregamento.

$$\tau = -\frac{1}{b_0} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_0}{A} - \frac{eS_0}{I_y} \right) + \frac{VS_0}{b_0 I_y} \quad (3.50)$$

$$\tau_c = \frac{VS_0}{b_0 I_y} \quad (3.51)$$

Adotando $M = R_1 x_{pc} \approx V x_{pc}$ e substituindo na equação (3.45), têm-se as tensões normais e cisalhantes no ponto crítico, isto é:

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} + Pe \frac{z_{pc}}{I_y} - V x_{pc} \frac{z_{pc}}{I_y} \quad (3.52)$$

$$\tau = -\frac{1}{b_{pc}} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) + \frac{VS_{pc}}{b_{pc} I_y} \quad (3.53)$$

Quando a máxima tensão principal na nervura do elemento atinge a resistência última de tração do concreto, ocorre a ruptura por tração diagonal. A equação (3.54) representa essa situação.

$$f_{ct} = \sigma_1 = -\frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(-\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (-\tau)^2} \quad (3.54)$$

Substituindo as equações (3.52) e (3.53) em (3.54), tem-se:

$$\left(\frac{S_{pc}}{b_{pc} I_y} \right)^2 V^2 + \left[2 \frac{S_{pc}}{b_{pc} I_y} \left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f_{ct}}{I_x} x_{pc} z_{pc} \right] V + \left\{ \left[\left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) \frac{1}{b_{pc}} \frac{\partial P}{\partial x} \right]^2 - \frac{f_{ct} P}{A} + \frac{f_{ct} P}{I_y} z_{pc} e - f_{ct}^2 \right\} = 0 \quad (3.55)$$

Resolvendo a equação (3.55) em função da variável V . E considerando o ponto crítico no centro de gravidade da seção, $z_{pc}=0$, e ainda desconsiderando o gradiente de protensão, $\partial P/\partial x$, chegou-se a equação (3.56).

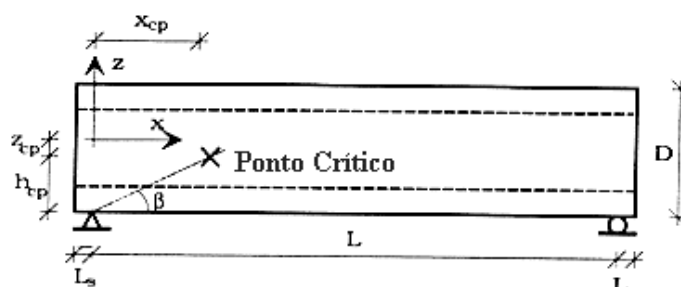
$$V = \frac{b I_y}{S} \left[\left(\frac{1}{A} \right) P f_{ct} + f_{ct} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.56)$$

Yang (1994) salienta que a coordenada do ponto crítico pode ser definida como a intersecção da altura mais frágil da nervura com uma linha traçada a partir do centro do apoio com o ângulo

de 35° com a horizontal, como apresentado na Figura 3.14. O autor também demonstrou a localização do ponto crítico com auxílio de um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos. A Figura 3.14 indica a posição do ponto crítico.

$$x_{cp} = \frac{h_{cp}}{\tan \beta} \approx \frac{h_{cp}}{0,7} \quad (3.57)$$

Figura 3.14 – Localização do ponto crítico. (YANG, 1994)



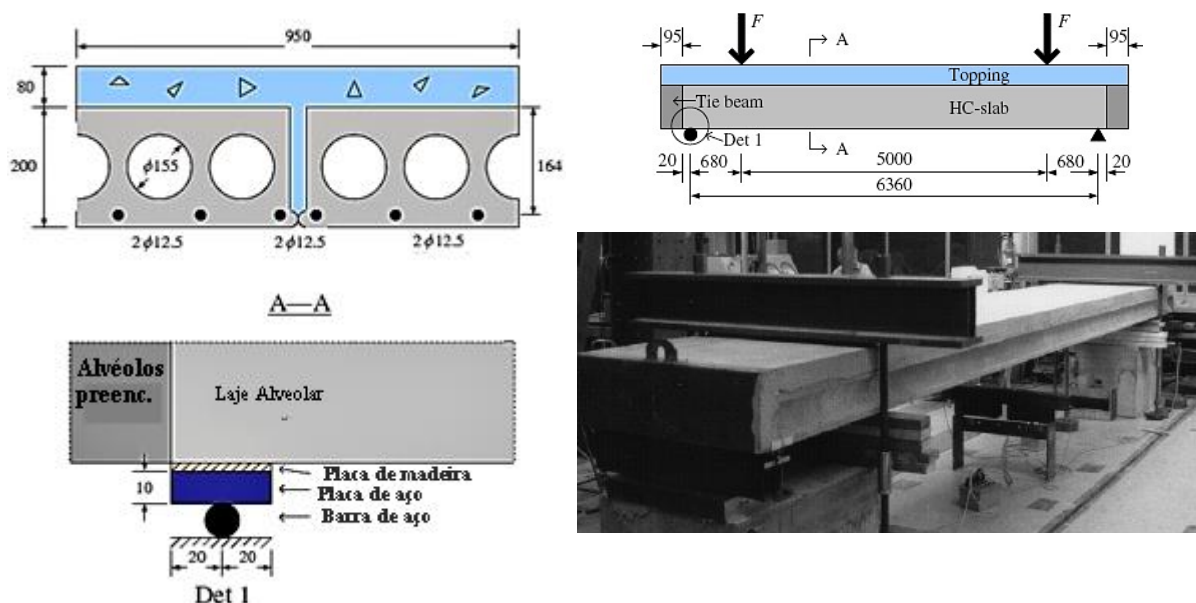
3.3.6 GIRHAMMAR E PAJARI (2008)

Girhammar e Pajari (2008) realizaram estudos experimentais e teóricos afim de verificar o comportamento da laje alveolar com capa moldada *in loco*. Os objetivos principais foram: verificar a aderência entre os concretos de interface (capa e a laje), e investigar o desempenho da laje com capa como elemento composto e o possível aumento da resistência ao cisalhamento devido à presença da capa. E, ainda, a incorporação de fibra metálica ao concreto da capa para verificar o comportamento em comparação às lajes com capa com concreto simples.

Para o programa experimental foram utilizadas lajes alveolares com 950 mm de largura, 6400 mm de comprimento e 280 mm de altura total. As lajes possuíam seis cordoalhas com diâmetro de 12,5 mm. Para confecção dos modelos que possuíam 200 mm de altura, a peça foi serrada no sentido longitudinal, as duas partes foram posicionadas de forma que as laterais externas ficassem justapostas na região central da laje. Posteriormente foi aplicada uma camada de 80 mm de altura sobre o modelo.

Para a confecção das capas sob as lajes foram utilizados dois tipos de materiais. O primeiro denominado PC para capa de concreto simples e o segundo FRC para capa com concreto reforçado com fibras metálicas, ambos com resistência à compressão estimada de 25 MPa. Não foi realizado a limpeza da superfície da laje alveolar antes de aplicar o concreto da capa a fim de avaliar a aderência entre os concretos em situação "natural". A geometria dos modelos ensaiados e a montagem dos ensaios é exposta na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Geometria do modelo e arranjo de ensaio (dimensões em mm). (GIRHAMMAR; PAJARI, 2008)



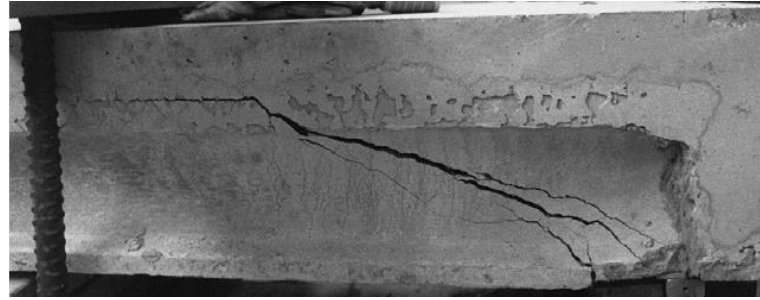
Ensaio chamados *pull-off* foram realizados para determinar a resistência à tração na interface entre a laje alveolar e a capa. O ensaio de aderência consiste na perfuração de um cilindro através da capa até o substrato da laje e logo se efetua o arrancamento.

Do total de 12 ensaios de aderência, somente três casos indicaram ruptura na interface. Nos demais casos a falha foi regulada pela resistência à tração do concreto moldado no local. Resultado interessante, pois as rupturas na interface são mais comuns por se tratar de uma região mais frágil devido à falta de ligação entre agregados.

Para os ensaios de resistência à força cortante do modelo PC, foi aplicada uma carga F que variou de 0 a 34 kN até acomodação do sistema e posteriormente a carga foi aplicada em passos de 25 kN até a ruptura da laje. A ruptura ocorreu por cisalhamento das nervuras e com ângulo de aproximadamente 30° graus, atingindo uma força última de 178,6 kN. Após a ruptura o modelo foi ensaiado na outra extremidade e a ruptura também ocorreu por cisalhamento das nervuras e com força última de 193,0 kN.

Os modelos do tipo FRC, lajes alveolares com concreto reforçado com fibra metálica foram ensaiados como no modelo PC. A primeira extremidade ensaiada atingiu força última de $F_u=136,8$ kN. A segunda extremidade rompeu com força última de $F_u=206,6$ kN e em ambas o mecanismo de ruptura foi por cisalhamento. O modelo com capa reforçada com fibra metálica obteve um aumento na resistência à compressão de 20% em relação aos modelos com capa com concreto simples.

Figura 3.16 - Fissura de cisalhamento na nervura lateral da laje. (GIRHAMMAR; PAJARI, 2008)



Devido ao número limitado de modelos ensaiados, os valores característicos experimentais para a capacidade de suporte de carga das lajes não foram determinados. Por esta razão, na análise analítica os autores utilizaram os valores médios para a resistência dos materiais a fim de tornar os resultados observados mais compatíveis.

O mecanismo de ruptura observado foi por tração diagonal e os autores apresentaram um critério para determinar a força cortante resistente baseado na tensão de tração nas nervuras, isto é:

$$\sigma_{p,\max} \leq f_{ct} \quad (3.58)$$

f_{ct} - resistência à tração do concreto da laje alveolar;

$\sigma_{p,\max}$ - tensão principal máxima na nervura da laje alveolar, chamado ponto crítico (localizado a uma distância de $x = h/2$ a partir da face interna do apoio da laje). A tensão máxima é calculada de acordo com a equação (3.59).

$$\sigma_{p,\max} = \sigma_c/2 + \sqrt{\sigma_c^2/4 + \tau_c^2} \quad (3.59)$$

A equação (3.61) apresenta as seguintes variáveis: σ_c representando a tensão normal cisalhante τ_c é a tensão cisalhante do concreto da laje alveolar. A tensão normal da laje alveolar é dada por:

$$\sigma_c = \sigma_{cp} + \sigma_{cf} \quad (3.60)$$

$$\sigma_c = -\frac{P(x = h/2)}{A_{HC}} + \frac{M_i(x = h/2)\eta_{HCT}}{I_{HCT}} \quad (3.61)$$

A força de pré tração na laje sem capa no ponto determinado por $x = h/2$ é dado por P ; A_{HC} área da laje alveolar; M_i momento na seção $x=h/2$; η_{HCT} é a distância entre os eixos do centro de gravidade da laje alveolar e a laje com alveolar com capa de concreto e I_{HCT} corresponde ao segundo momento de inércia da seção transversal.

A tensão de cisalhamento, segundo o eixo do centro de gravidade ou ao nível da espessura mínima da laje alveolar, é dada pela soma de duas parcelas, isto é:

$$\tau_c = \frac{V_{G,HCT}(x = h/2)S_{HC}}{I_{HC}b_{w,min}} + \frac{V_i(x = h/2)S_{HCT}}{I_{HCT}b_{w,min}} \quad (3.62)$$

Onde:

- $V_{G,HCT}$ - força cortante devido ao peso próprio da laje composta no ponto $x=h/2$ da laje sem capa;
- S_{HC} - primeiro momento estático da laje sem capa;
- S_{HCT} - primeiro momento estático da laje com capa;
- I_{HC} - segundo momento de inércia da laje sem capa;
- I_{HCT} - inércia da laje com capa;
- $b_{w, min}$ - somatório das nervuras da laje.

O método de cálculo de Girhammar e Pajari (2008) não levam em consideração as tensões de cisalhamento devido à força de protensão. Normalmente, estas tensões têm sido assumidas como pequenas e são negligenciadas na norma europeia EN1168 (CEN, 2008) e no EUROCODE 2 (CEN, 2004). Os autores afirmam que em muitos casos esta imprecisão resulta em superestimação da resistência ao cisalhamento calculada. Em relação ao valor econômico, o uso da capa de concreto simples aumentou o custo em menos de 10% e com fibra metálica o aumento foi de cerca de 15% em comparação com a laje alveolar sem capa de concreto.

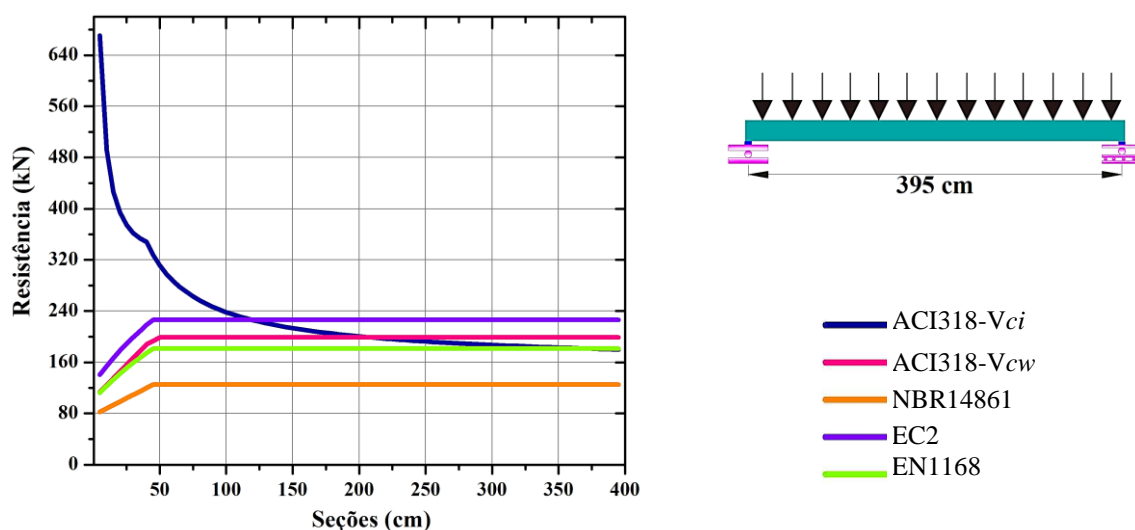
Os valores teóricos para a resistência à força cortante foram calculados pelo EUROCODE 2 (CEN, 2004) e modelo de Yang (1994) e comparados aos valores experimentais. Os autores observaram valores de resistência ao cisalhamento em média 30% a 37% maiores que os valores obtidos em ensaio, segundo o método do EUROCODE 2 e método de Yang (1994), respectivamente.

3.4 EXEMPLO DE CÁLCULO

Neste item será mostrado um exemplo de cálculo de uma laje alveolar protendida e bi-apoiada, com altura de 16 cm. Foram utilizadas formulações que contemplam o mecanismo flexo-cortante (NBR 14861 e a parcela V_{ci} do ACI 318) e ainda o mecanismo de tração diagonal (EC2,

EN1168 e a parcela V_{cw} do ACI 318). As propriedades físicas da laje, são: vão de 395 cm, $h=16$ cm; $f_{ck} = 42,6$ MPa; $f_{ctd} = 3,38$ MPa; cordoalhas inferiores ($10\phi 9,5$ mm) e cordoalhas superiores ($4\phi 6,5$ mm) e perda de proteção de 12%). A Figura 3.17 apresenta as características das curvas em função dos pontos analisados. As curvas das seções foram feitas no vão entre as faces internas dos apoios e considerou-se o carregamento distribuído oriundo do peso próprio da laje.

Figura 3.17 – Curva de resistência a força cortante.



Observa-se que a curva V_{ci} oriundo do ACI 318, possui um comportamento variante ao longo do vão da peça, esta forma inconstante é procedente da consideração direta do momento de fissuração no cálculo da resistência. A norma americana determina que a resistência a força cortante é o menor valor entre as parcelas do V_{ci} e V_{cw} na seção analisada. Nota-se que a curva procedente da parcela de tração diagonal representada por V_{cw} se comportou de maneira semelhante, estando entre às curvas do EC2 e EN1168.

As curvas definidas por EC2 e EN1168 todas com formulação por tração diagonal, são paralelas com comportamento semelhante, porém os valores das resistências provenientes da EN1168 apresentam-se com valores conservadores, pois possuem um coeficiente de minoração da resistência à força cortante.

Percebe-se que a aplicação das equações provenientes da NBR14861 a curva alcança valores com menor capacidade resistente dentre todas as normas analisadas. Porém é possível verificar que as curvas de origem de tração diagonal e pela NBR14861 possuem um crescimento até as seções próximas aos 50 cm, onde o valor de α definido pela relação entre a lx da seção analisada pelo comprimento de transmissão l_{pt2} , essa relação deve ser menor ou igual a 1.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos para execução dos ensaios nas lajes alveolares: metodologia de ensaio, a instrumentação utilizada, as características dos modelos ensaiados e os esquemas de montagem dos experimentos. Os ensaios foram executados no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil da Universidade Federal de Goiás – LABI-TECC/UFG.

4.1 ASPECTOS GERAIS E DEFINIÇÃO DO GRUPO DE LAJES ENSAIADAS

As lajes alveolares utilizadas na pesquisa foram confeccionadas e doadas por uma empresa de pré-fabricados sediada na cidade de Goiânia. Foram confeccionadas vinte lajes alveolares com a geometria mostrada na Tabela 4.1, tendo sido realizados ao todo 27 ensaios. Isso porque algumas das lajes foram ensaiadas em ambas as extremidades.

A seção transversal de projeto fornecida pela fábrica (Figura 4.1) foi verificada antes dos ensaios, quando foram identificadas diferenças em relação às dimensões de projeto. Dessa forma, todas as lajes tiveram as dimensões da seção transversal medidas no laboratório com auxílio de paquímetro e trena (Figura 4.2).

Tabela 4.1 – Propriedades geométricas médias da laje alveolar de referência

Item	Dimensões médias
Área da Laje (mm ²):	138.316,22
Altura da laje (mm):	168,79
y_{cg} (mm):	84,84
Momento de inércia I (mm ⁴):	444.670.465,89
Área do alvéolo (mm ²):	7.026,59
Distância da cordoalha inferior até a face inferior da laje (mm):	31,56
Distância da cordoalha superior até a face superior da laje (mm):	37,63

Para os alvéolos, a quantidade de amostras medidas foi determinada estatisticamente (Apêndice A). De posse das médias das dimensões reais das lajes (Figura 4.1), foram calculadas as dimensões médias das vinte lajes ensaiadas e a partir delas foram determinadas as propriedades

geométricas médias da laje alveolar que são mostradas na Tabela 4.1. De forma geral, a área da seção transversal das lajes medidas era 16,43% maior que a área informada em projeto.

Figura 4.1 - Seção transversal de projeto do modelo. Dimensões em milímetros [Adaptação de MOLD (2011)]

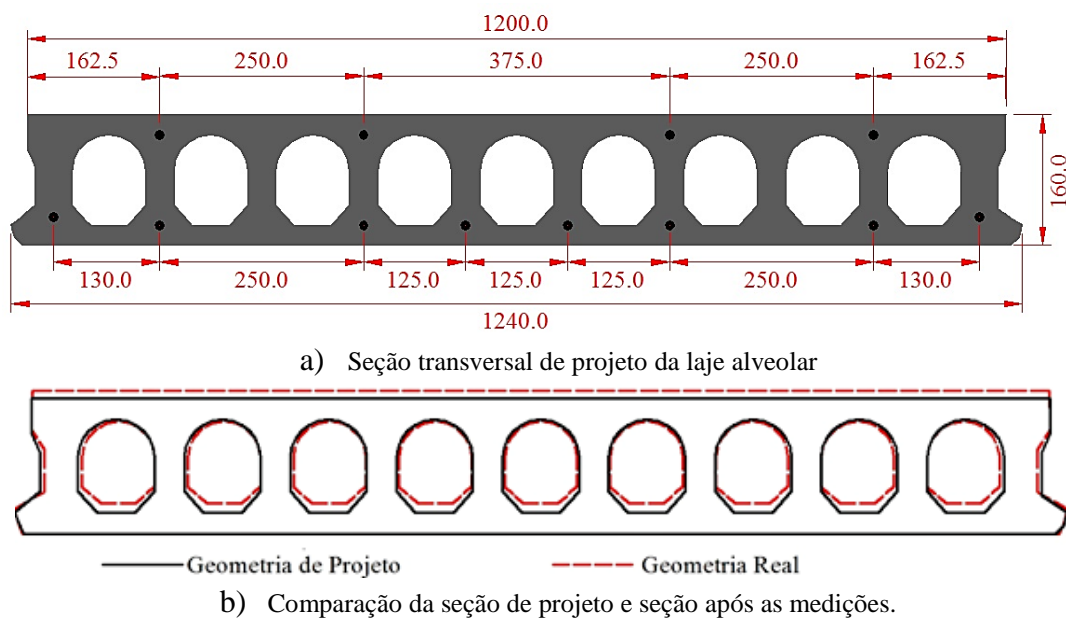


Figura 4.2 - Medições das dimensões lajes.



As lajes eram reforçadas com oito cordoalhas na face inferior e quatro cordoalhas na face superior. Na Tabela 4.2 são mostradas as propriedades das cordoalhas utilizadas na confecção das lajes bem como a tensão de protensão inicial aplicada na fábrica.

Tabela 4.2 – Características das armaduras de protensão.

Posição na laje	Tipo Cordoalhas	ϕ (mm)	N.º Cordoalhas	Força por cordoalha (kN)	Seção da cordoalha (A_p) (mm ²)	Tensão de protensão (σ_p) (MPa)
Superior	CP 190 RB	9,5	4	74,4	55,5	1.340,54
Inferior			8			1.340,54

A NBR 6118 (ABNT, 2014) no item 9.6.1.2.1 estabelece os valores limites para a operação de protensão. Nos casos de armadura pré-tracionada, a tensão de protensão inicial (σ_i) na saída do aparelho de tração, para aços de baixa relaxação, deve estar entre $0,77f_{ptk}$ e $0,85f_{pyk}$.

A concretagem das lajes ocorreu pelo método de formas deslizantes em uma pista de 120 metros de comprimento (Figura 4.3). As lajes foram moldadas e logo em seguida cobertas com lona. A utilização dessas lajes, em especial com relação à sua altura, foi definida por se tratar de uma laje típica utilizada em construções comerciais na região de Goiânia. No dia posterior à fabricação da laje foi feita a marcação, dividindo as peças de acordo com o comprimento necessário, as quais foram estocadas no pátio da empresa.

Figura 4.3 – Concretagem, corte e armazenamento das lajes alveolares



Na Tabela 4.3 é mostrada a descrição das lajes ensaiadas e as variáveis analisadas neste trabalho. Esta pesquisa dá continuidade ao trabalho desenvolvido por Antunes (2012), que foi denominada de Série I e está descrita na Tabela 2.4. Por essa razão, as lajes aqui ensaiadas foram denominadas de Série II. A nomenclatura das lajes na Tabela 4.3 representa a presença da capa de concreto (5 cm ou 9 cm), o preenchimento dos alvéolos (três ou cinco com a distribuição mostrada na Figura 4.6), o comprimento do preenchimento dos alvéolos (50 cm ou 81 cm) e a presença de um aditivo microexpansor no concreto de preenchimento dos alvéolos. Por

exemplo, MX-A-B-C-D-E significa que ela é de origem de uma das séries, M1 ou M2. A letra A representa a altura da capa estrutural (5 ou 9 cm). A letra B indica o número de alvéolos preenchidos (3 ou 5). Já a letra C foi utilizada para definir o comprimento de preenchimento do alvéolo (50 ou 81 cm) e a letra D, que recebe as letras S ou N, indica a presença ou não do aditivo microexpansor no concreto de preenchimento dos alvéolos. Por fim, a letra E indica se a laje foi ensaiada em duplicata e é representada pelas letras A e B.

Tabela 4.3 – Descrição dos grupos de lajes alveolares ensaiadas.

Laje	Altura da capa (cm)	Número de alvéolos preenchidos	Comprimento do preenchimento do alvéolo (cm)	Presença do aditivo microexpansor
Série II				
M2-A	-	-	-	-
M2-A*	-	-	-	-
M2-B	-	-	-	-
M2-B*	-	-	-	-
M3-A**	-	-	-	-
M3-B**	-	-	-	-
M2-0-3-50-S	-	3	50	S
M2-0-3-81-N	-	3	81	N
M2-0-5-50-N	-	5	50	N
M2-0-5-81-N	-	5	81	N
M2-0-5-81-S	-	5	81	S
M2-5-0-A	5	-	-	-
M2-5-0-A*	5	-	-	-
M2-5-0-B	5	-	-	-
M2-9-0-A*	9	-	-	-
M2-9-0-B*	9	-	-	-
M2-5-5-50-N-A	5	5	50	N
M2-5-5-50-N-B	5	5	50	N
M2-5-5-50-S-A	5	5	50	S
M2-5-5-50-S-B	5	5	50	S
M2-5-5-81-S-A	5	5	81	S
M2-5-5-81-S-B	5	5	81	S
M2-9-3-50-S	9	3	50	S
M2-9-5-50-N	9	5	50	N
M2-9-3-81-N	9	3	81	N
M2-9-5-81-N	9	5	81	N
M2-9-5-81-S	9	5	81	S

* É a mesma laje, porém ensaiada na extremidade oposta com vão de 3,20 m; **Lajes ensaiadas com a relação a/h igual a 2,0.

Além dos ensaios descritos na Tabela 4.3, foram realizados três ensaios de flexão, em lajes já ensaiadas à força cortante, por meio da aplicação de duas forças concentradas para determinar a perda real de protensão das lajes ao término do programa experimental.

No total foram realizados 27 ensaios. Algumas lajes foram ensaiadas em ambas as extremidades. Uma vez concluído o ensaio, a laje era reposicionada e a outra extremidade era solicitada. Com isso, no segundo ensaio a laje possuía uma extremidade em balanço e um vão de 3,20 m.

4.2 TEOR DO ADITIVO MICROEXPANSOR

O concreto de preenchimento dos alvéolos foi previamente estudado no LABITECC de modo a se determinar a quantidade ideal de adição do aditivo microexpansor para compensação da retração do concreto. Para isso, foi adotado o traço de concreto auto adensável utilizado pela fábrica, e mostrado na Tabela 4.4, que apresentava uma resistência à compressão semelhante à da laje alveolar. Os materiais utilizados no estudo do traço foram os mesmos empregados pela fábrica no preenchimento dos alvéolos. A quantidade e disposição dos alvéolos preenchidos estão dispostos na Figura 4.4.

Figura 4.4 - é mostrada a disposição dos alvéolos que foram preenchidos

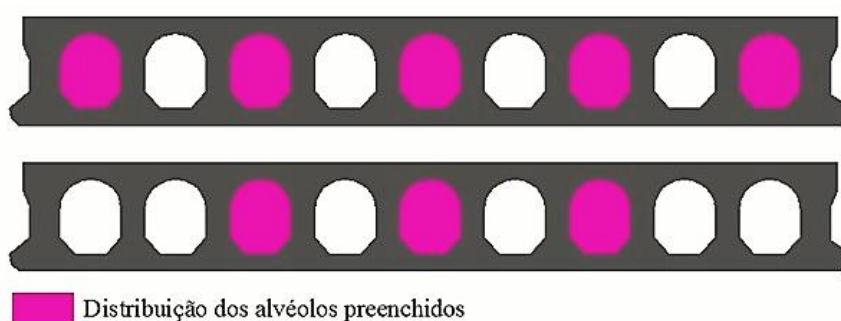


Tabela 4.4 - Traço do concreto auto-adensável para preenchimento dos alvéolos (kg/m³).

Materiais Utilizados	Cimento CII 32F	Areia Artificial	Areia Natural	Brita n° 0	Água	Aditivo superplastificante Viscocrete
Pesos dos materiais em kg/m ³ de concreto	498,18	290,94	436,41	817,02	229,16	4,48

O aditivo microexpansor utilizado foi o DRY D1 NG produzido pela empresa italiana Chimica Edile Group. Esse aditivo é uma mistura inorgânica para o cimento, livre de cloretos e outros componentes nocivos. É um pó de óxido de cálcio obtido através de um tratamento térmico especial. O aditivo é capaz de gerar grandes resultados no controle da retração higrométrica e autógena, além da remoção de macro e micro fissuras, aumento do desempenho físico/mecânico e redução da permeabilidade do concreto (CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA, 2014).

Esse aditivo é produzido mediante cozimento controlado de cal selecionada, em seguida é moído e misturado segundo relação estabelecida das frações granulométrica. A composição química desse aditivo, segundo o fabricante, é mostrada na Tabela 4.5. Já as propriedades físicas e químicas são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Composição química aditivo Dry D1 NG. [(CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA, 2014)]

Composição Química	
C _a O	30% a 95%
C _a CO ₃	5% a 35%
S _i O ₂	1% a 10%
F ₂ O ₃	0% a 1%
M _g O	0% a 2%
Al ₂ O	0% a 2%
SO ₃	0% a 1%
L.O.I	1% a 10%

Tabela 4.6 – Propriedades físicas e químicas do Dry D1 NG. [(CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA, 2014)]

Propriedades físicas e químicas	
Estado Físico:	Sólido
Forma:	Pó moído e ventilado
Cor:	Cinza- de bege a marrom
Odor:	Inodoro
pH:	12,5 em solução aguada
Ponto de fusão (°C):	2400°C cerca
Ponto de fulgor:	Não há
Limite inferior de	Não explosível
Solubilidade em água:	Cerca 1,0 g/l
Solubilidade em outros	Insolúvel em solventes

Foram dosados concretos com as seguintes quantidades de aditivo microexpansor: 6 kg/m³ (R08), 10kg/m³ (R10) e 14 kg/m³ (R07), além de uma dosagem sem o aditivo para referência (R09). Os corpos de prova para análise da retração hidráulica do concreto foram moldados de acordo com a Norma Mercosul NM 131 (ABNT, 1997).

Cada corpo de prova prismático possuía dimensões de 10x10x30 cm³. Foram moldados três corpos de prova para cada dosagem, atendendo assim ao mínimo de dois corpos de prova recomendados pela norma NM 131. Os pinos de fixação foram colocados com distância de 25 cm entre eles, ou seja, 2,5 cm de cada extremidade do corpo de prova, e na metade da largura. A Figura 4.5 mostra o posicionamento dos pinos nos corpos de prova.

Figura 4.5 - Posicionamento dos pinos nos corpos de prova para o ensaio de retração hidráulica.



Os corpos de prova permaneceram por 24 horas em temperatura ambiente envelopados com filme plástico. Depois desse período eles foram retirados da fôrma e foi realizada a leitura inicial. Para isso, foram fixados parafusos com um furo guia nos pinos colocados anteriormente nos corpos de prova. A leitura foi realizada com o auxílio de um medidor de contração constituído de um relógio comparador com precisão de 2 μm acoplado a uma placa pivotada (Figura 4.5). As leituras realizadas nos corpos de prova foram compensadas por meio da leitura em uma régua metálica padrão de modo a se descontar as deformações do corpo de prova devido à variação de temperatura.

Após a primeira leitura, os corpos de prova foram imersos em um tanque com água por um período de 30 minutos. Após esse período, eles foram retirados e outra leitura foi realizada. Os corpos de prova foram acomodados em uma sala fechada com temperatura e umidade monitorados durante 28 dias (Figura 4.6). Após esse período, os corpos de prova foram colocados para secar no ambiente do laboratório, sendo registradas a umidade e a temperatura. A frequência de leitura seguiu os critérios na NM 131 (ABNT, 1997), que inclui leituras após 3, 7, 14, 28 e 56 dias. As demais leituras foram realizadas nas seguintes datas após a moldagem dos corpos de prova: 3, 6, 9 e 12 meses. Por questão de duração da pesquisa do mestrado, as leituras foram realizadas mensalmente até o sétimo mês.

Figura 4.6 - Acondicionamento dos corpos de prova de retração hidráulica para acompanhamento e leitura.



Para calcular a variação de comprimento de cada corpo de prova, em porcentagem, a NM 131 (ABNT, 1997) apresenta a equação (4.1).

$$\Delta L = \frac{\Delta Lx - \Delta Li}{Lg} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A variável ΔL é a variação de comprimento à idade x , em porcentagem; ΔLx é a leitura do comprimento com o corpo de prova na idade x , menos a leitura do comparador com a barra de referência a idade x em mm; ΔLi é a leitura inicial do comparador com o corpo de prova menos a leitura do comparador com a barra de referência no mesmo momento, dado em mm; e, por fim Lg , é a base de medida em função do tipo de comparador utilizado (25 mm).

4.3 EXECUÇÃO DAS LAJES

As lajes alveolares foram moldadas na fábrica, por meio de forma deslizante, em pista de protensão com comprimento de 120 metros. Antes do início da moldagem foi aplicado jato de água sobre a pista de protensão para retirada do material pulverulento e/ou qualquer material contaminante durante o processo de fabricação, além de proporcionar a umidificação da superfície durante o processo. A retirada dos corpos de prova foi efetuada por amostragem ao longo da concretagem de toda a pista, visto que, foram necessárias algumas betonadas para a fabricação de toda a pista. Para a moldagem dos corpos de prova, as formas foram apoiadas sobre a máquina de fabricação das lajes para que o adensamento fosse feito pela energia de vibração do próprio equipamento moldador (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Limpeza da pista de fabricação da laje e parte da laje moldada.



a) Limpeza da pista

b) Pista concretada

c) Moldagem dos corpos de prova

As lajes alveolares que possuíam capa e/ou alvéolos preenchidos foram preparadas na fábrica sob a supervisão da pesquisadora. O preenchimento dos alvéolos foi executado após a liberação da protensão, sessenta dias após a moldagem das lajes.

Foi utilizado concreto auto adensável para o preenchimento com diâmetro de espalhamento de 71 cm, visto que a alta fluidez do concreto é importante para a diminuição dos espaços vazios dentro do alvéolo, e, assim, proporcionar maior aderência entre o concreto “velho” da laje com o concreto de preenchimento. Optou-se por preencher os alvéolos após a execução da laje de modo a simular a situação de preenchimento dos alvéolos na obra. Testes anteriores realizados por Antunes (2012) mostraram haver um bom preenchimento dos alvéolos quando se utiliza o concreto auto adensável.

O primeiro procedimento foi lavar os alvéolos com jato de água. Os alvéolos que não seriam preenchidos foram obstruídos com isopor e fixados com silicone na face da laje alveolar. Já nos alvéolos a serem preenchidos, foram posicionados tampões de isopor no final de cada comprimento de preenchimento pré-definido com o apoio de uma régua de madeira. Os alvéolos abertos foram limpos com o auxílio de uma escova a fim de evitar a contaminação do concreto, o que poderia prejudicar a aderência com o concreto de preenchimento. Esses alvéolos foram previamente umedecidos com espumas embebidas em água e secos antes do lançamento do concreto de preenchimento, simulando a situação S.S.S (superfície, saturada e seca). Alguns dos procedimentos de execução citados são mostrados na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Limpeza e posicionamento do isopor nos alvéolos.



a) Limpeza dos alvéolos

b) Colocação do tampão de isopor

c) Limpeza dos resíduos

As lajes foram posicionadas no piso uma de frente para outra para o preenchimento dos alvéolos. Nas laterais foram colocadas fôrmas para evitar o vazamento do concreto, assim como na parte inferior da abertura deixada para inserir o concreto auto adensável. Enquanto se esperava

o lançamento do concreto, foram colocadas espumas úmidas nos alvéolos para mantê-los úmidos (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Preenchimento parcial dos alvéolos das lajes.



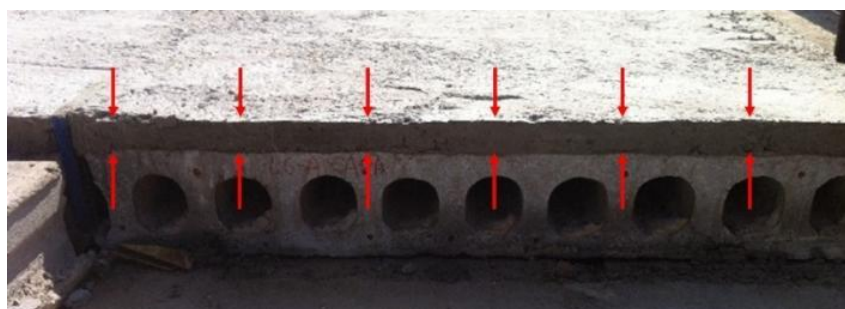
A capa de concreto de 5 cm de altura, confeccionada na fábrica, foi reforçada com uma tela eletro-soldada Q-92 (fios com diâmetro de 4,2 mm espaçados a cada 15 cm), escolhida por ser a tela mais usual nos projetos de capeamento da região (ANTUNES, 2012). Cuidados como limpeza da superfície para retirada de material pulverulento com jato de água e manutenção da umidade foram tomados para garantia de uma melhor aderência da capa ao substrato (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Procedimento para capeamento das lajes.

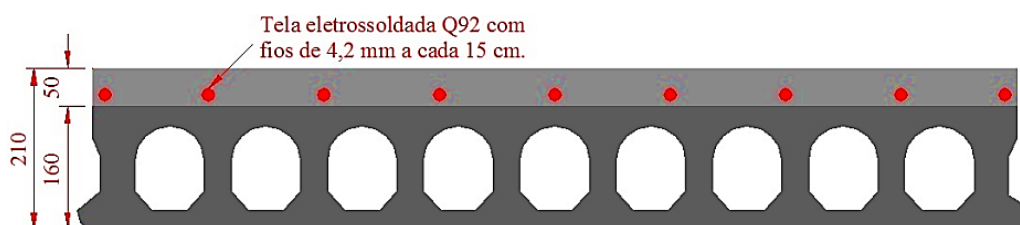


A Figura 4.11 mostra a seção transversal da laje com a capa estrutural incorporada. A diferença de coloração é visível devido a diferença de sessenta dias entre a concretagem da laje alveolar e a confecção da capa. E uma seção nominal da laje de 16 cm de altura com capa de 5 cm.

Figura 4.11 – Capa de concreto aplicado a laje alveolar.



a) Capa de concreto de 5 cm de altura nas lajes alveolares.



b) Capa estrutural com o reforço da tela eletrossoldada. [Adaptação de MOLD (2012)]

Em algumas lajes, a espessura da capa era de 9 cm. Neste caso, a concretagem foi realizada no LABITECC, tomando-se os mesmos cuidados com a limpeza e umedecimento da superfície superior da laje alveolar. As lajes foram dispostas no laboratório e, posteriormente, foram montadas formas de madeira (tábuas e sarrafos) em todo seu perímetro e travadas para evitar uma possível abertura das formas. A armadura foi reforçada com uma tela eletro-soldada Q-92 (fios com diâmetro de 4,2 mm espaçados a cada 15 cm) e posicionada com auxílio de espaçadores (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Montagem e disposição das formas.



O concreto convencional, adquirido de concreteira ($f_{ck} = 30$ MPa e abatimento do tronco de cone igual a 10 ± 2 cm), foi aplicado e adensado por meio de vibrador de agulha. Após a regularização da superfície, as peças foram protegidas com lona plástica durante as primeiras horas após a concretagem. A Figura 4.13 mostra o adensamento mecânico com o vibrador, a regularização da superfície e proteção da laje.

Figura 4.13 – Aplicação e adensamento do concreto.



A superfície da capa de concreto foi mantida úmida por meio de aplicação de água. Para manter a umidade foram posicionadas espumas com espessura de 5 cm sobre as lajes e umedecidas com água. Como as bordas das fôrmas estavam ligeiramente mais altas que a capa, foi possível a formação de uma lamina d'água sobre a superfície.

Por fim, todas as lajes foram cobertas com lona plástica. As peças permaneceram nesta situação por 20 dias, até a realização dos ensaios. A escolha por esse valor elevado de espessura de capa (9 cm) se deu pelo fato de se procurar aumentar o momento de fissuração da laje e, assim, proporcionar a ruptura da laje ao cisalhamento por tração diagonal sem a presença de fissuração por flexão. Este fato ocorre com frequência em lajes alveolares com baixa altura, que é o caso das lajes utilizadas nesta pesquisa.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Para determinação das características dos concretos utilizados, foram determinadas as suas propriedades mecânicas no estado endurecido e na idade dos ensaios das lajes no laboratório. Além disso, no estudo do concreto de preenchimento no laboratório foram determinadas suas propriedades no estado fresco, isto é: Consistência pelo abatimento do tronco de cone de acordo com a norma NBR NM 67 (ABNT, 1996); massa específica conforme norma NBR 9833 (ABNT, 2008); e teor de ar no concreto fresco - Método pressométrico NBR NM 47 (ABNT, 2002). As propriedades determinadas para o concreto auto adensável no estado fresco foram o

diâmetro e o tempo de espalhamento, determinados segunda a norma NBR 15823-Parte 2 (ABNT, 2010). Os resultados das propriedades do concreto no estado fresco são mostrados no Apêndice B.

4.4.1 Resistência à compressão do concreto

A resistência a compressão foi determinada por meio da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), executado em uma prensa da marca EMIC com capacidade de 2000 kN. A velocidade de carregamento do ensaio foi 0,55 MPa/s. A Tabela 4.7 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para o ensaio de resistência a compressão. Os corpos de prova foram moldados seguindo a recomendação da norma NBR 5738 (ABNT, 2015)

Tabela 4.7 – Corpos de prova para resistência a compressão.

Concreto	Dimensões dos corpos de prova	Quantidade
Laje alveolar	15x30 cm ²	7
Preenchimento sem aditivo Dry 1	10x20 cm ²	11
Preenchimento com aditivo Dry 1	10x20 cm ²	12
Capa com 5 cm de altura	10x20 cm ²	12
Capa com 9 cm de altura	15x30 cm ²	6

Para tratamento da superfície de topo, os corpos de prova foram retificados e/ou utilizados neoprene com anel metálico. Medidas como medição do diâmetro da base e da altura dos corpos de prova foram realizadas com o auxílio de um paquímetro (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Ensaio de resistência a compressão



4.4.2 Módulo de elasticidade estático

Para a determinação do módulo de elasticidade estático, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para cada tipo de concreto, com dimensão de 15x30 cm. Este ensaio foi orientado

pela norma NBR 8522 (ABNT, 2008). Para medir as deformações, foi utilizado um extensômetro mecânico com configuração tripla. A força foi aplicada com taxa de incremento de 0,50 MPa/s até atingir 30% do valor da resistência a compressão do concreto.

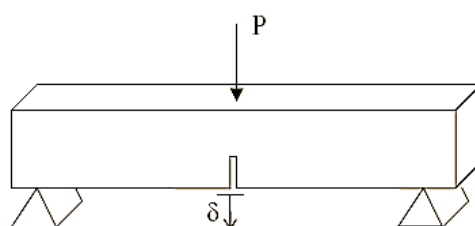
4.4.3 Resistência a tração por compressão diametral

Neste ensaio, também foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de concreto. Os corpos de prova eram cilíndricos de 15 x 30 cm² e para orientação do ensaio adotou-se a norma NBR 7222 (ABNT, 2011)

4.4.4 Ensaio de flexão sob três pontos de carga com entalhe no meio do vão

A especificação 50-FMC (*Fracture Mechanics of Concrete*) apresenta um método para determinar experimentalmente a energia no modo I de fatura do concreto ou da argamassa, utilizando o ensaio de flexão em vigas com três pontos de carga e com entalhe no meio do vão igual à metade da altura do corpo de prova. Este ensaio foi executado em uma máquina universal da EMIC, com capacidade para 300 kN. O deslocamento no meio do vão foi medido por um deflectômetro com precisão de 1 μm e capacidade de 3,5 mm (Figura 4.18).

Figura 4.15 – Ensaio de flexão sob três pontos de carga com entalhe no meio do vão



A energia de fratura no modo I do concreto foi calculada empregando a equação (4.2) recomendada pela RILEM 50-FMC (1985):

$$G_f = \frac{A + (m_1 + m_2)g\delta_u}{b(h - a)} \quad (4.2)$$

A variável G_f é a energia no modo I de fratura específica (N.mm/mm²); A representa a área abaixo da curva força versus deslocamento (N.mm); m_1 corresponde a massa do corpo de prova entre os apoios, calculada como a massa do corpo de prova multiplicada por l/L (kg); l é o vão teórico do corpo de prova (mm); m_2 é a massa do equipamento que acompanha a deformação do corpo de prova durante o ensaio e que não está acoplada ao atuador (kg).

E ainda:

- g - aceleração da gravidade (admitida igual a 9,81 m/s²);
- L - comprimento do corpo de prova (mm);
- δ_u - deslocamento vertical último, isto é, o deslocamento registrado no fim do ensaio;
- a - altura do entalhe, definida como $h/2 = 75$ (mm);
- b - largura do corpo de prova (mm);
- h - altura do corpo de prova (mm).

Esse ensaio também pode ser utilizado para determinar a resistência à tração na flexão do concreto. Levando em conta a ação do peso próprio do corpo de prova e de possíveis massas de equipamentos não acopladas ao atuador, a resistência à flexão foi obtida pela equação (4.3) (BARROS, 1995).

$$f_{ct,f} = C_1 \frac{[F_{max} + C_2 m_1 g (1 - \alpha^2) + m_2 g] l}{b(h - a)^2} \quad (4.3)$$

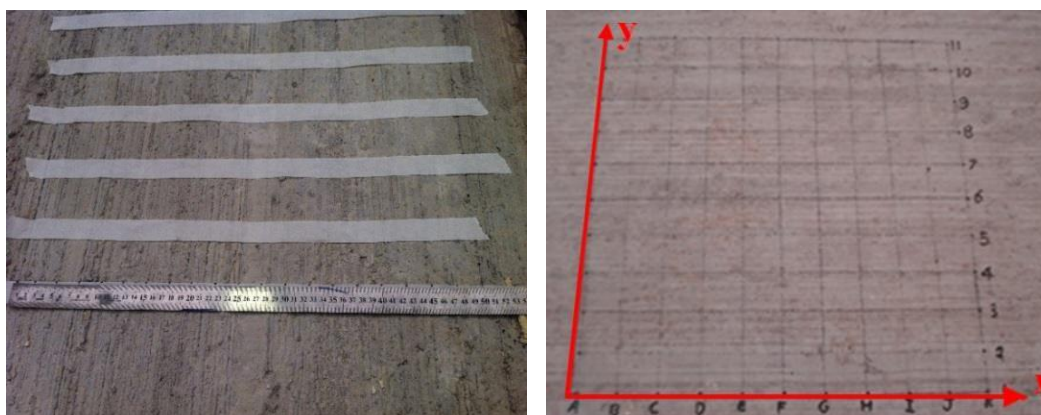
Em que F_{max} é a máxima força transmitida pelo atuador, em N; α é o parâmetro que atende ao fato do comprimento do corpo de prova, L , poder ser diferente do seu vão l . As demais variáveis valem $C_1=1,5$ e $C_2=0,5$.

4.5 RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS LAJES ALVEOLARES

No sentido de verificar a eficiência da interface laje-capa na transferência dos esforços de cisalhamento, foi medida a rugosidade superficial das lajes alveolares. Foram criadas duas malhas, em lajes distintas, utilizando as lajes de referência, ou seja, sem capa e sem alvéolos preenchidos. A malha tinha dimensão total de 50 x 50 cm, onde as linhas estão no sentido longitudinal, sobre o eixo x , e são representadas por numerais. Já as colunas localizam-se no

sentido transversal da peça, são reproduzidos por letras e estão sobre o eixo y. As linhas e colunas estão espaçadas de 5 cm. A Figura 4.16 mostra a malha utilizada para medição da rugosidade.

Figura 4.16 – Criação da malha para medição com o rugosímetro.



a) Marcação dos pontos

b) Malha confeccionada.

Após a demarcação da malha, foi utilizado um rugosímetro. Este equipamento é um suporte com um relógio comparador com precisão de 0,01 mm. Foram realizadas leituras das alturas de cada ponto e, assim, determinada a altura relativa entre os pontos da malha. O rugosímetro possui translação de 20 cm, sendo assim, em cada linha e coluna o equipamento foi deslocado por três vezes. Em cada movimento de translação do equipamento foi necessário nivelá-lo e fazer a leitura da ré, ou seja, o último ponto lido antes do deslocamento.

Figura 4.17 – Posicionamento do rugosímetro sobre a malha



4.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE

Para determinação experimental da resistência à força cortante da laje alveolar foi utilizado o ensaio padrão recomendado pela norma europeia EN 1168 (CEN, 2008). O esquema de suporte

e carregamento era constituído por um pórtico metálico e dois blocos de apoio em concreto armado sobre uma base nivelada e rígida (laje de reação). O esquema de ensaio com o corte longitudinal é apresentado na Figura 4.18 segundo essa norma, a distância da força aplicada até o eixo do apoio deve ser igual a 2,5 vezes a altura da laje e o vão da laje deve ser de pelo menos quatro metros. A largura da chapa metálica de apoio era de 50,0 mm, conforme esquema mostrado no corte transversal da Figura 4.20.

Figura 4.18 - Esquema de montagem para as lajes alveolares, com carga aplicada a $2,5h$.

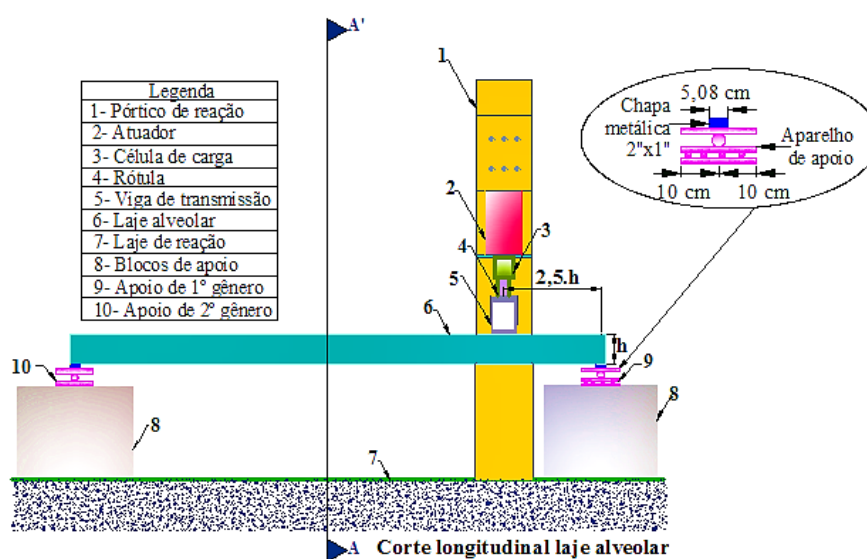
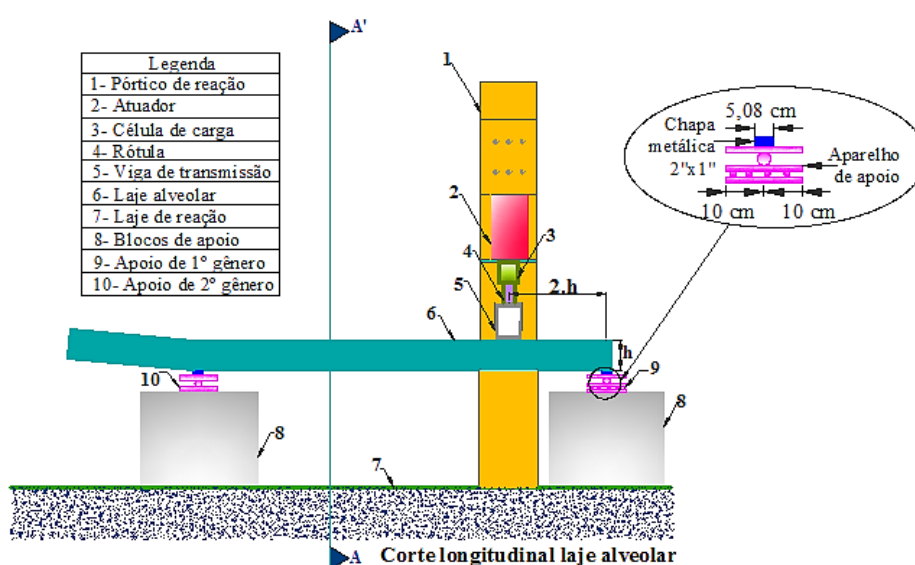


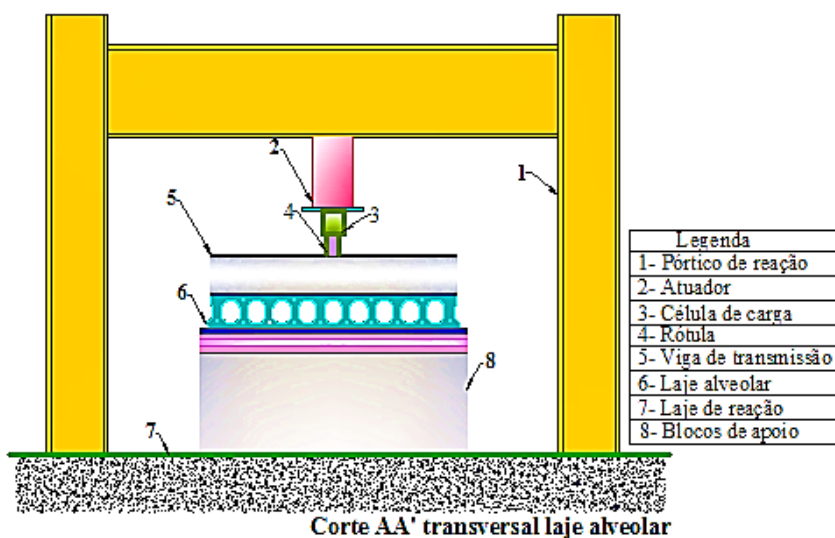
Figura 4.19 - Esquema de montagem para as lajes alveolares, com carga aplicada em $2h$.



Algumas lajes foram ensaiadas em ambas as extremidades. Neste caso, após o primeiro ensaio a laje foi virada e a outra extremidade foi ensaiada. Para isso, a extremidade já ensaiada foi deixada em balanço, resultando em um vão de 3,20 metros (Figura 4.19). Além disso, nesses ensaios a distância do ponto de aplicação da força até o apoio foi reduzida para duas vezes a

altura da laje. Isso foi feito visando verificar a influência dessa distância na resistência à força cortante da laje. O apoio utilizado na extremidade mais próxima do ponto de aplicação da força era do primeiro gênero para evitar as ações de forças horizontais na laje. A viga para distribuição da força sobre a laje tinha seção caixão e largura de 14,0 cm. O corte transversal do esquema de montagem do ensaio é são mostrados na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Corte transversal do esquema de montagem das lajes.



4.6.1 Montagem e instrumentação

Seguir a sequência de passos para montagem dos ensaios de lajes alveolares é fundamental para que as condições dos ensaios experimentais sejam cumpridas. O primeiro passo foi definir o layout da posição dos blocos de apoio em relação ao pórtico de reação e ao ponto de aplicação da carga. O segundo passo foi a instalação dos aparelhos de apoio e verificação do nível dos dois blocos, com o nível de mangueira.

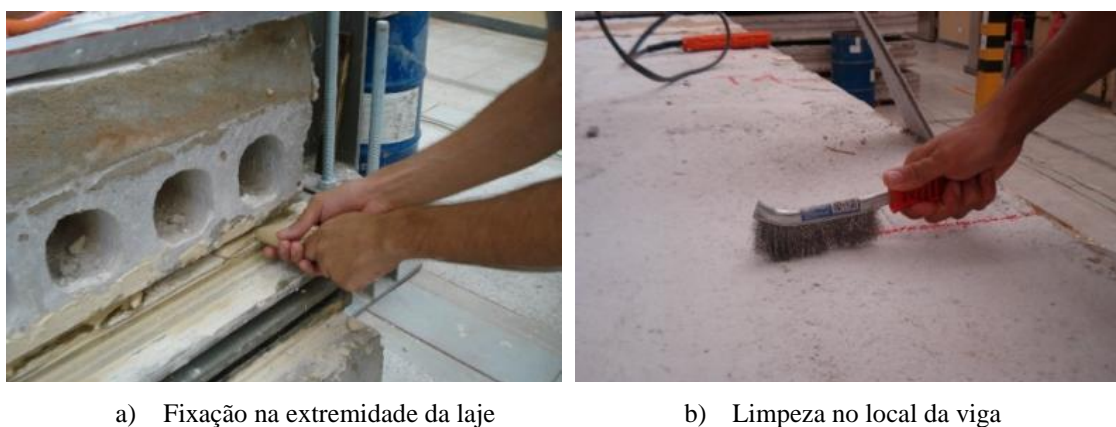
Sobre o aparelho de apoio foi adicionado uma chapa metálica com largura de 50 mm e espessura de 25 mm. A Figura 4.21 apresenta alguns passos para a montagem dos apoios e blocos de concreto do ensaio, como: marcação do bloco, aplicação do gesso, posicionamento dos apoios, nivelamentos e colagem das chapas metálicas.

Figura 4.21 – Marcações no bloco de concreto e posicionamento do aparelho de apoio.



Posteriormente foi verificado o vão entre os apoios, medindo as duas laterais dos apoios e, ainda, uma medida em diagonal entre os blocos para conferir a ortogonalidade. As extremidades da laje alveolar foram apoiadas sobre as chapas metálicas e aderidas com pasta de gesso (Figura 4.22).

Figura 4.22 – Aplicação da pasta de gesso e limpeza da região da viga de transferência.



Logo em seguida efetuou-se a limpeza da superfície superior da laje na região de localização da viga de transferência. Essa limpeza era realizada com escova metálica, vassoura e jato de

água. A escova metálica foi utilizada em situações em que haviam muitos agregados graúdos colados a superfície da laje. Após a etapa de limpeza prosseguiu-se com as marcações para a colocação da viga de transferência, observando a distância determinada de 2,5h ou 2,0h. A aderência entre a laje e a viga foi garantida com pasta de gesso (Figura 4.23).

Figura 4.23 – Algumas etapas de limpeza e marcação da laje alveolar.



Para a aplicação do carregamento na laje foi utilizado um atuador hidráulico com capacidade de 1000 kN, uma célula de carga com capacidade de 500 kN e uma bomba elétrica (

Figura 4.24).

Figura 4.24 – Itens do sistema de aplicação do carregamento.



O atuador é fixado ao pórtico de reação, seguido da célula de carga e, por fim, a rótula sobre a viga de transferência. Os deslocamentos verticais foram registrados ao longo do ensaio por meios de transdutores resistivos do tipo LRDT (*Linear Resistive Differential Transducers*). Os transdutores foram posicionados da seguinte forma: dois na linha de atuação do carregamento, ou imediatamente ao lado, dois nos apoios e outros dois no meio do vão da laje (Figura 4.25). Nos ensaios em que a laje possuía capa foi utilizado mais um transdutor para verificar o escorregamento da capa. Para regularizar a superfície foram coladas chapas metálicas, foram aderidas a laje com pasta de gesso e verificado o nivelamento da mesma (Figura 4.26).

Figura 4.25 –Layout geral do posicionamento dos transdutores.

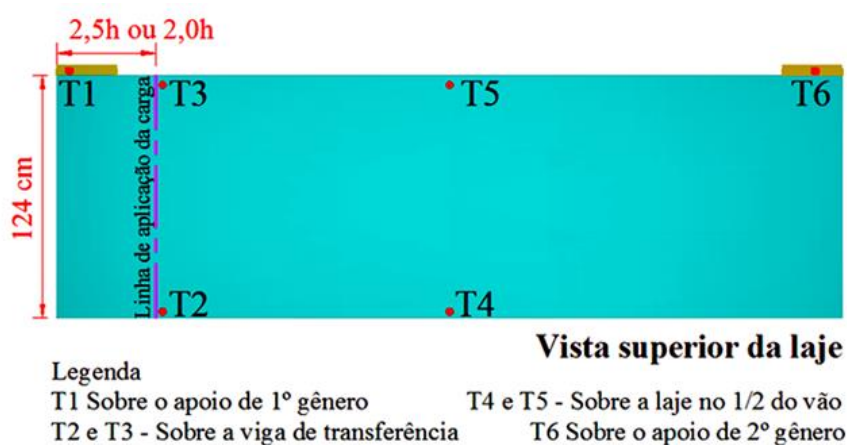


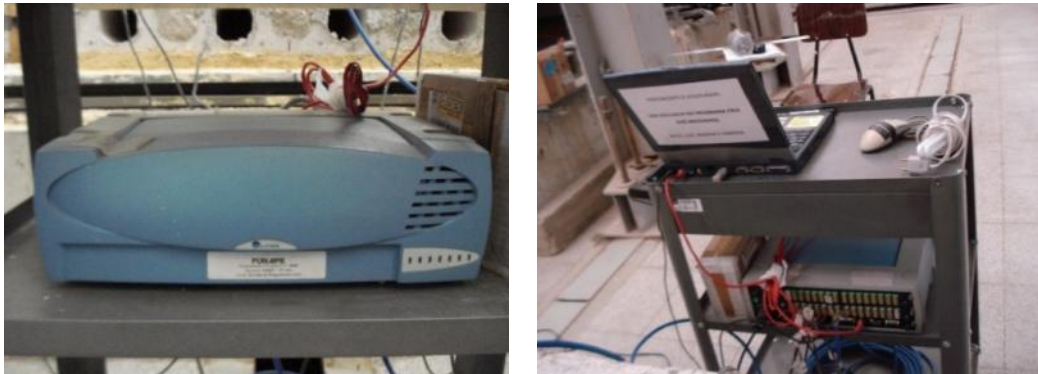
Figura 4.26 – Chapas auxiliares para posicionamento dos transdutores e modelo de transdutor utilizado.



Os transdutores T1 e T6 registraram o deslocamento vertical dos apoios para posterior correção dos deslocamentos registrados pelos demais transdutores. Os transdutores T2 e T3 registraram o deslocamento vertical na região da viga de transferência. Já os transdutores T4 e T5 registraram os deslocamentos no meio do vão.

Para a aquisição dos dados foi utilizado o equipamento da marca Lynx, acoplado a um computador, conforme mostrado na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Equipamentos utilizados na aquisição de dados dos ensaios

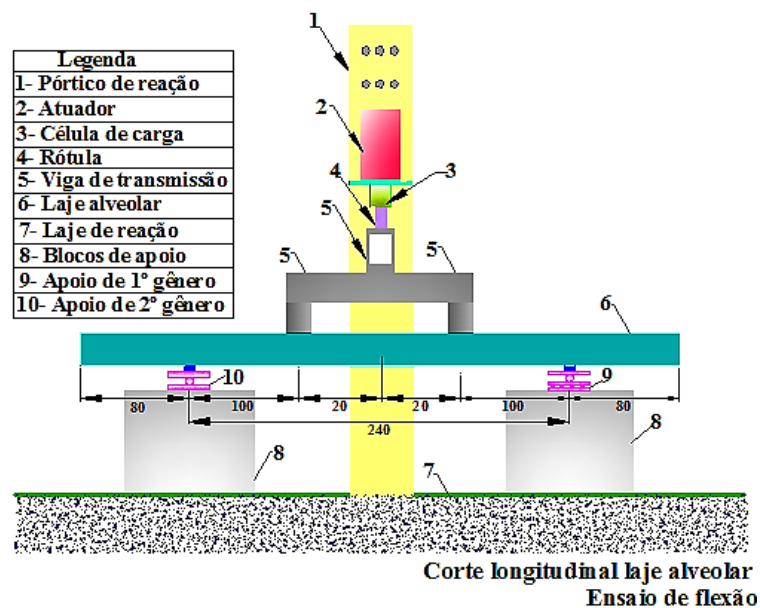


4.7 PERDAS DE PROTENSÃO

Uma informação importante para o dimensionamento de lajes alveolares protendidas é a perda de protensão a que ela é submetida ao longo de sua vida útil. Essa informação também é importante para comparar os valores advindos de modelos teóricos com resultados experimentais. A estimativa das perdas de protensão das lajes ensaiadas foi realizada segundo o critério de cálculo apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2014), do qual se obteve uma perda total estimada de 16% até a data de ensaio das lajes no laboratório.

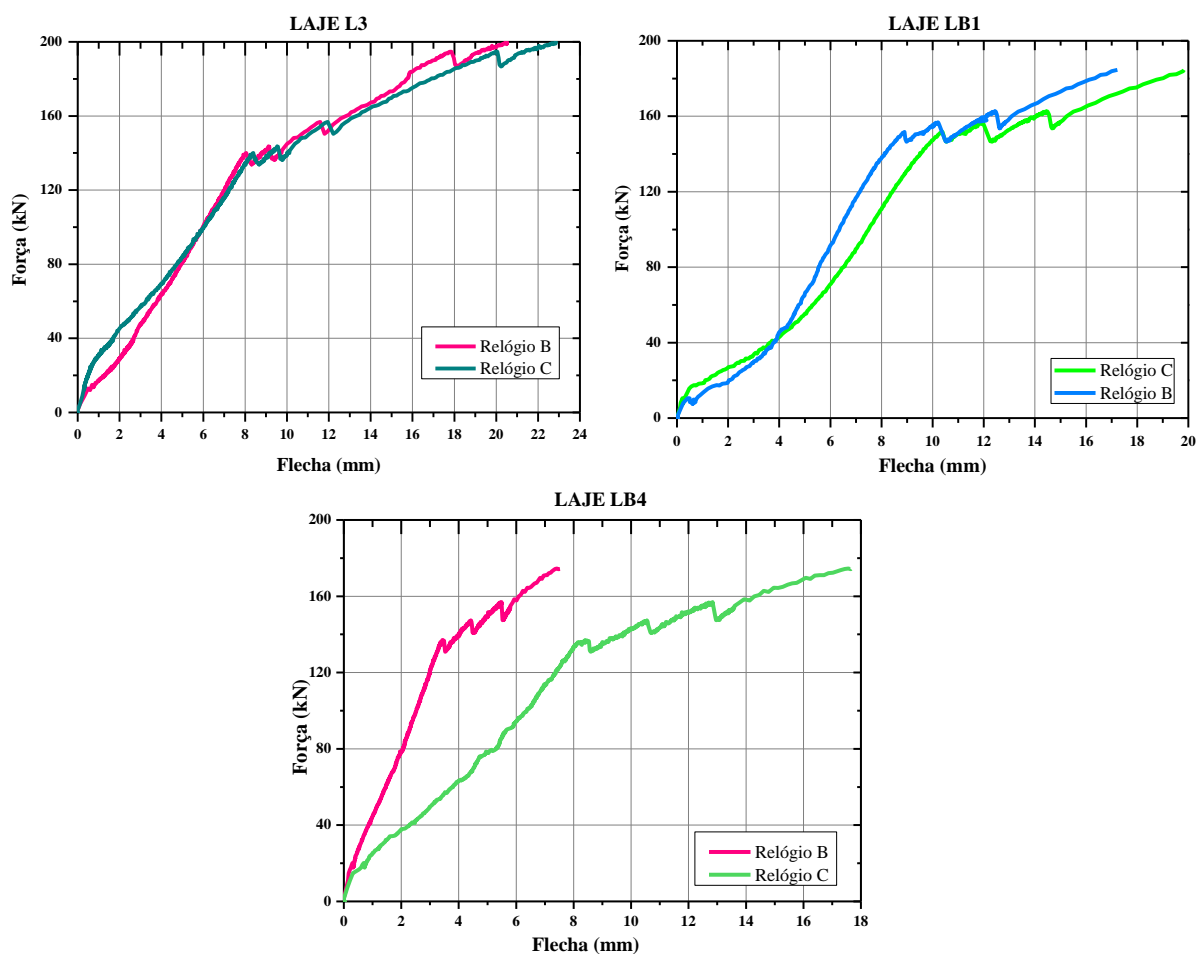
No sentido de se determinar a perda de protensão real das lajes utilizadas no ensaio, três lajes alveolares, sem capeamento e previamente ensaiadas à força cortante, foram escolhidas para serem ensaiadas à flexão com duas forças concentradas, conforme esquema abaixo.

Figura 4.28 – Esquema de ensaio



Durante o ensaio foram registrados a força aplicada e o deslocamento no meio do vão e observada a formação de fissuras de flexão. A força referente à primeira fissura foi registrada visualmente em cada ensaio e, posteriormente, verificada a partir do gráfico força *versus* flecha de cada uma das lajes ensaiadas (Figura 4.29).

Figura 4.29 – Curvas força *versus* flecha para lajes alveolares.



O momento de fissuração da laje pode ser determinado da Equação (4.4) conhecida a resistência à tração na flexão do concreto (M_r) e a força de protensão aplicada (N_p), além das propriedades geométricas da seção transversal da laje alveolar.

$$M_r = \frac{f_{ct} I_c}{y_t} + \frac{N_p I_c}{A_c y_t} + N_p e \quad (4.4)$$

Essa equação pode ser reescrita, isolando a tensão de tração na fibra inferior mais tracionada. Apenas ressalta-se que as lajes utilizadas na pesquisa possuíam cordoalhas de protensão na face

superior e que afetam o momento de fissuração. Dessa forma, chega-se à equação (4.5) que avalia a tensão na fibra inferior mais tracionada.

$$\sigma_i = \left(\frac{My_{inf}}{I_c} - \frac{Np_{inf}}{A_c} \right) + \left(\frac{Np_{inf}ep_{inf}y_{inf}}{I_c} \right) + \left[\left(-\frac{Np_{sup}}{A_c} \right) + \left(Np_{sup}ep_{sup} \frac{y_{sup}}{I_c} \right) \right] \quad (4.5)$$

sendo σ_i a tensão no concreto na fibra mais tracionada (fibra inferior); N_p a força de protensão real das cordoalhas inferior e superior ($N_{p_{inf}} = N_{p_{sup}}$); A_c a área efetiva da seção transversal da laje alveolar; e_p a distância da excentricidade do cabo, considerado a distância da força de protensão N_p ao centro de gravidade da peça, assim o e_{psup} é equivalente a distância entre o centro de gravidade da cordoalha até o centro de gravidade da peça e o e_{pinf} refere-se a distância entre o centro de gravidade da cordoalha tracionada até o centro de gravidade da peça ; y_{sup} corresponde a distância entre a face superior da laje até o centro de gravidade; y_{inf} relativo a distância entre o centro de gravidade da peça até a face inferior da laje; M é o momento atuante na seção transversal da laje alveolar.

Do ensaio das lajes à flexão foi determinado o momento de fissuração experimental das mesmas, o qual é mostrado na Tabela 4.8. Igualando o valor de σ_i da Equação (4.5) à resistência média à tração na flexão do concreto da laje alveolar ($f_{ctm,fl} = 5,33$ MPa), determina-se o valor da força de protensão atuante na laje no momento do ensaio, também mostrada na Tabela 4.8. Se essa força for comparada à força de protensão inicial, determina-se a perda de protensão indicada na Tabela 4.8 até a data do ensaio.

Observa-se uma perda de protensão média de 12%, valor próximo ao estimado pelo modelo da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 4.8 – Perda de protensão experimental

Laje	Força de fissuração (kN)	Momento de fissuração (kN.cm)	Perda de protensão (%)
L3	140,08	7.128,50	20,50
LB1	151,16	7.682,50	10,30
LB4	156,94	7.971,51	5,00
Média da perda de protensão:			11,93

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

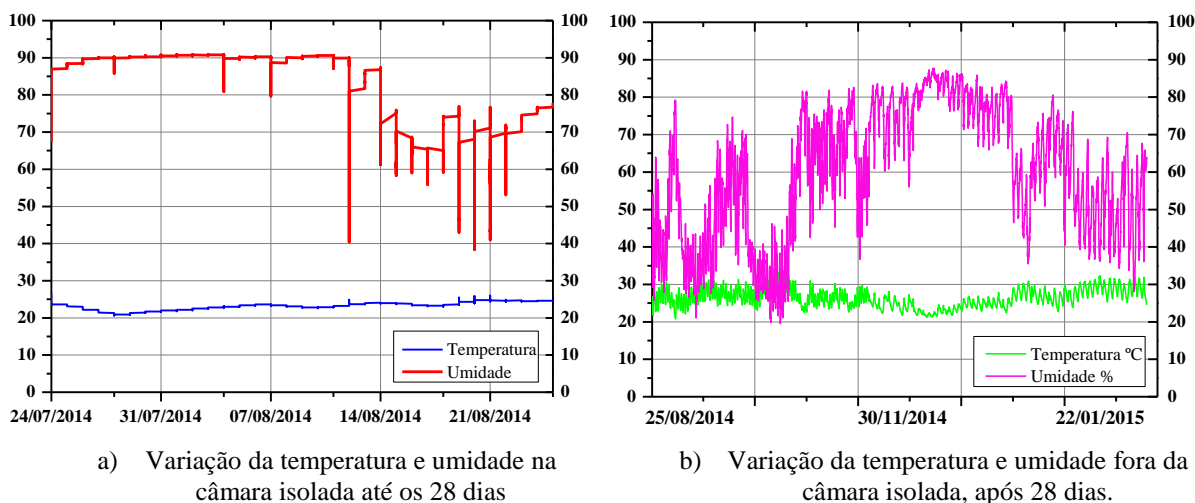
Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos desenvolvidos nesse trabalho. Também é feita a discussão dos resultados e, para isso, são incluídos os resultados obtidos por Antunes (2012), denominados Série I e que foram descritos no item 2.6.6.

5.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Na Figura 5.2 é mostrada a retração do concreto dos corpos de prova prismáticos durante o período de acompanhamento (210 dias). Nota-se que as três dosagens com adição do aditivo microexpansor sofreram expansão ao longo dos sete primeiros dias, diferentemente do traço de referência que sofreu retração. Após uma semana, as dosagens R09 (referência) e R08 (6 kg/m³ de aditivo) apresentaram retração, sendo a taxa de retração maior na dosagem R08. A dosagem R10 (10 kg/m³ de aditivo) praticamente não sofreu retração após o sétimo dia, enquanto a dosagem R07 (14 kg/m³ de aditivo) apresentou expansão até o vigésimo primeiro dia, quando houve uma pequena retração do concreto. Em todos os traços foi adicionado aditivo superplastificante Viscocrete[®] em proporção de 0,9%. De posse desses resultados, definiu-se o teor de 14 kg/m³ do aditivo microexpansor como o ideal para ser utilizado no concreto de preenchimento das lajes alveolares por ainda apresentar expansão até o vigésimo oitavo dia.

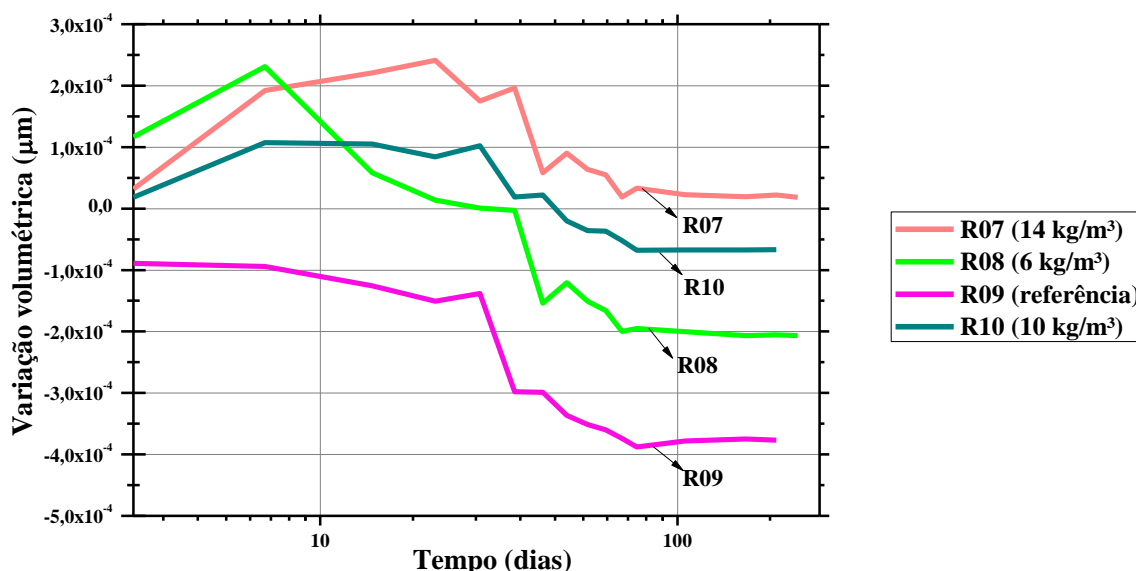
Esses resultados de variação volumétrica do concreto foram obtidos para os corpos de prova mantidos fechados em uma câmara isolada, onde a temperatura e a umidade variaram de 26,4 a 22,80°C e 67,40 a 90,70%, respectivamente. Entre o terceiro e o vigésimo oitavo dia a temperatura e a umidade na câmara se mantiveram constantes em 22,34 °C e 91,04%, respectivamente. Após o vigésimo oitavo dia, os corpos de prova foram retirados da câmara e colocados para secar no ambiente do laboratório de modo a simular as condições de cura do concreto de preenchimento dos alvéolos das lajes alveolares. Nessa situação, a temperatura e a umidade variaram de 21,80 a 33,1°C e 31,0 a 87,2%, respectivamente, conforme mostrado na Figura 5.1, resultando em uma temperatura e umidade média de 26,46 °C e 60,48%, respectivamente.

Figura 5.1 – Variação da temperatura e umidade durante o período de estudo da retração.



Nessa situação, a variação volumétrica dos corpos de prova ocorreu conforme mostrado na Figura 5.2, de onde se observa que todos os corpos de prova apresentaram retração, porém a dosagem R07 (14 kg/m^3 de aditivo) ainda apresentou expansão mesmo depois de decorridos 21 dias após a concretagem dos corpos de prova. Esse resultado reforça a escolha do teor de 14 kg/m^3 do aditivo microexpansor como o ideal para ser utilizado no concreto de preenchimento das lajes alveolares.

Figura 5.2 - Variação volumétrica média do concreto de preenchimento até os 210 dias.



A Tabela 5.1 apresenta as propriedades mecânicas do concreto utilizado no estudo do teor ótimo do aditivo microexpansor. Nota-se que não houve influência do volume do aditivo nas propriedades mecânicas do concreto, exceto para o teor de 14 kg/m^3 , no qual foi observada uma

pequena redução de 8,5% na resistência do concreto e de 3,9% no módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência (R09).

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas do concreto oriundos do estudo de retração

Dosagens testes	Aditivo Dry D1 NG	f_{cm}^2 (MPa)	E_{cm}^3 (GPa)	f_{ctm}^4 (MPa)
R09	-	49,57±0,49 (j=28 dias)	25,31±0,34 (j=28 dias)	4,06±0,50 (j=28 dias)
R08	6,0 kg/m ³	49,60±1,77 (j=24 dias)	25,52±0,20 (j=24 dias)	4,40±0,46 (j=28 dias)
R10	10,0 kg/m ³	51,25±0,93 (j=28 dias)	24,86±0,16 (j=28 dias)	4,13±0,04 (j=28 dias)
R07	14,0 kg/m ³	45,36±2,72 (j=24 dias)	24,32±0,60 (j=24 dias)	3,88±0,88 (j=28 dias)

A Tabela 5.2 mostra o resumo das propriedades mecânicas do concreto da laje alveolar, da capa estrutural e do preenchimento dos alvéolos, informando o valor médio e o desvio padrão obtido.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos concretos.

Elemento	$f_{cm,j}^5$ (MPa)	$f_{cm,j}^6$ (MPa)	$f_{ctm, sp}^7$ (GPa)	E_{cm}^8 (MPa)	G_{fm}^9 (Nmm/mm ²)	$f_{ctm,fl}$
Laje alveolar	42,29 ±0,58 (j = 90 dias) (6)*	42,26±1,49 (j= 161 dias) (3)*	4,23±0,51 (j=90 dias) (3)*	23,03±0,43 (j=90 dias) (3)*	-	5,33±0,28 (j=161 dias) (3)*
Capa com altura de 5 cm	31,36 ±4,62 (j = 35 dias) (6)*	30,36±4,27 (j=161 dias) (5)*	3,44±0,18 (j=35 dias) (3)*	16,39±0,77 (j=35 dias) (3)*	-	-
Capa com altura de 9 cm	41,16±0,97 (j = 35 dias) (6)*	-	4,27±0,27 (j=35 dias) (3)*	27,50±0,67 (j=35 dias) (3)*	0,497±0,01 (j=35 dias) (3)*	4,09 ±0,33 (j=35 dias) (3)*
Concreto de preenchimento dos alvéolos com aditivo	47,55±2,79 (j = 35 dias) (6)*	47,29±2,80 (j=161 dias) (6)*	4,27±0,36 (j=35 dias) (3)*	23,39±0,11 (j=35 dias) (3)*	-	-
Concreto de preenchimento dos alvéolos sem aditivo	46,19±2,05 (j = 35 dias) (6)*	47,46±3,82 (j=161 dias) (6)*	5,09±1,04 (j=35 dias) (3)*	23,56±0,51 (j=35 dias) (3)*	-	-

*Quantidade de corpos de prova ensaiados

² Resistência média a compressão do concreto, 3 corpos de prova com dimensão de 10x20 cm.

³ Módulo de elasticidade médio, 3 corpos de prova com dimensão de 15x30 cm.

⁴ Resistência média a tração por compressão diametral, com 3 corpos de prova dimensão de 15x30 cm.

⁵ Resistência média à compressão do concreto determinada no início dos ensaios das lajes.

⁶ Resistência média à compressão do concreto determinada ao final dos ensaios das lajes.

⁷ Resistência a tração média do concreto determinada no início dos ensaios das lajes.

⁸ Módulo de elasticidade médio do concreto determinada no início dos ensaios das lajes.

⁹ Energia de fratura do concreto determinada no início dos ensaios das lajes.

Essas propriedades foram determinadas no início dos ensaios das lajes alveolares. Ao final dos experimentos, foram realizados novos ensaios de resistência à compressão para verificar a variação da resistência do concreto durante a realização do programa experimental. Nota-se dessa tabela que, com exceção do concreto da capa de 5 cm de altura, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto dos diversos elementos apresentou valores próximos entre si, em especial o concreto da laje alveolar e do preenchimento dos alvéolos. Além disso, percebe-se que a adição do aditivo microexpansor ao concreto de preenchimento não influenciou nas suas propriedades mecânicas.

Finalmente, observa-se que não houve alteração na resistência do concreto de nenhum dos elementos entre as datas de início e término do programa experimental. Nota-se dessa tabela que, com exceção do concreto da capa de 5 cm de altura, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto dos diversos elementos apresentou valores próximos entre si, em especial o concreto da laje alveolar e do preenchimento dos alvéolos. Além disso, foi percebido que a adição do aditivo microexpansor ao concreto de preenchimento não influenciou nas suas propriedades mecânicas. Por fim, observa-se que não houve alteração na resistência do concreto de nenhum dos elementos entre as datas de início e término do programa experimental.

5.2 RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA LAJE ALVEOLAR

A Figura 5.3 apresenta os perfis altimétricos da superfície das lajes M2-A e M2-B. A altura dos pontos foi definida pela diferença de altura entre dois pontos consecutivos. O perfil na direção longitudinal foi obtido pela média das colunas nomeadas de A à K, já o perfil na direção transversal foi obtido pela média das linhas definidas pelos numerais de 1 à 11 (Figura 4.16).

A rugosidade média da superfície foi determinada a partir da adaptação da recomendação da FIB (2008) Segundo essa publicação, a variância da diferença de altura entre dois pontos consecutivos em uma determinada linha de medição ($S_{r,n}^2$) pode ser calculada por meio da equação (5.1), já considerando que cada linha de medição possuía onze pontos de leitura.

$$S_{r,n}^2 = \frac{1}{9} \left[(a_n - b_n)^2 + (b_n - c_n)^2 \dots + (j_n - k_n)^2 - \frac{1}{10} (a_n - k_n)^2 \right] \quad (\text{mm}^2) \quad (5.1)$$

Onde:

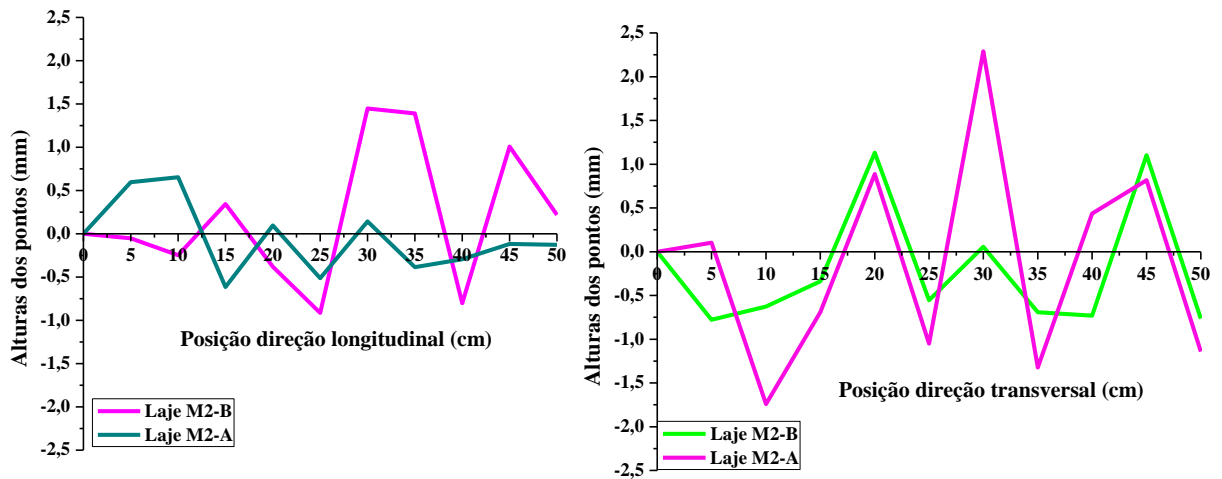
a_n, b_n, \dots, k_n são as leituras em cada um dos onze pontos em uma determinada linha, em mm;

A rugosidade média em uma determinada direção da laje (S_r) pode ser determinada pela equação (5.2), já considerando que em cada direção haviam onze linhas de medição da rugosidade.

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{11} (S_{r,1}^2 + S_{r,2}^2 \dots + S_{r,11}^2)} \quad (mm) \quad (5.2)$$

A rugosidade média foi menor na direção transversal, com um valor de 0,86 mm. Já na direção longitudinal, a rugosidade média foi de 1,25 mm. A partir desses valores, conclui-se que a superfície superior da laje alveolar não pode ser considerada rugosa segundo o critério da norma NBR 9062 (ABNT, 2006), que em seu item 6.3.4 exige uma rugosidade de 5 mm a cada 30 mm nas duas direções. Já pela recomendação da FIP (1998) essa superfície pode ser classificada na categoria I, como superfície naturalmente rugosa. Essa categoria é dividida em quatro níveis, sendo o nível 3 a superfície que foi alisada (trazendo os finos do agregado à superfície), mas que ainda apresenta pequenas ondulações e o nível 6 as superfícies que foram deliberadamente texturizadas pelo escovamento do concreto ainda fresco, apresentando rugosidade de 3 mm a cada 40 mm segundo a FIB (2008). Este último nível corresponde ao tratamento realizado na superfície das lajes durante a sua fabricação.

Figura 5.3 – Perfis altimétricos de rugosidade nas direções longitudinal e transversal.



a) Perfil direção longitudinal

b) Perfil direção transversal

Girhammar e Pajari (2008) afirmam que a rugosidade na direção longitudinal da laje tem maior influência na aderência da capa com a laje do que a rugosidade na direção transversal. Uma baixa rugosidade implica em uma redução da resistência da interface às tensões de cisalhamento que surgem na ligação da capa com a laje alveolar. Com isso, pode haver uma ruptura da

interface antes da ruína da laje alveolar, resultando em uma diminuição da resistência à força cortante da laje composta.

5.3 LAJE ALVEOLAR SEM CAPA

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das lajes alveolares sem capa e sem preenchimento dos alvéolos.

5.3.1 Modo de ruptura e resistência à força cortante

A força cortante última experimental e a tensão cisalhante convencional para as lajes alveolares das séries I e II são mostradas na Tabela 5.3, assim como o somatório da largura das nervuras de cada peça e o tipo de ruptura. A força cortante última experimental foi obtida adicionando a força cortante devida ao peso próprio da laje na seção de aplicação do carregamento.

Tabela 5.3 – Força cortante última experimental para as lajes sem capa das séries I e II.

Modelo	$V_{u,exp}$ (kN)	b_w (mm)	d (mm)	$\tau_c = V_{u,exp} / b_w d$ (MPa)	Tipo de ruptura	Ângulo da fissura na nervura externa (θ) Direita / Esquerda	
Série I (ANTUNES, 2012)							
M1-A	154,59	367,22	126,89	3,32	Força cortante	-	-
M1-B	159,26	403,95	127,31	3,10	Força cortante e Torção	-	-
Série II							
M2-A	163,97	427,44	136,79	2,80	Força cortante	45°	45°
M2-A*	148,71	436,89	135,11	2,52	Força cortante e Flexão	50°	56°
M2-B	134,73	433,72	137,77	2,25	Força cortante e Flexão	90°	47°
M2-B*	133,90	432,43	135,84	2,28	Força cortante e Flexão	57°	48°
M3-A*	168,61	455,14	136,38	2,72	Força cortante e Flexão	58°	41°
M3-B*	160,15	437,51	136,49	2,68	Força cortante e Flexão	57°	90°

* É a mesma laje, porém ensaiada na extremidade oposta com vão de 3,20 m;

Para análise das lajes alveolares, foi utilizada a tensão cisalhante convencional, a qual apresentou valor médio de 2,54 MPa para as lajes da Série II, com desvio padrão igual a 0,23 e coeficiente de correlação 9,15 %. Com isso, procura-se eliminar a influência da altura e da

largura das nervuras na resistência da laje. As lajes da série I apresentaram tensão cisalhante convencional maior devido à maior quantidade de cabos de protensão nessa série.

As lajes da Série I romperam por força cortante e foi observado o escorregamento das cordoalhas no final do ensaio, sendo que a laje M1-B também apresentou fissuração típica de momento de torção. Mais detalhes da forma de ruptura das lajes dessa série podem ser obtidos em Antunes (2012).

Já as lajes da Série II, de forma geral, romperam por força cortante seguindo uma fissuração típica de ruína por tração diagonal. Em várias lajes, essa fissura foi acompanhada de uma fissura vertical no ponto de aplicação do carregamento, típica de ruína por flexão. Essa fissura não surgiu nas lajes da Série I pelo fato das lajes dessa série possuírem uma maior força de protensão. Com a redução do número de cabos na segunda série de ensaios, com conseqüente redução da força de protensão, houve redução do momento de fissuração da laje, o que acarretou o surgimento, em várias lajes da Série II, de fissuras de flexão na região de momento fletor máximo antes da ruína da laje por força cortante.

De fato, o momento de fissuração da laje alveolar obtido do ensaio de flexão pura atingiu um valor médio de 7.254,17 kN.cm. Utilizando esse momento de fissuração na configuração do ensaio para avaliação da resistência à força cortante, chega-se a uma força média de fissuração por flexão (incluindo o peso próprio da laje) de 151,88 kN. Essa força é menor que a força cortante última experimental da maioria das lajes da Série II mostradas na, confirmando a fissuração da laje por flexão antes da ruína por força cortante.

A força cortante última experimental e a tensão cisalhante convencional para as lajes alveolares das séries I e II são mostradas na Tabela 5.3, assim como o somatório da largura das nervuras de cada peça e o tipo de ruptura. A força cortante última experimental foi obtida adicionando a força cortante devida ao peso próprio da laje na seção de aplicação do carregamento. Para análise das lajes alveolares, foi utilizada a tensão cisalhante convencional, a qual apresentou valor médio de 2,54 MPa para as lajes da Série II, com desvio padrão igual a 0,23 e coeficiente de correlação 9,15 %. Com isso, procura-se eliminar a influência da altura e da largura das nervuras na resistência da laje. As lajes da série I apresentaram tensão cisalhante convencional maior devido à maior quantidade de cabos de protensão nessa série.

A Figura 5.4 ilustra o panorama de fissuração do modelo M2-A, que rompeu por tração diagonal nas duas laterais com ângulo da fissura de aproximadamente 45° graus. Ao final do ensaio, foi

notado que houve escorregamento das cordoalhas na ordem de 4 mm. Na face inferior foi observada uma fissura em linha reta, e paralela à borda da laje, ligando as duas laterais da peça. Isso indica que todas as nervuras da laje alveolar romperam por tração diagonal com o mesmo ângulo de fissuração.

Figura 5.4 – Panorama de fissuração após a ruína do modelo M2-A.



a) Lateral direita

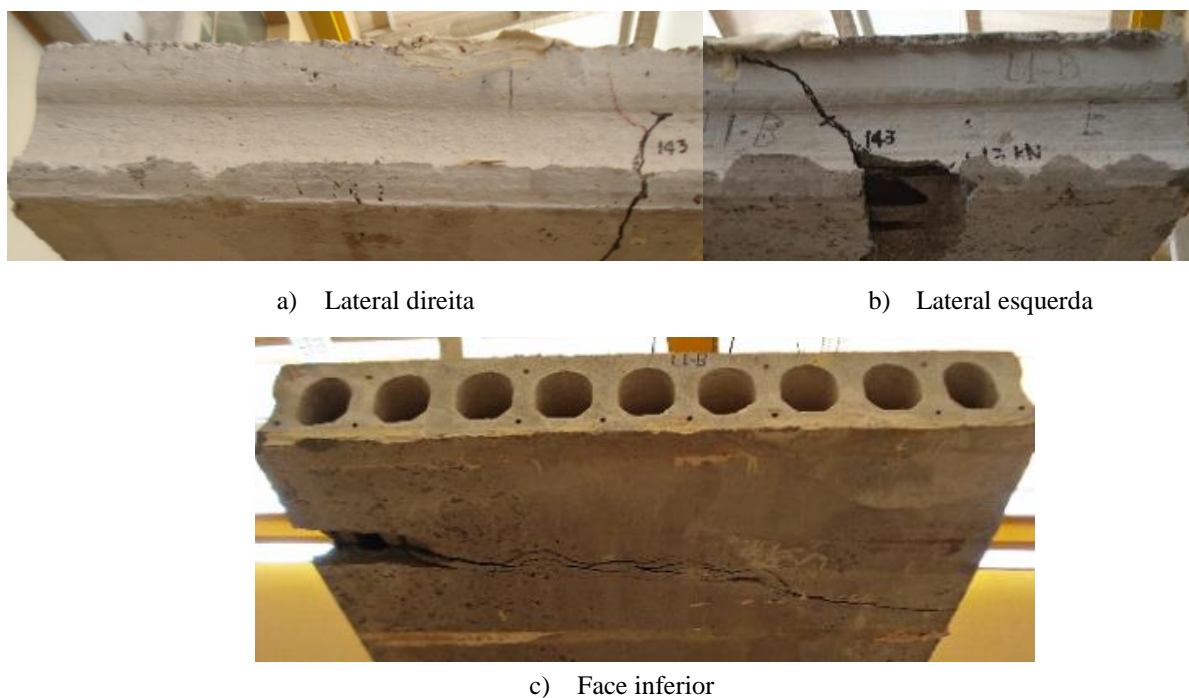
b) Lateral esquerda



c) Face inferior

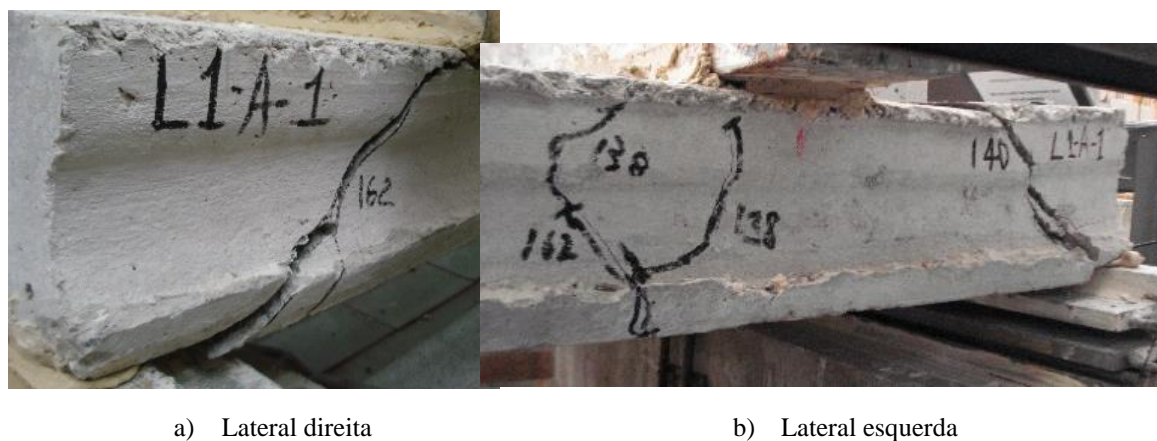
No modelo M2-B, mostrado na Figura 5.5, a ruptura ocorreu por mecanismo por tração diagonal, pois intercorreu entre o ponto de aplicação da carga e o apoio de primeiro gênero. Porém uma característica importante visualizada foi a modificação da inclinação da fissura principal do mecanismo de tração diagonal devido à fissuração de flexão que surgiu na região de momento fletor máximo, entre o trecho compreendido após o ponto de aplicação da carga e o apoio de segundo gênero. Na lateral direita houve a formação de fissura vertical, característica de flexão. Já na lateral esquerda a ruptura foi por tração diagonal, sem surgimento de nenhuma fissura de flexão ao longo desta lateral. Na face inferior da peça, a fissura se prolongou de forma inclinada em relação ao bordo da laje. O efeito da fissura de flexão na lateral direita fez com que o ângulo de fissuração nas nervuras internas fosse variável de 47° na nervura externa esquerda até 90° na nervura externa direita.

Figura 5.5 – Panorama de fissuração após a ruína do modelo M2-B.



A laje M2-A*, mostrada na Figura 5.6, apresentou forma de ruptura semelhante ao modelo M2-B, com ruptura por tração diagonal. Na lateral direita ocorreu a ruptura por tração diagonal, com a fissura inclinada de aproximadamente 45° , enquanto na lateral esquerda as primeiras fissuras que se formaram foram por flexão e posicionadas antes da viga de transferência. Posteriormente, houve a formação da fissura típica de ruptura por tração diagonal na lateral esquerda, próxima ao apoio. Ao atingir a capacidade máxima de carga, as cordoalhas escorregaram, principalmente junto à nervura externa esquerda.

Figura 5.6 – Panorama de fissuração após a ruína modelo M2-A*





c) Face inferior

Os demais modelos mostrados na Figura 5.7 seguem o mesmo mecanismo de ruptura por tração diagonal, apresentando a combinação de uma fissura típica de tração diagonal em um dos lados e fissura de flexão no outro lado da laje. Na face inferior das lajes a fissura se formou inclinada em relação à borda da peça, indicando que o ângulo de fissuração foi variável nas nervuras internas. A mudança de inclinação das fissuras nas nervuras internas ao longo da largura da laje alveolar pode ser constatada pela observação da fissura formada na face inferior das lajes, como mostrado na Figura 5.7 para a laje M2-B*. Em todos os modelos houve escorregamento das cordoalhas, com valor médio de 4 mm, observado após o final do ensaio e junto à nervura externa onde ocorreu a ruptura por tração

Figura 5.7 – Panorama de fissuração após a ruína dos modelos M2-B*, M3-A* e M3-B*



a) Lateral direita – M2-B*

b) Lateral esquerda M2-B*

c) Face inferior - M2-B*



d) Lateral direita – M3-A*

e) Lateral esquerda - M3-

f) Face inferior - M3-A*

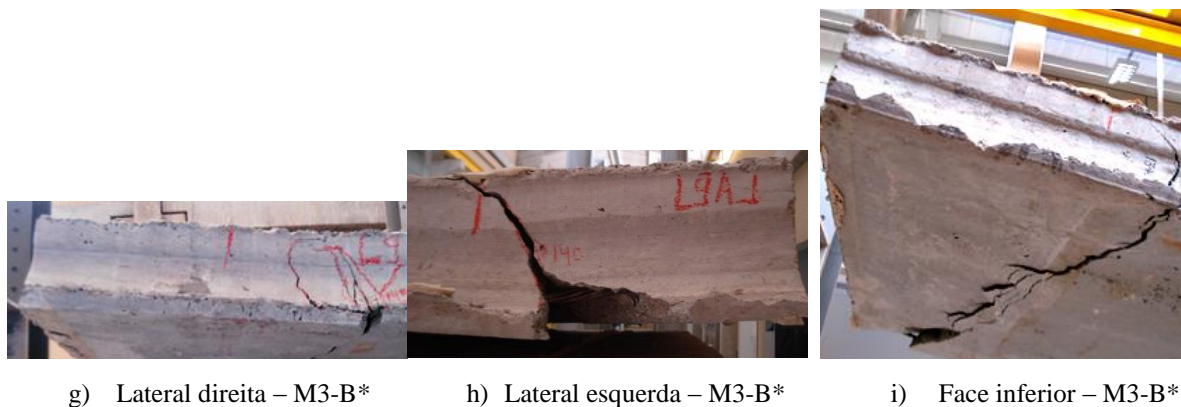
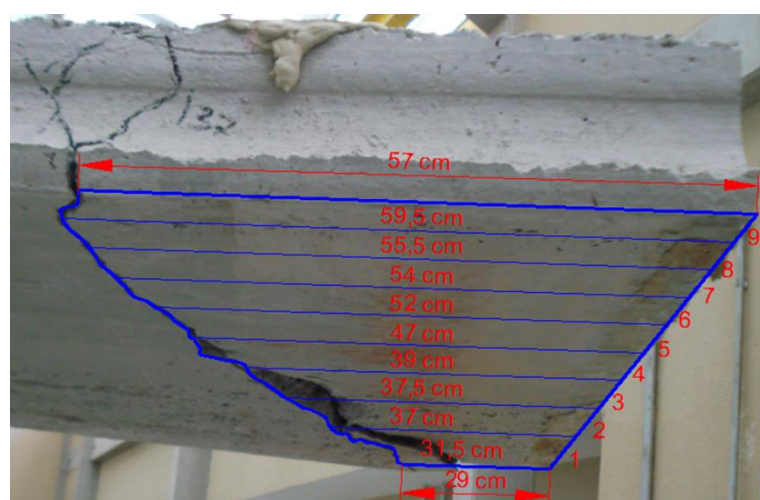


Figura 5.8 – Mapeamento da fissuração da face inferior do modelo M2-B*.



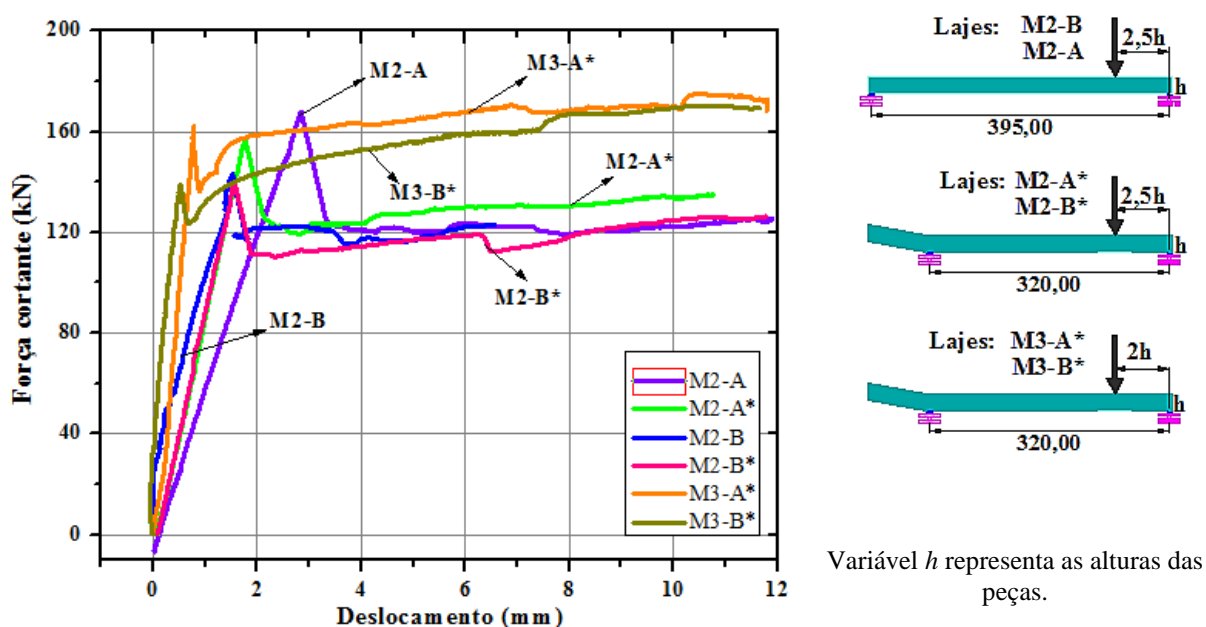
Os deslocamentos verticais no meio do vão das lajes e no ponto de aplicação da carga são mostrados no Apêndice E. Já o deslocamento vertical médio no ponto de aplicação do carregamento (obtido da média de dois transdutores em lados opostos da laje) é mostrado na Figura 5.9. Esses deslocamentos foram corrigidos em função do deslocamento vertical dos apoios.

De forma geral, as lajes da Série II apresentaram comportamento linear até atingir a força cortante última, quando houve uma queda brusca da resistência da laje, a qual se manteve praticamente constante até o final do ensaio. A exceção foram as lajes M3-A* e M3-B* com o carregamento distante 2h do apoio. Nesse caso, depois da ruptura por tração diagonal (com valor próximo ao das demais lajes) essas lajes suportaram acréscimos de carregamento, vindo a atingir força cortante última 18% maior que resistência média das lajes com aplicação do carregamento distante 2,5h do apoio. Essas lajes também apresentaram maior rigidez devido à menor distância do carregamento ao apoio. Esse resultado mostra que essas lajes alveolares de

pequena altura são fortemente influenciadas pela distância do ponto de aplicação do carregamento ao apoio.

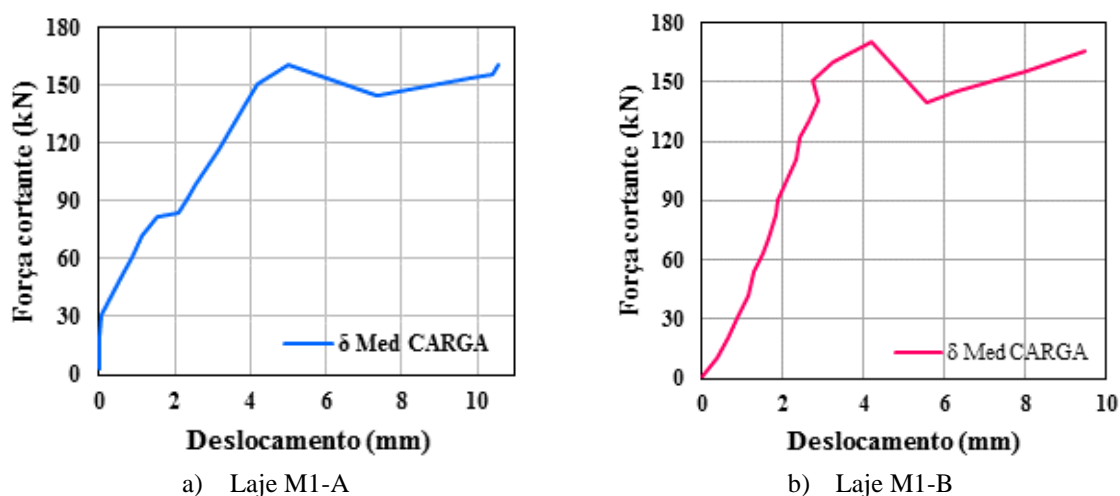
Já a redução do vão da laje de 3,95 m para 3,2 m, resultado do ensaio no lado oposto da laje, teve pouca influência na rigidez do modelo e nenhuma influência na resistência à força cortante (Tabela 5.1). Nas lajes com relação a/h igual a 2,5, a principal influência foi a fissuração da laje à flexão antes de atingida a resistência à força cortante. Nesse caso, quando não houve essa fissuração, a resistência à força cortante foi 18% maior que a média da resistência à força cortante das demais lajes com fissuração por flexão (Tabela 5.1).

Figura 5.9 – Força cortante versus deslocamento lajes sem capa da Série II.



A Figura 5.9 apresenta o gráfico de força cortante por deslocamento para as lajes de referência, os deslocamentos finais para cada laje foram ajustados de acordo com os deslocamentos medidos em cada bloco de apoio.

Na Figura 5.10 é mostrado o deslocamento no ponto de aplicação do carregamento para as lajes da Série I ensaiadas por Antunes (2012). A principal diferença com relação às lajes da série II é a menor redução da resistência após atingida a força cortante última. Isso se deve ao maior valor da força de protensão nas lajes da série I pela maior força de protensão. Depois de atingida a resistência à força cortante, a resistência residual se manteve praticamente constante até o final do ensaio enquanto ocorria o escorregamento das cordoalhas de protensão.

Figura 5.10 – Gráfico força *versus* deslocamento médio laje M1-A e M1-B. [Adaptação de Antunes (2012)].

5.3.2 Comparação com modelos de cálculo

Os resultados experimentais foram comparados com o modelo de cálculo da norma NBR 14861 (ABNT, 2011), cuja formulação baseia-se no mecanismo de flexo-cortante. Além desta, foram feitas comparações com os modelos apresentados no Eurocode 2 (CEN, 2004), na EN 1168 (CEN, 2008) e no ACI 318 (ACI, 2008). Em todas essas três normas foram utilizadas as formulações recomendadas para a ruptura por tração diagonal. A resistência à força cortante estimada pela aplicação desses modelos a cada uma das lajes ensaiadas é mostrada no Apêndice C.

Foram adotadas algumas considerações para a aplicação dos modelos de cálculo. Foi utilizada a resistência média à tração do concreto, a qual foi estimada como sendo igual a 90% da resistência à tração por compressão diametral mostrada na Tabela 5.2, isto é, $f_{ctm} = 3,81$ MPa. Os valores de da tensão efetiva de protensão (σ_{cp}), da taxa de armadura (ρ) e do coeficiente de escala (k) foram calculados individualmente para cada modelo da série II. Esses valores foram calculados com as propriedades geométricas reais de cada peça. Para a largura das nervuras (Σb_w), a altura das lajes (d), altura da laje (h) e largura dos alvéolos (b_c) foram utilizados os valores medidos em laboratório para cada laje (Apêndice D).

A tensão efetiva de protensão (σ_{cp}) depende do parâmetro α , o qual depende da distância da seção em análise à face livre da laje (ℓ_x) e do comprimento de transferência (ℓ_{pt2}), uma vez que a força de protensão no sistema de pré-tração é transmitida ao concreto por meio da aderência entre o aço e o concreto. No caso da NBR 14861, o comprimento de transferência (ℓ_{pt2}) recomendado é fixo e igual a 85ϕ . Porém, os valores da resistência à força cortante obtidos com

esse valor foram bastante inferiores em relação aos valores experimentais. Uma das razões para isso é que o comprimento de transferência da força de protensão ao concreto é determinado a partir do valor de cálculo da resistência à tração do concreto, portanto apresenta um valor maior que o comprimento real. Para comparação com os valores experimentais, optou-se por adotar o comprimento de transferência recomendado pelo ACI 318 e igual a 50ϕ . Esse valor é próximo ao valor de 60ϕ adotado por Marquesi (2014) em suas análises.

Para aplicação do modelo de cálculo sugerido pelo Eurocode 2 e pela EN 1168, foi considerada liberação não gradual da protensão, o que equivale a admitir o coeficiente α_1 igual a 1,25. Admitindo cordoalha de sete fios e utilizando a resistência média à tração do concreto da laje alveolar determinada nos ensaios, chega-se ao valor aproximado do $\ell_{pt2} = 31\phi$ (29,79 cm). Esse valor é inferior ao sugerido pela ACI 318.

Outra consideração importante é que apenas o modelo recomendado pela EN 1168 sugere um ponto crítico, distante ℓ_x segundo a Figura 5.11 da extremidade livre da laje, onde se dá o início da fissuração por tração diagonal. Essa distância define a seção crítica onde deve ser calculada a resistência à força cortante da laje. No caso dos ensaios, a força cortante solicitante nas lajes era constante entre o apoio e o ponto de aplicação do carregamento. Já a força cortante resistente varia com a distância à borda livre da laje devido à transferência gradual da força de protensão ao concreto. Por essa razão, na análise foram consideradas algumas seções para efeito de comparação dos resultados teóricos com os resultados experimentais.

A primeira seção analisada foi a localizada sob o ponto de aplicação do carregamento, isto é, distante $b + 2,5h$ da borda da laje, onde h representa a altura da laje e b a largura do apoio. Isso representa uma seção distante 42,5 cm da borda da laje. A Tabela 5.4 mostra a relação entre a resistência à força cortante prevista pelos modelos de cálculo e a força cortante última experimental obtida nos ensaios das séries I e II. Observa-se que a maioria dos modelos de cálculo superestimaram a resistência à força cortante das lajes, o que demonstra que a seção crítica das lajes está mais próxima ao apoio e não na seção de aplicação do carregamento.

Tabela 5.4 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: = 42,5 cm

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}$ ^(a)	V_{ACI318} / V_{exp} ^(b)	V_{EC2} / V_{exp} ^(c)	V_{EN1168} / V_{exp} ^(d)
Série I (ANTUNES, 2012)					
M1-A	154,59	0,90	1,22	1,65	1,33
M1-B	159,26	0,94	1,07	1,76	1,42
Série II					
M2-A	163,97	0,94	1,11	1,76	1,37
M2-A*	148,71	1,05	1,24	1,98	1,54
M2-B	134,73	1,17	1,39	2,17	1,69
M2-B*	133,90	1,16	1,37	2,18	1,69
M3-A**	168,61	0,91	1,14	1,82	1,41
M3-B**	160,15	0,94	1,17	1,85	1,44
Média:		1,25	1,21	1,90	1,48
Desvio Padrão:		0,14	0,11	0,20	0,14
Coefficiente de Variação:		11,32%	9,44%	10,38%	9,41%

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28); (d) Eq. (3.28 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

A segunda seção analisada foi a recomendada pela EN 1168 (CEN, 2008), isto é, distante $b + 0,5h$ da borda da laje. Isso representa, para a seção de projeto, uma distância de 10,5 cm da borda da laje. A Tabela 5.5 mostra a relação entre a resistência à força cortante prevista pelos modelos de cálculo e a força cortante última experimental obtida nos ensaios das séries I e II.

Tabela 5.5 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}$ ^(a)	V_{ACI318} / V_{exp} ^(b)	V_{EC2} / V_{exp} ^(c)	V_{EN1168} / V_{exp} ^(d)	ℓ_x (cm)
Série I						
M1-A	154,59	0,71	0,73	1,21	0,97	12,66
M1-B	159,26	0,74	0,78	1,35	1,08	12,66
Série II						
M2-A	163,97	0,77	0,77	1,12	1,13	13,59
M2-A*	148,71	0,86	0,86	1,63	1,28	13,57
M2-B	134,73	0,96	0,96	1,78	1,40	13,53
M2-B*	133,90	0,95	0,95	1,79	1,40	13,53
M3-A**	168,61	0,79	0,80	1,49	1,17	13,56
M3-B**	160,15	0,81	0,81	1,52	1,19	13,59
Média		0,82	0,83	1,49	1,20	-
Desvio Padrão:		0,09	0,08	0,25	0,15	-
Coef. de Variação::		11,24%	10,19%	16,81%	12,48%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28); (d) Eq. (3.28 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Observa-se dessa tabela que o modelo de cálculo recomendado pelo ACI 318 foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, com uma diferença média de 17% a favor da segurança e com um baixo coeficiente de variação (cerca de 10%). O modelo de cálculo

recomendado pela NBR 14861 também apresentou valores a favor segurança, com boa aproximação e baixo coeficiente de variação. Já os modelos recomendados pelo Eurocode 2 e pela EN1168 mostraram-se contrários à segurança e com maior desvio padrão para o valor de comprimento médio de transferência adotado de 31ϕ .

O resultado dessas duas análises mostra que a resistência à força cortante dos modelos sofre forte influência da seção escolhida para se avaliar a resistência. Nesse sentido, na terceira análise foi tomada para cada laje a distância real do ponto crítico à borda da laje (Tabela 5.6). Esse valor foi obtido pela distância entre o centro do apoio a borda da laje e o ponto de intersecção da fissura na nervura externa com a altura da laje abaixo dos alvéolos (h_{pc}).

Figura 5.11 – Localização do h_{pc} e determinação do l_x experimental

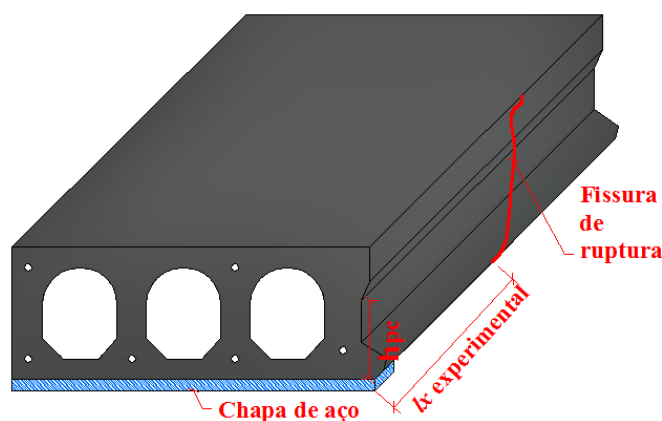


Tabela 5.6 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: l_x experimental

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}$ (a)	V_{ACI318} / V_{exp} (b)	V_{EC2} / V_{exp} (c)	V_{EN1168} / V_{exp} (d)	l_x (cm)
Série II						
M2-A	163,97	0,87	0,77	1,76	1,37	30,70
M2-A*	148,71	0,97	0,86	1,94	1,51	27,80
M2-B	134,73	1,07	0,97	2,17	1,68	29,40
M2-B*	133,90	1,07	0,93	2,18	1,69	29,70
M3-A**	168,61	0,91	0,80	1,82	1,41	33,20
M3-B**	160,15	0,92	0,81	1,85	1,44	31,40
Média		0,97	0,86	1,95	1,52	-
Desvio Padrão:		0,08	0,08	0,18	0,14	-
Coef. de Variação:		8,73%	9,09%	9,16%	9,16%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28); (d) Eq. (3.28 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Os resultados da Tabela 5.6 mostram que o modelo de cálculo recomendado pela NBR 14861 foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais da série II, com uma diferença de apenas 3% e menor coeficiente de variação quando comparado à análise da Tabela 5.5. O

modelo do ACI 318 também se mostrou a favor da segurança, enquanto os demais modelos estimaram valores maiores que os observados nos ensaios.

Com o intuito de se obter uma expressão para avaliação da distância do ponto crítico à borda da laje, foi utilizado o valor proposto por Marquesi (2014). Nesse trabalho, o autor partiu da formulação de Yang (1994), e utilizando resultados de ensaios em lajes alveolares com alvéolos circulares ou oblongos, propôs um coeficiente β dado por:

$$\beta = \varphi + \frac{h_{pc} - d'}{h} \leq 1 \quad (5.3)$$

Com isso, a distância do ponto crítico à borda da laje é avaliada por:

$$\ell_x = b + \beta h \quad (5.4)$$

A variável β é o coeficiente que considera indiretamente a redução de resistência à tração diagonal do elemento pelas tensões de cisalhamento oriundas da introdução da protensão; φ é um fator de ajuste, ao qual o autor atribuiu o valor 0,50; h_{pc} é a altura do ponto crítico, determinada pela menor espessura da laje abaixo dos alvéolos; d' é a distância da borda inferior da laje até o centroide das armaduras inferiores e h é a altura da seção da laje sem capa. Para verificação da validade da equação (5.4), a resistência à força cortante foi novamente estimada e comparada com os resultados experimentais da série II. Utilizando as propriedades geométricas das lajes ensaiadas (Tabela 4.1), chega-se no valor médio para $\beta=0,66$. Os resultados são mostrados na Tabela 5.7.

Observa-se que todos os modelos de cálculo, com exceção do Eurocode 2, forneceram valores a favor da segurança, porém com uma maior diferença em relação aos resultados experimentais. Neste caso, o modelo de cálculo da EN 1168 foi o que mais se aproximou com uma diferença média de 9%. Os modelos de cálculo da NBR 14861 e do ACI 318 também apresentaram valores a favor de segurança.

Tabela 5.7 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta \cdot h$ ($\phi = 0,5$ e $\beta = 0,66$ segundo Marquesi, (2014)).

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (mm)
M2-A	163,97	0,78	0,81	1,05	0,82	16,51
M2-A*	148,71	0,90	0,90	1,18	0,92	16,39
M2-B	134,73	0,96	1,00	1,29	1,01	16,20
M2-B*	133,90	0,84	0,98	1,29	1,01	16,03
M3-A**	168,61	0,77	0,83	1,08	0,84	16,19
M3-B**	160,15	0,78	0,84	1,10	0,86	16,09
Média:		0,85	0,89	1,16	0,91	-
Desvio Padrão:		0,08	0,08	0,11	0,08	-
Coef. de Variação:		9,64%	9,33%	9,10%	9,11%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28); (d) Eq. (3.28 com o coeficiente minorador global $\phi = 0,80$).

Finalmente, a equação (5.3) foi modificada pela alteração do coeficiente ϕ de modo que a distância da borda da laje ao ponto crítico (ℓ_x) representasse os valores experimentais mostrados na Tabela 5.6. Na Figura 5.11 é mostrada a correlação para determinação do valor desse coeficiente. Dessa figura, obtém-se $\phi = 1,33 \pm 0,11$. Os resultados da resistência à força cortante avaliada pelos modelos de cálculo nessa seção da laje alveolar são mostrados na Tabela 5.8. Observa-se que, neste caso, os modelos de cálculo do ACI 318 e da EN 1168 apresentaram boa aproximação com os resultados experimentais, com diferença média inferior a 8% e coeficiente de variação inferior a 10%.

Tabela 5.8 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta \cdot h$ ($\phi = 1,33$ e $\beta = 1,49$ médio)

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-A	163,97	0,85	1,03	1,79	1,37	30,44
M2-A*	148,71	0,98	0,93	2,01	1,54	30,38
M2-B	134,73	1,05	0,83	2,20	1,69	30,27
M2-B*	133,90	0,90	0,86	2,20	1,69	30,26
M3-A**	168,61	0,83	1,00	1,84	1,41	30,33
M3-B**	160,15	0,85	0,98	2,31	1,44	30,45
Média:		0,92	0,94	2,06	1,52	-
Desvio Padrão:		0,09	0,08	0,21	0,14	-
Coef. de Variação:		10,03	8,61%	10,31%	9,26%	-

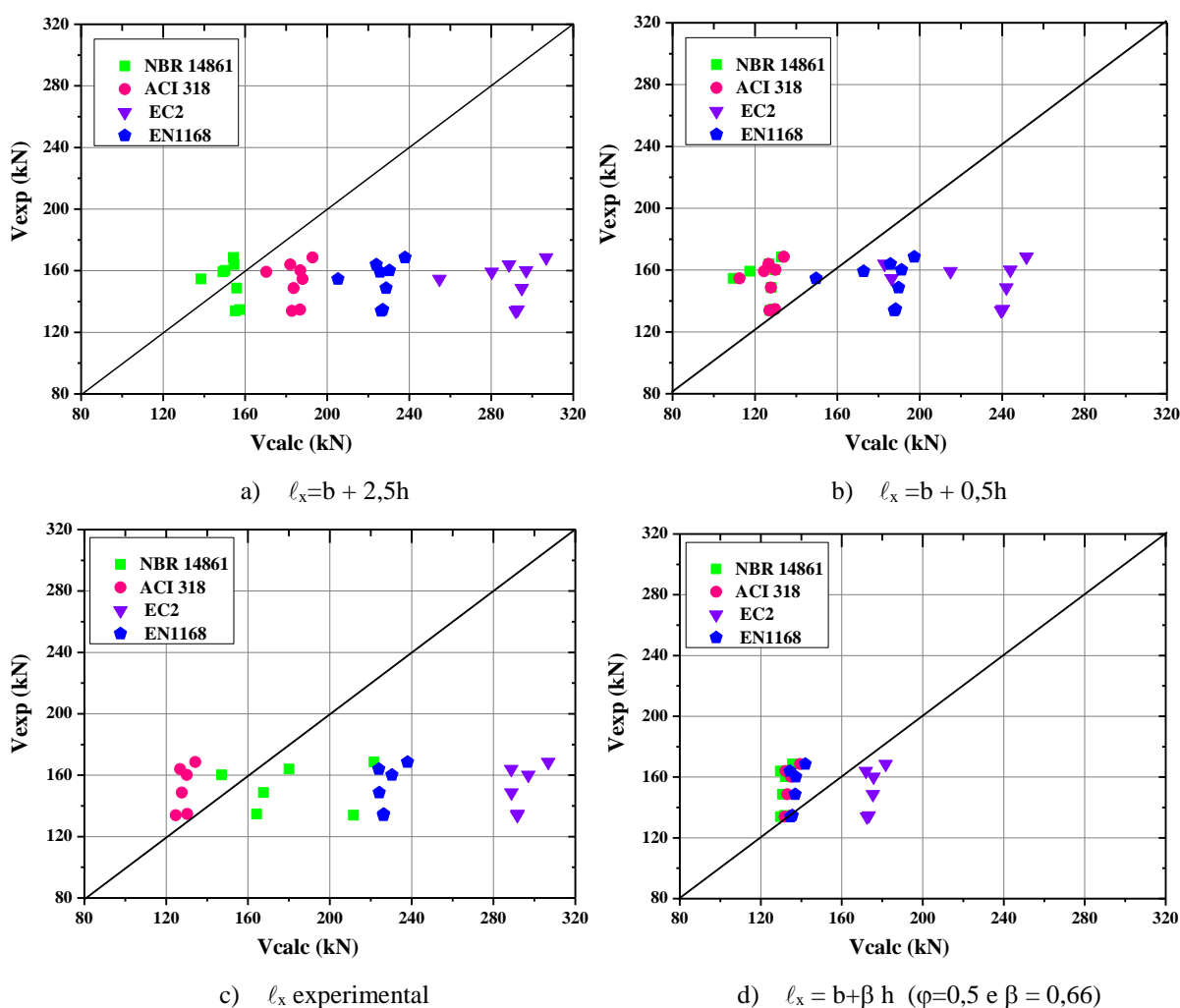
(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28); (d) Eq. (3.28 com o coeficiente minorador global $\phi = 0,80$).

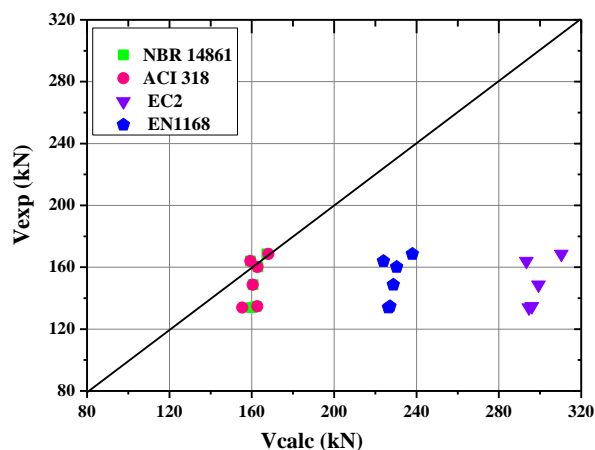
A Figura 5.12 apresenta os gráficos comparativos entre a força cortante experimental e a calculada variando-se a seção de análise. Tomando a situação em que se utiliza a seção crítica

experimental, conclui-se que o modelo de cálculo da norma NBR 14861 foi o que melhor estimou a resistência à força cortante das lajes ensaiadas (diferença média de 3% e coeficiente de variação menor que 9%). Entretanto, essa norma não indica a seção crítica para a avaliação da resistência à força cortante.

Quando se analisa as várias possibilidades de seção crítica para as lajes ensaiadas, observa-se que a melhor estimativa da resistência à força cortante da laje alveolar se deu quando se utilizam os modelos sugeridos pelo ACI 318 e pela EN 1168 com a seção crítica determinada pelas equações (5.3) e (5.4) (MARQUESI, 2014), isto é, diferença média de 10% a favor da segurança e coeficiente de variação menor que 10%. Neste caso, o modelo da norma NBR 14861 também pode ser utilizado, porém com valores, em média, 8% a favor da segurança.

Figura 5.12 – Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, variando a seção de análise.



e) $\ell_x = b + \beta h$ ($\phi = 1,33$ e $\beta = 1,49$ médio)

5.4 LAJES ALVEOLARES COM CAPA

Neste item são apresentados os resultados e as análises das lajes alveolares ensaiadas com capa estrutural de 5 cm e 9 cm de altura.

5.4.1 Modo de ruptura e resistência à força cortante

A força cortante última experimental para as lajes alveolares com capa é mostrada na Tabela 5.9, assim como a tensão cisalhante convencional para as lajes alveolares das séries I e II.

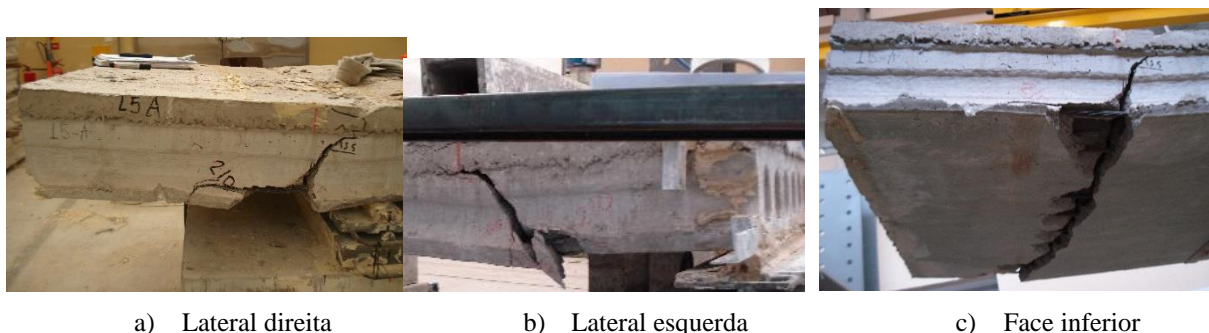
Tabela 5.9 – Força cortante experimental para as lajes com capa e sem alvéolos preenchidos das séries I e II.

Modelo	$V_{u,exp}$ (kN)	b_w (mm)	d (mm)	$\tau_c = V_{u,exp} / b_w d$ (MPa)	Tipo de ruptura	Ângulo da fissura na nervura externa (θ) Direita / Esquerda	
Série I (ANTUNES, 2012)							
M1-5-0-A	143,83	387,51	127,31	2,92	Força cortante e fendilhamento	-	-
M1-5-0-B	154,95	406,93	126,69	3,01	Força cortante e fendilhamento	-	-
Série II							
M2-5-0-A	198,31	444,72	136,48	3,27	Força cortante e flexão	53°	61°
M2-5-0-A*	172,02	442,66	136,5	2,85	Força cortante e Flexão	52°	58°
M2-5-0-B	163,43	445,21	141,2	2,60	Força cortante	44°	49°
M2-9-0-A*	223,14	438,63	139,5	3,65	Força cortante e Flexão	58°	41°
M2-9-0-B*	246,86	453,99	139,18	3,91	Força cortante e Flexão	56°	90°

Nesse caso, a altura (d) utilizada foi a altura da laje de referência, sem considerar a capa. A força cortante última experimental foi calculada considerando o peso próprio da laje, incluindo a capa de concreto.

Nas lajes da Série I, a resistência à força cortante foi próxima dos valores obtidos das lajes sem capa. Assim, Antunes (2012) concluiu que a capa não aumentou a resistência à força cortante da laje e atribuiu esse fato ao descolamento da capa na região entre o apoio e o ponto de aplicação da força. Na Figura 5.13, pode-se observar a configuração de fissuração do modelo M2-5-0-A por tração diagonal.

Figura 5.13 – Ruptura do modelo M2-5-0-A



As lajes M2-5-0-A* e M2-5-0-B, mostradas nas Figuras 5.14 e 5.15, apresentaram comportamento muito semelhante ao da Figura 5.13. Todas as peças romperam por mecanismo de cisalhamento, nas duas laterais. Na peça M2-5-0-A* a capa permaneceu sem descolamento, apresentando boa aderência entre os concretos da laje alveolar e da capa estrutural. Já na peça M2-5-0-B, observou-se o descolamento da capa, caracterizado pelo surgimento de uma fissura horizontal formada entre a laje e a capa.

Figura 5.14 – Ruptura do modelo M2-5-0-A*.

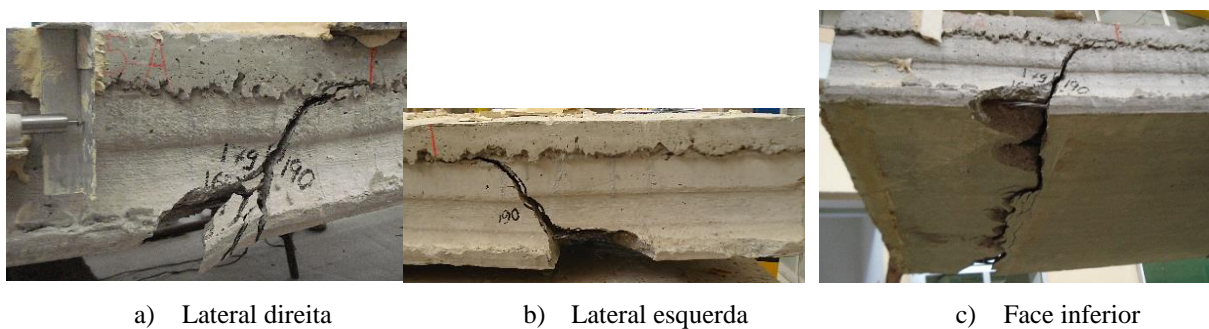
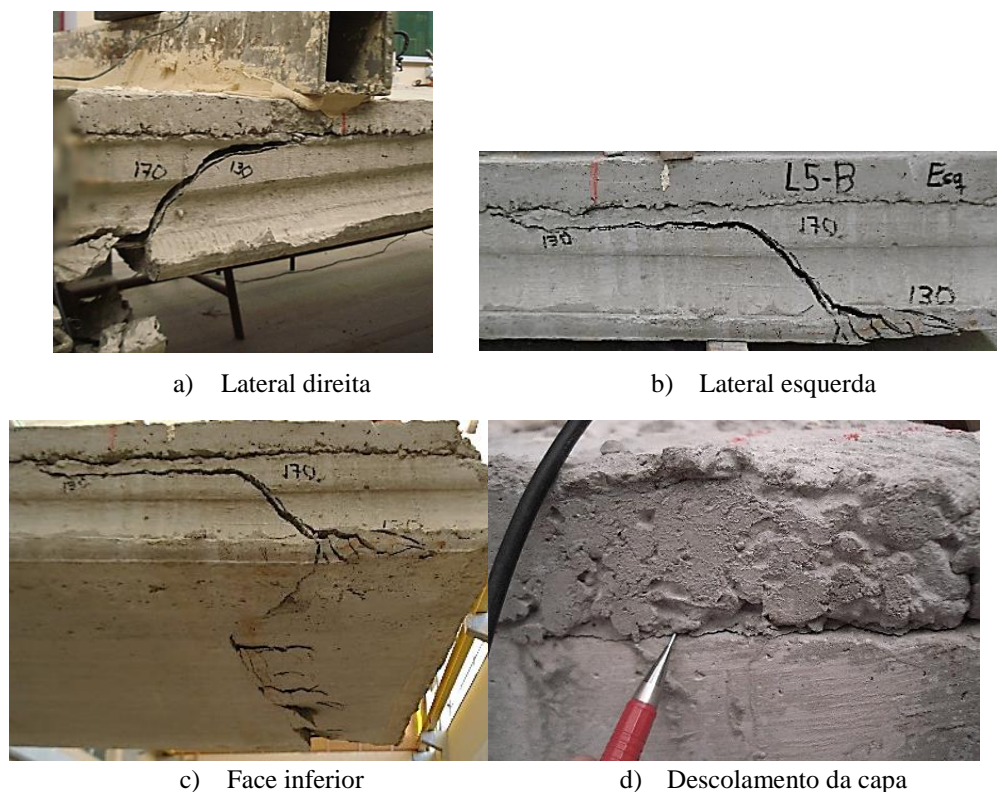


Figura 5.15 – Ruptura do modelo M2-5-0-B.



Os modelos M2-9-0-A* e M2-9-0-B*, com presença da capa com altura de 9 cm, sofreram ruína por tração diagonal com a fissura partindo do ponto de aplicação da carga em direção ao apoio de primeiro gênero (Figuras 5.16 e 5.17).

Figura 5.16 – Ruptura do modelo M2-9-0-A*.

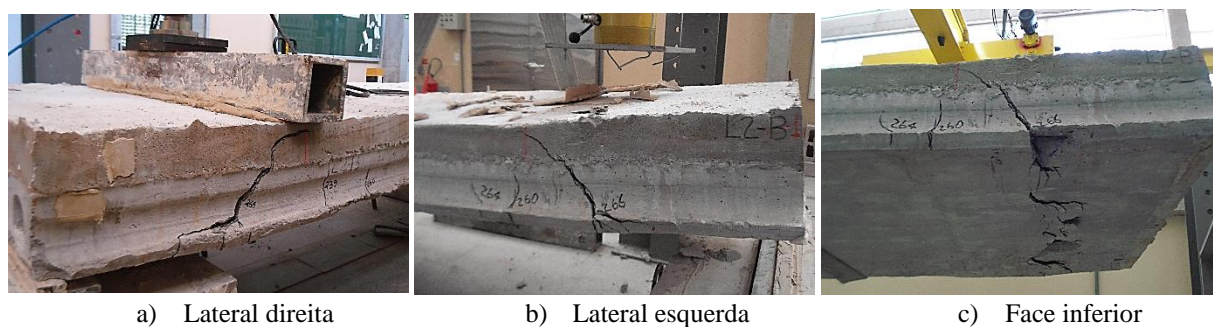
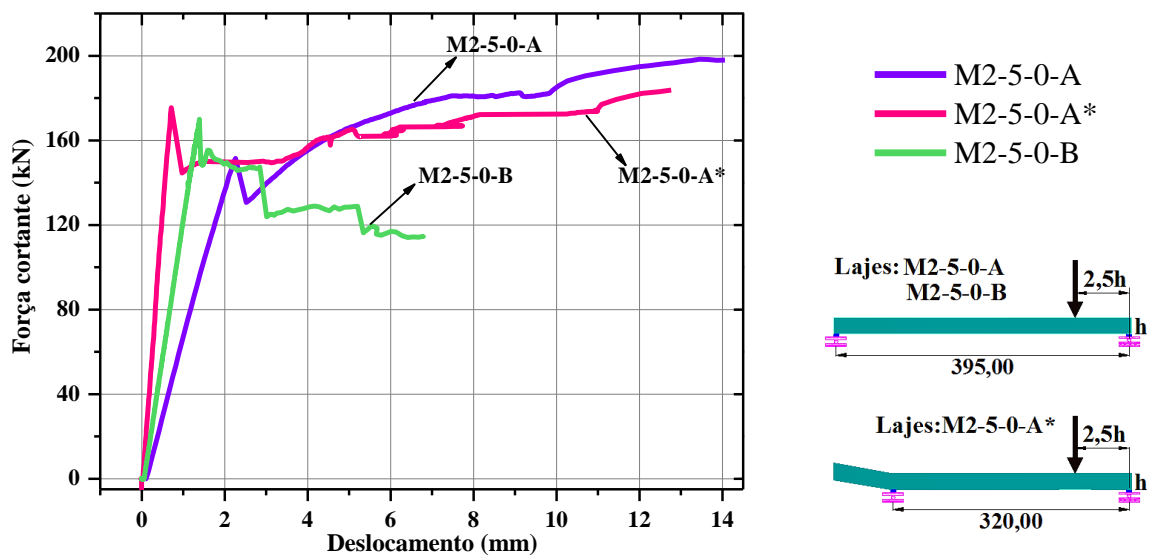


Figura 5.17 – Ruptura do modelo M2-9-0-B*.

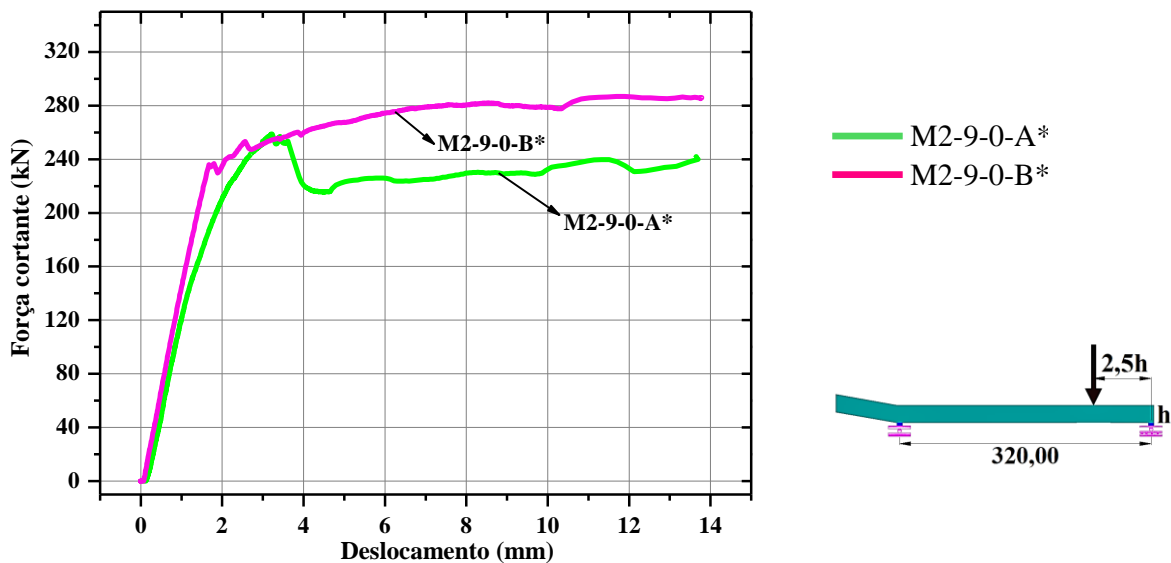


A fissura de cisalhamento teve início na laje e penetrou na capa até um pouco antes da face superior. Outra característica notada foi o surgimento de fissuras de flexão próximas ao ponto de aplicação da carga que se propagaram em direção ao meio do vão. Foi observada boa aderência entre o concreto da laje alveolar e o da capa, pois não foi notada fissuração na interface da capa com a laje. A Figura 5.18 mostra a curva de deslocamento vertical médio medido pelos transdutores T2 e T3 na região de aplicação do carregamento em função da força aplicada no ensaio das lajes as Série II, considerando a carga devido ao peso próprio.

Figura 5.18 – Força cortante *versus* deslocamento para lajes com capa, série II.



a) Lajes com capa de 5 cm de altura



b) Lajes com capa de 9 cm de altura

Os modelos M2-9-0-A* e M2-9-0-B* apresentaram maior rigidez que as lajes com capa de 5 cm em função da maior altura da capa nessas lajes. Além disso, nota-se que os modelos M2-

5-0-B e M2-9-0-B* apresentaram decréscimo de resistência após o surgimento da fissura diagonal nas nervuras. Isso indica que deve ter havido escorregamento da capa nessas lajes, mesmo que não tenha sido observada fissuração durante o ensaio. Isso justifica o menor valor da tensão de cisalhamento convencional nessas lajes.

Quanto à contribuição da capa estrutural nas lajes da Série II, ela pode ser avaliada pela tensão de cisalhamento convencional. A força cortante última experimental para as lajes alveolares com capa é mostrada na Tabela 5.9, assim como a tensão cisalhante convencional para as lajes alveolares das séries I e II. Nesse caso, a altura (d) utilizada foi a altura da laje de referência, sem considerar a capa. A força cortante última experimental foi calculada considerando o peso próprio da laje, incluindo a capa de concreto.

A média da tensão cisalhante obtida para as lajes alveolares com capa de 5 cm foi de 2,90 kN/mm², com desvio padrão de 0,34, e para as lajes alveolares com capa de 9 cm foi de 3,78 kN/mm², com desvio padrão de 0,18. Esses valores foram obtidos considerando apenas a altura da laje alveolar e são 12,41% e 48,82% maiores que a tensão de cisalhamento convencional das lajes de referência. Com isso, pode-se concluir que a capa contribuiu com o aumento da resistência das lajes à força cortante, sendo esse aumento proporcional ao aumento da altura útil das lajes proporcionado pela capa (37% para a laje com capa de 5 cm e 67% para a laje com capa de 9 cm).

5.4.2 Comparação com modelos de cálculo

Para as lajes com capa, os resultados experimentais foram comparados com o modelo de cálculo indicado pela NBR 14861 (ABNT, 2011). Além disso, eles foram comparados com os modelos sugeridos pelo Eurocode 2 (2004), pela EN 1168 (CEN, 2008) e pelo ACI 318 (ACI, 2008). Os valores da resistência à força cortante estimados para cada laje estão no Apêndice C.

Para aplicação dos modelos de cálculo da NBR 14861 para a parcela V_{c1} formulação a altura útil de cada laje foi tomada como sendo igual à altura útil da laje alveolar mais a espessura da capa (d') medida no laboratório antes de cada ensaio e para a parcela V_{p1} , correspondente a protensão utilizou-se a altura da laje simples (d). A resistência à tração direta do concreto utilizada foi tomada igual a 90% da resistência à tração por compressão diametral mostrada na Tabela 5, isto é, $f_{ctm} = 3,81$ MPa. Os valores médios de $\sigma_{cp} = 5,7$ MPa, $\rho_1 = 0,006$ e $k = 1,39$,

para as lajes com capa. Para a largura das nervuras (Σb_w) foram utilizados os valores medidos em laboratório para cada laje.

O modelo de cálculo do ACI 318, a altura útil de cada laje foi tomada como sendo igual à altura útil da laje alveolar mais a espessura da capa medida no laboratório antes de cada ensaio o valor de $f_{pc} = 5,68$ MPa. A resistência à tração direta do concreto utilizada foi tomada igual a 90% da resistência à tração por compressão diametral mostrada na Tabela 5.2, isto é, $f_{ctm} = 3,81$ MPa. Para a largura das nervuras (Σb_w) foram utilizados os valores medidos em laboratório para cada laje.

Para aplicação dos modelos de cálculo do Eurocode 2 e da EN 1168, foram tomados esses mesmos valores. Para a consideração da contribuição da capa nesses modelos, foi utilizada a inércia e o momento estático da seção composta, conforme equação (3.29). Foi descontada a força cortante devida ao peso próprio atuando apenas na laje alveolar (parcela $V_{I,d}$). Em todos os modelos de cálculo, foi considerada a transmissão gradual da força de protensão para a laje por meio do comprimento de transferência (ℓ_{pt2}), com os mesmos valores utilizados na análise das lajes alveolares sem capa.

Foram analisadas as mesmas seções de cálculo utilizadas para a análise das lajes sem capa. A diferença é que, neste caso, a altura (h) foi tomada igual à altura real das lajes alveolares mais a altura da capa estrutural. Para a seção de análise localizada a $\ell_x = b + 2,5h$, (Tabela 5.10), observa-se que tanto na Série I quanto na Série II os valores que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram os estimados pelo modelo de cálculo proposto pela NBR 14861 (ABNT, 2011), com média igual a 1,01 e coeficiente de variação menor que 11%. Os demais modelos de cálculo superestimaram a resistência à força cortante das lajes com capa.

Tabela 5.10 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 2,5h$.

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série I (ANTUNES, 2012)						
M1-5-0-A	143,83	1,18	2,03	2,53	2,03	55,00
M1-5-0-B	154,95	1,11	1,90	2,46	1,98	55,00
Série II						
M2-5-0-A	198,31	0,94	1,39	1,99	1,55	55,00
M2-5-0-A*	172,02	1,08	1,58	2,28	1,78	55,00
M2-5-0-B	163,43	1,16	1,69	2,42	1,89	55,00
M2-9-0-A*	223,14	0,98	1,52	2,03	1,58	65,00
M2-9-0-B*	246,86	0,90	1,38	1,90	1,48	65,00
Média:		1,01	1,54	2,23	1,76	-
Desvio Padrão:		0,11	0,25	0,22	0,22	-
Coef. de Variação:		10,57%	15,24%	9,72%	12,59%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29); (d) Eq. (3.29 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Ao se adotar a seção de análise localizada a $\ell_x = b + 0,5h$ (Tabela 5.11), nota-se que na Série I a melhor estimativa foi a da equação da norma NBR 14861. Já para a Série II, a melhor estimativa foi a da equação sugerida pelo ACI 318, com uma diferença de 8%, em média, maior que os resultados experimentais. Neste caso, a equação da norma NB 14861 subestimou em 14% os valores experimentais, com um coeficiente de variação menor que 11%. As equações propostas pelo Eurocode 2 e pela EN 1168 superestimaram em até 98% as resistências à força cortante das lajes.

Tabela 5.11 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série I (ANTUNES, 2012)						
M1-5-0-A	143,83	0,97	1,34	1,99	1,60	13,00
M1-5-0-B	154,95	0,91	1,25	1,93	1,55	13,00
Série II						
M2-5-0-A	198,31	0,76	0,91	2,77	1,31	13,37
M2-5-0-A*	172,02	0,87	1,04	1,89	1,50	13,37
M2-5-0-B	163,43	0,93	1,11	2,01	1,59	13,40
M2-9-0-A*	223,14	0,81	1,00	1,69	1,33	13,58
M2-9-0-B*	246,86	0,74	0,91	1,58	1,24	13,60
Média:		0,86	1,08	1,98	1,45	-
Desvio Padrão:		0,09	0,16	0,39	0,15	-
Coef. de Variação:		10,35%	15,17%	19,48%	10,32%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29); (d) Eq. (3.29 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Ao se adotar a seção de análise com a distância ℓ_x determinada nos ensaios (Tabela 5.12), verifica-se um melhor ajuste para formulação da norma NBR 14861, com uma diferença média

de 5% a favor da segurança e um coeficiente de variação menor que 5%. A norma americana ACI 318 também apresenta uma boa aproximação, com uma diferença média de 15% a favor da segurança. Para as formulações do Eurocode 2 e da EN 1168, os valores obtidos foram contrários à segurança, com uma diferença de até 109% pelo Eurocode 2.

Tabela 5.12 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: ℓ_x experimental

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série II						
M2-5-0-A	198,31	0,91	0,78	1,99	1,55	40,80
M2-5-0-A*	172,02	0,97	0,88	2,27	1,77	29,25
M2-5-0-B	163,43	1,00	0,93	2,25	1,76	22,80
M2-9-0-A*	223,14	0,95	0,86	2,04	1,59	41,15
M2-9-0-B*	246,86	0,90	0,79	1,90	1,48	48,05
Média		0,95	0,85	2,09	1,63	-
Desvio Padrão:		0,04	0,06	0,16	0,13	-
Coef. de Variação:		4,74%	7,14%	7,86%	8,05%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29); (d) Eq. (3.29 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Ao se adotar a formulação para a determinação da seção crítica proposta por Marquesi (2014), nota-se uma melhor adequação do equacionamento proveniente da norma NBR 14861 (ABNT, 2014), com uma variação de 15%, a favor da segurança, em relação à média dos resultados experimentais e coeficiente de variação menor que 10% (Tabela 5.13). A equação proposta pelo ACI 318 subestimou em 18% os valores experimentais, enquanto as demais normas superestimaram a resistência das lajes ensaiadas.

Tabela 5.13 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\phi=0,5$ e $\beta = 0,67$ médio, segundo Marquesi, (2014).

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-5-0-A	198,31	0,78	0,75	1,71	1,35	16,04
M2-5-0-A*	172,02	0,90	0,86	1,97	1,55	16,29
M2-5-0-B	163,43	0,96	0,92	2,09	1,65	16,41
M2-9-0-A*	223,14	0,84	0,82	1,76	1,38	16,61
M2-9-0-B*	246,86	0,77	0,75	1,64	1,29	16,50
Média:		0,85	0,82	1,84	1,45	-
Desvio Padrão:		0,08	0,07	0,19	0,15	-
Coef. de Variação:		9,64%	8,80%	10,31%	10,41%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29); (d) Eq. (3.29 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Ao se adotar a formulação para a determinação da seção crítica proposta no item 5.3 para as lajes alveolares sem capa, novamente a equação da NBR 14861 (ABNT, 2011) foi a que apresentou melhor ajuste em relação aos resultados experimentais (Tabela 5.14). O valor estimado foi, em média, 8% inferior aos resultados experimentais, com um coeficiente de variação de 10%. Em seguida vem a estimativa pela equação do ACI 318, sendo que o Eurocode 2 e a EN 1168 superestimaram a resistência à força cortante das lajes.

Tabela 5.14 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\phi = 1,33$ e $\beta = 1,51$ médio)

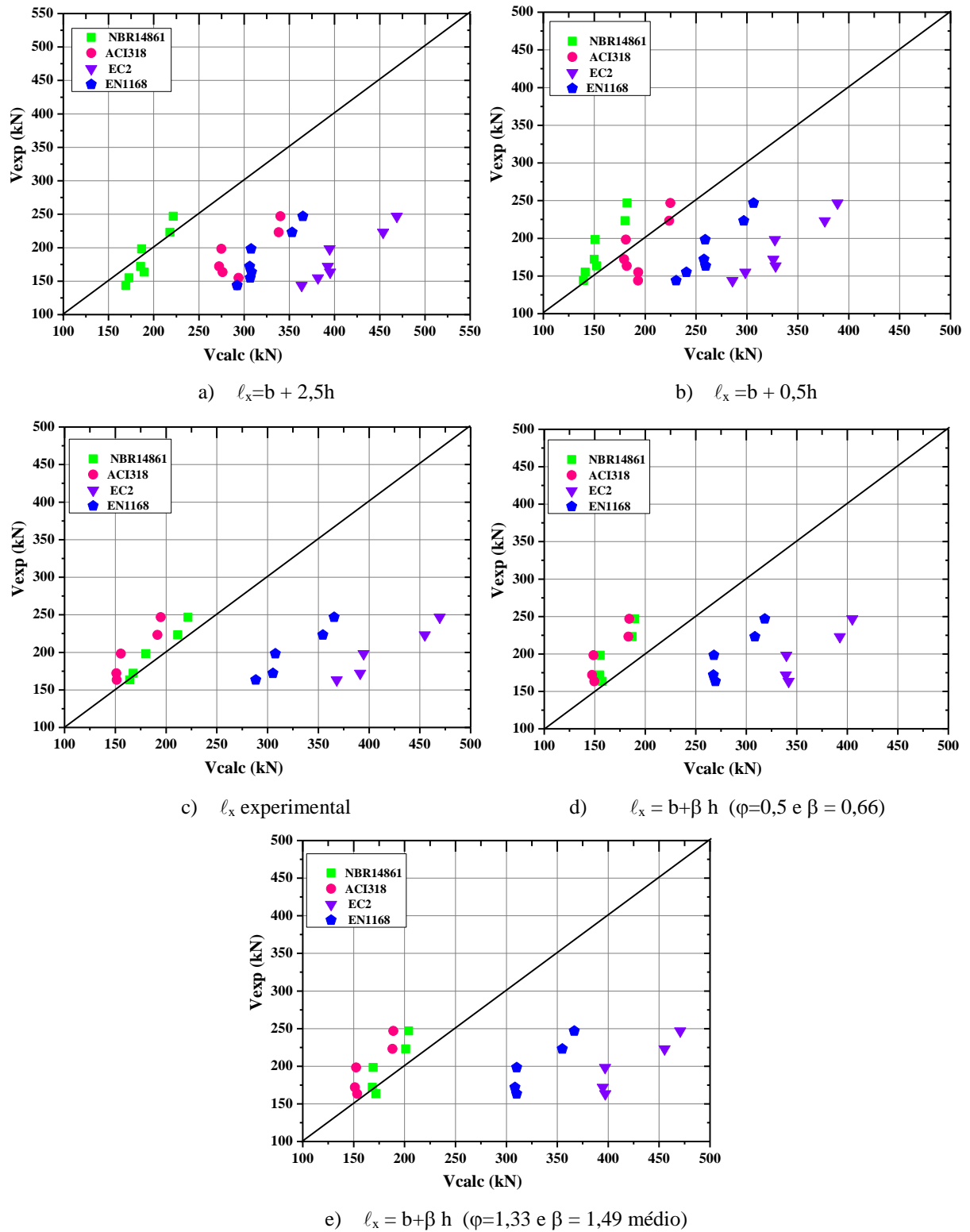
Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-5-0-A	198,31	0,85	0,77	2,00	1,56	29,85
M2-5-0-A*	172,02	0,98	0,88	2,30	1,79	30,11
M2-5-0-B	163,43	1,05	0,94	2,43	1,90	30,27
M2-9-0-A*	223,14	0,90	0,84	2,04	1,59	30,77
M2-9-0-B*	246,86	0,83	0,77	1,91	1,49	30,70
Média:		0,92	0,84	2,14	1,67	-
Desvio Padrão:		0,09	0,07	0,22	0,17	-
Coef. de Variação:		10,03%	8,79%	10,24%	10,34%	-

(a) Eq. (3.12 e 3.13); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29); (d) Eq. (3.29 com o coeficiente minorador global $\phi = 0,80$).

Quando se analisam as várias possibilidades de seção crítica para as lajes ensaiadas, observa-se que a melhor estimativa da resistência à força cortante da laje alveolar com capa se deu quando se utiliza o modelo sugerido pela NBR 14861 com a seção crítica determinada pelas equações (5.3) e (5.4), porém com $\phi = 1,33$, e pelo ACI 318 com $\ell_x = b + 0,5h$. Em todas as análises, o modelo da norma NBR 14861 mostrou-se a favor da segurança, enquanto o modelo do Eurocode 2 e da EN 1168 sempre superestimaram a resistência à força cortante da laje. Isso mostra que para as lajes de pequena altura, a formulação proposta por essas normas para levar em consideração a contribuição da capa parece ser contrária à segurança, principalmente em situações de baixa rugosidade na interface.

A Figura 5.19 apresenta os gráficos comparativos entre a força cortante experimental e a calculada variando-se a seção de análise. Tomando a situação em que se utiliza a seção crítica experimental, conclui-se que o modelo de cálculo da norma NBR 14861 foi o que melhor estimou a resistência à força cortante das lajes ensaiadas (diferença média de 5% e coeficiente de variação menor que 5%). Entretanto, essa norma não indica a seção crítica para a avaliação da resistência à força cortante.

Figura 5.19 – Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, variando a seção de análise para lajes com capa.



5.5 LAJE ALVEOLAR COM ALVÉOLOS PREENCHIDOS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das lajes alveolares sem capa e com alvéolos preenchidos.

5.5.1 Modo de ruptura e resistência à força cortante

Analogamente às lajes sem capa e com capa, na Tabela 5.15 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente para as lajes sem capa e com alvéolos preenchidos. Nesta tabela, b_w representa a soma da largura apenas das nervuras, sem considerar os alvéolos preenchidos.

Da análise dos resultados da Série I, Antunes (2102) concluiu que o preenchimento dos alvéolos após a execução da laje alveolar não contribuiu para o aumento da resistência à força cortante das lajes. A análise da força máxima resistida e da forma de ruptura das lajes da Série II indica conclusão semelhante.

Tabela 5.15 – Força cortante experimental para as lajes com alvéolos preenchidos das séries I e II.

Modelo	$V_{u,exp}$ (kN)	b_w (mm)	d (mm)	$\tau_c = V_{u,exp} / b_w d$ (MPa)	Tipo de ruptura	Ângulo da fissura na nervura externa (θ) Direita / Esquerda	
Série I (ANTUNES, 2012)							
M1-0-3-50-N-A	118,04	406,39	129,08	2,25	Força cortante	-	-
M1-0-3-50-N-B	138,32	403,95	135,2	2,53	Força cortante, Flexão e Torção	-	-
Série II							
M2-0-3-50-S	151,54	452,28	143,17	2,48	Força cortante e Flexão	37°	36°
M2-0-3-81-N	160,84	449,69	135,57	2,14	Força cortante e Flexão	36°	57°
M2-0-5-50-N	130,40	431,72	133,39	2,63	Força cortante e Flexão	90°	55°
M2-0-5-81-N	137,66	442,01	137,56	2,26	Força cortante	50°	58°
M2-0-5-81-S	132,78	433,39	136,00	2,25	Força cortante e Flexão	55°	90°

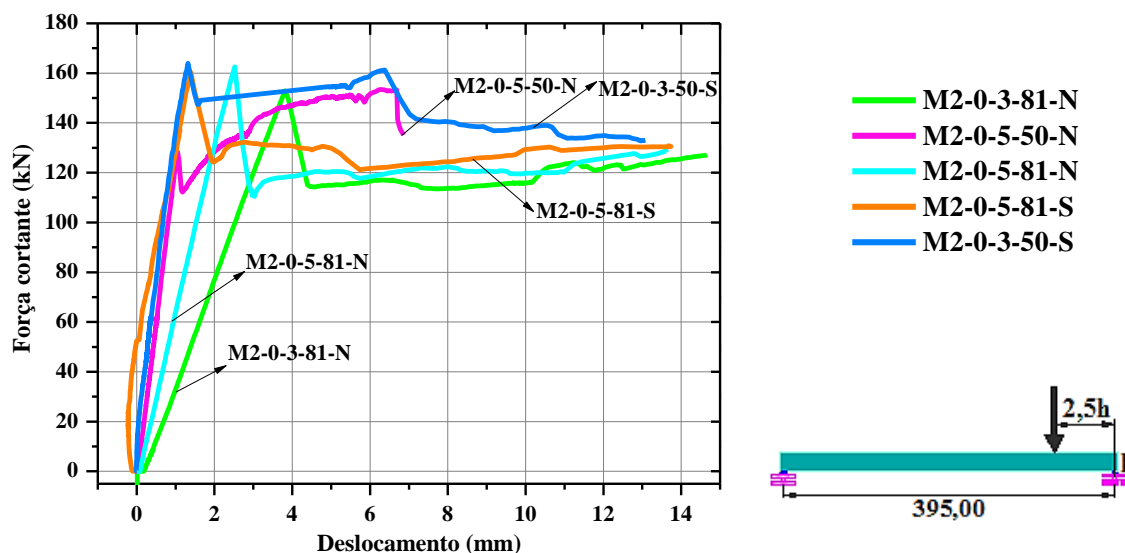
A Figura 5.20 mostra a curva de deslocamento vertical médio medido pelos transdutores T2 e T3 na região de aplicação do carregamento em função da força aplicada no ensaio das lajes da Série II. Com exceção do modelo M2-0-5-50-N, todas as lajes atingiram a força máxima e apresentaram redução e manutenção da resistência à força cortante no regime pós-pico. Esse comportamento é semelhante ao observado nas lajes alveolares sem preenchimento dos

alvéolos. No modelo M2-0-5-50-N parece ter havido uma ruptura precoce por cisalhamento em algumas nervuras, seguida do aumento da resistência até uma ruína combinada com flexão. De fato, a força cortante última experimental da maioria das lajes da Série II mostradas na Tabela 5.15 foram maiores que a força de fissuração à flexão determinada para as lajes alveolares sem preenchimento dos alvéolos (151,88 kN). Isso indica que essas lajes de fato deveriam apresentar fissuras de flexão antes da ruína das nervuras por tração diagonal, uma vez que o preenchimento dos alvéolos apresenta pouca contribuição no aumento do momento de fissuração da laje. Isso, porque, o preenchimento de cinco alvéolos proporcionou um aumento de apenas 5,0% no momento de inércia das lajes alveolares.

De forma geral, a rigidez inicial das lajes com a presença do aditivo microexpansor foi maior que nas lajes sem a presença desse aditivo. Isso indica que ele parece ter contribuído na melhoria da aderência entre o concreto de preenchimento e o concreto no interior dos alvéolos da laje por reduzir o escorregamento na interface entre esses dois concretos.

Entretanto, nem a presença do aditivo microexpansor, nem o comprimento de preenchimento e nem o número de alvéolos preenchidos teve influência na resistência à força cortante das lajes ensaiadas. A média da tensão cisalhante obtida para as lajes alveolares da Série II mostradas na Tabela 5.15 foi de 2,35 MPa, com desvio padrão de 0,20 MPa. Essa tensão é apenas 4% inferior à tensão cisalhante observada nas lajes alveolares sem capa e sem preenchimento dos alvéolos, que foi de 2,46 MPa. Com isso, pode-se concluir que de fato o preenchimento dos alvéolos após a protensão da laje não contribuiu com o aumento da resistência das lajes à força cortante.

Figura 5.20 - Força *versus* deslocamento no ponto de aplicação do carregamento para lajes com alvéolos preenchidos, série II.



Na Figura 5.21 observa-se o modo de ruptura do modelo M2-0-5-50-N que ocorreu por tração diagonal na lateral direita combinada com fissura de flexão na lateral esquerda. As fissuras de flexão surgiram próximas ao ponto de aplicação do carregamento. Na lateral esquerda (Figura 5.21 b), a ruptura ocorreu somente por flexão, sendo que na face inferior é possível verificar a linha de fissuração ligando os dois lados da laje.

Figura 5.21 - Ruptura do modelo M2-0-5-50-N.



Na Figura 5.22 é mostrado o panorama de fissuração do modelo M2-0-3-50-S. Neste caso, na lateral direita da peça a ruína se deu por tração diagonal com a presença de fissuras de flexão no ponto de aplicação da força. Já na lateral esquerda, a ruína aconteceu com formação de uma fissura por tração diagonal. O concreto de preenchimento sofreu retração, apesar da presença do aditivo microexpansor, fato observado na fissuração no arco superior dos alvéolos preenchidos antes do ensaio. Observou-se a ruptura do concreto de preenchimento dos alvéolos com a mesma inclinação das fissuras nas nervuras.

Figura 5.22 – Ruptura do modelo M2-0-3-50-S.





d) Alvéolo preenchido 1

e) Alvéolo preenchido 2

f) Alvéolo preenchido 3

O modelo M2-0-3-81-N apresentou fissura na lateral direita característica por ruptura por tração diagonal com a presença da fissura de flexão no ponto de aplicação da carga (Figura 5.23). Já na lateral esquerda, a ruptura se deu por tração diagonal com a fissura inclinada até próxima ao apoio e, ainda, com a presença de uma fissura horizontal, caracterizando escorregamento da cordoalha por falha na ancoragem. Nesta peça também houve retração do concreto de preenchimento notado antes do ensaio, com fissura na parte superior alvéolo.

Figura 5.23 – Ruptura do modelo M2-0-3-81-N.



a) Lateral direita

b) Lateral esquerda

c) Face inferior



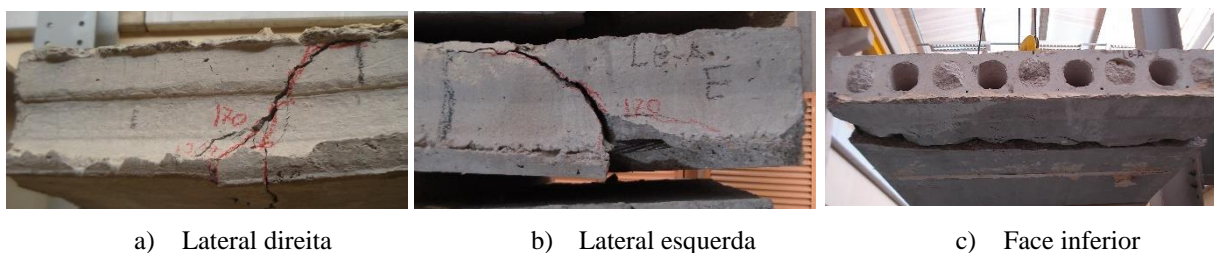
d) Alvéolo preenchido 1

e) Alvéolo preenchido 2

f) Alvéolo preenchido 3

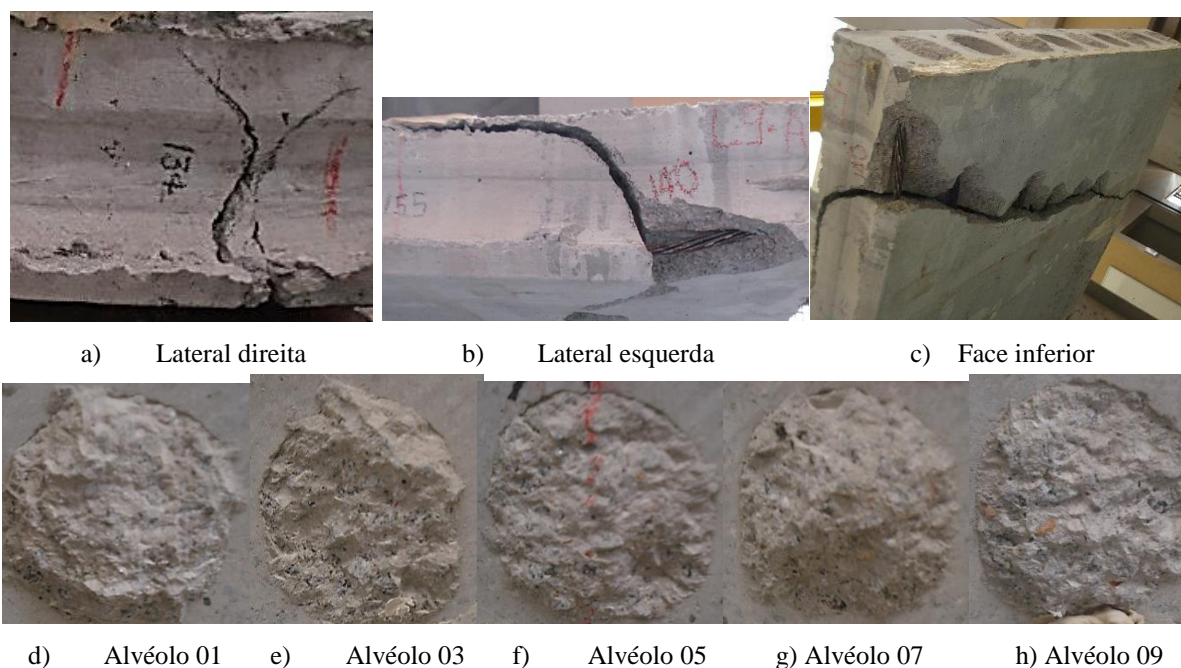
Na Figura 5.24 é mostrado o panorama de fissuração do modelo M2-0-5-81-N. Observa-se que a ruptura ocorreu por tração diagonal nas duas nervuras externas. Observando a fissura na face inferior, conclui-se que todas as nervuras internas, e também o concreto de preenchimento dos alvéolos, apresentou ruptura por tração diagonal. Após o ensaio, foi verificado o escorregamento das cordoalhas com valor médio de 3 mm.

Figura 5.24 – Ruptura do modelo M2-0-5-81-N.



Na Figura 5.25 é mostrado o panorama de fissuração do modelo M2-0-5-81-S com cinco alvéolos preenchidos e presença do aditivo microexpansor. Foi observada pouca retração do concreto de preenchimento na borda superior nos alvéolos 01, 05 e 07. O modo de ruptura dessa laje se deu pela combinação de fissura de flexão na nervura externa direita e fissura por tração diagonal na nervura externa esquerda. Houve, ainda, a fissuração por escorregamento da cordoalha, representada pela fissura horizontal na região da armadura superior.

Figura 5.25 – Ruptura do modelo M2-0-5-81-S.



5.5.2 Comparação com modelos de cálculo

Os resultados experimentais foram comparados com o modelo de cálculo indicado pela norma NBR 14861 e com os modelos do Eurocode 2, da EN 1168 e do ACI 318. Os valores da resistência à força cortante estimados para cada laje estão no Apêndice C.

Para aplicação dos modelos de cálculo, a resistência à tração direta do concreto (f_{ctm}) foi tomada igual 3,81 MPa. Os valores médios de $\sigma_{cp} = 5,09$ MPa, $\rho_1 = 0,0056$ e $k = 1,463$, calculados para as lajes alveolares sem capa, foram admitidos os mesmos para as lajes com alvéolos preenchidos, tendo em vista que o preenchimento se deu depois da aplicação da protensão. Para a largura das nervuras (Σb_w) e altura de cálculo (d) foram utilizados os valores medidos em laboratório para cada laje.

Em todos os modelos de cálculo, foi considerada a transmissão gradual da força de protensão para a laje por meio do comprimento de transferência (ℓ_{pt2}), com os mesmos valores utilizados na análise das lajes alveolares sem capa. A contribuição dos alvéolos preenchidos foi avaliada pela equação. (3.22) aplicação da norma NBR 14861. Para os modelos de cálculo do Eurocode 2 e EN 1168, a contribuição da resistência dos alvéolos foi determinada por meio da equação (3.30) e para o ACI 318 a largura do alvéolo preenchido foi adicionado ao somatório das nervuras.

Foram analisadas as mesmas seções de cálculo utilizadas nas lajes alveolares sem preenchimento dos alvéolos. A primeira seção analisada foi a do ponto de aplicação do carregamento, localizada a $\ell_x = b + 2,5h$, sendo h a altura da laje e b a largura do apoio (Tabela 5.16). A segunda seção analisada foi a localizada a $\ell_x = b + 0,5h$ (Tabela 5.17). A terceira seção foi a determinada diretamente no ensaio (Tabela 5.18). Já a quarta seção foi a localizada a $\ell_x = b + \beta h$ com $\varphi = 0,5$ (Tabela 5.19) e a quinta seção com a proposta de se utilizar $\varphi = 1,33$ (Tabela 5.20).

Em todas essas análises, observa-se que os resultados estimados pelos modelos de cálculo superestimaram a resistência à força cortante das lajes, mesma para a norma NBR 14861 que propõem a menor contribuição dos alvéolos (Figura 5.26). Isso confirma que, para as lajes aqui ensaiadas, o preenchimento dos alvéolos não contribuiu com a resistência à força cortante das lajes. Assim, os valores estimados pela norma NBR 14861 foram de 16 a 46% maiores que os valores reais.

Tabela 5.16 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 2,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$
Série I (ANTUNES, 2012)					
M1-0-3-50-N-A	118,04	1,52	3,23	3,00	2,48
M1-0-3-50-N-B	138,32	1,34	2,84	2,57	2,14
Série II					
M2-0-5-50-N	151,54	1,42	3,15	3,09	2,66
M2-0-3-50-S	160,84	1,24	2,34	2,38	1,97
M2-0-3-81-N	130,40	1,54	2,87	3,08	2,58
M2-0-5-81-N	137,66	1,62	3,45	3,45	2,97
M2-0-5-81-S	132,78	1,55	3,68	3,47	2,96
Média:		1,46	3,08	3,01	2,54
Desvio Padrão:		0,14	0,44	0,41	0,38
Coef. de Variação:		9,27%	14,30%	13,61%	15,00%

(a) Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28 e 3.30); (d) Eq. (3.28 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Tabela 5.17 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série I						
M1-0-3-50-N-A	118,04	0,93	2,23	2,48	2,09	12,
M1-0-3-50-N-B	138,32	0,82	1,97	2,13	1,81	13,
Série II						
M2-0-5-50-N	151,54	1,24	2,27	2,75	2,41	13,6
M2-0-3-50-S	160,84	1,04	1,69	2,05	1,73	13,5
M2-0-3-81-N	151,11	1,32	2,07	2,68	2,28	13,4
M2-0-5-81-N	160,28	1,41	2,49	3,07	2,69	13,5
M2-0-5-81-S	148,87	1,34	2,65	3,06	2,65	13,4
Média:		1,16	2,20	2,60	2,24	-
Desvio Padrão:		0,23	0,32	0,41	0,38	-
Coef. de Variação:		19,71%	14,67%	15,62%	17,04%	-

(a) Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28 e 3.30); (d) Eq. (3.28 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Tabela 5.18 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: ℓ_x experimental

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-0-5-50-N	151,54	1,22	1,70	3,69	3,15	11,50
M2-0-3-50-S	160,84	1,10	1,48	3,04	2,49	22,10
M2-0-3-81-N	151,11	1,48	2,20	4,16	3,41	34,55
M2-0-5-81-N	160,28	1,51	2,38	4,74	3,97	26,90
M2-0-5-81-S	148,87	1,36	2,19	4,41	3,70	15,80
Média:		1,33	1,99	4,01	3,35	-
Desvio Padrão:		0,17	0,38	0,66	0,57	-
Coef. de Variação:		12,84%	19,11%	16,48%	17,01%	-

(a) Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28 e 3.30); (d) Eq. (3.28 e 3.30 com o coeficiente minorador $\varphi=0,80$).

Tabela 5.19 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=0,5$ segundo MARQUESI, 2014)

Modelo	V_{ex} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-0-5-50-N	151,54	1,25	1,82	3,87	3,28	15,78
M2-0-3-50-S	160,84	1,06	1,36	2,85	2,35	16,60
M2-0-3-81-N	151,11	1,37	1,74	3,68	3,06	16,32
M2-0-5-81-N	160,28	1,39	2,06	4,33	3,67	15,99
M2-0-5-81-S	148,87	1,30	2,20	4,42	3,71	15,11
Média:		1,28	1,84	3,83	3,22	-
Desvio Padrão:		0,13	0,33	0,63	0,56	-
Coef. de Variação:		10,20%	17,73%	16,44%	17,31%	-

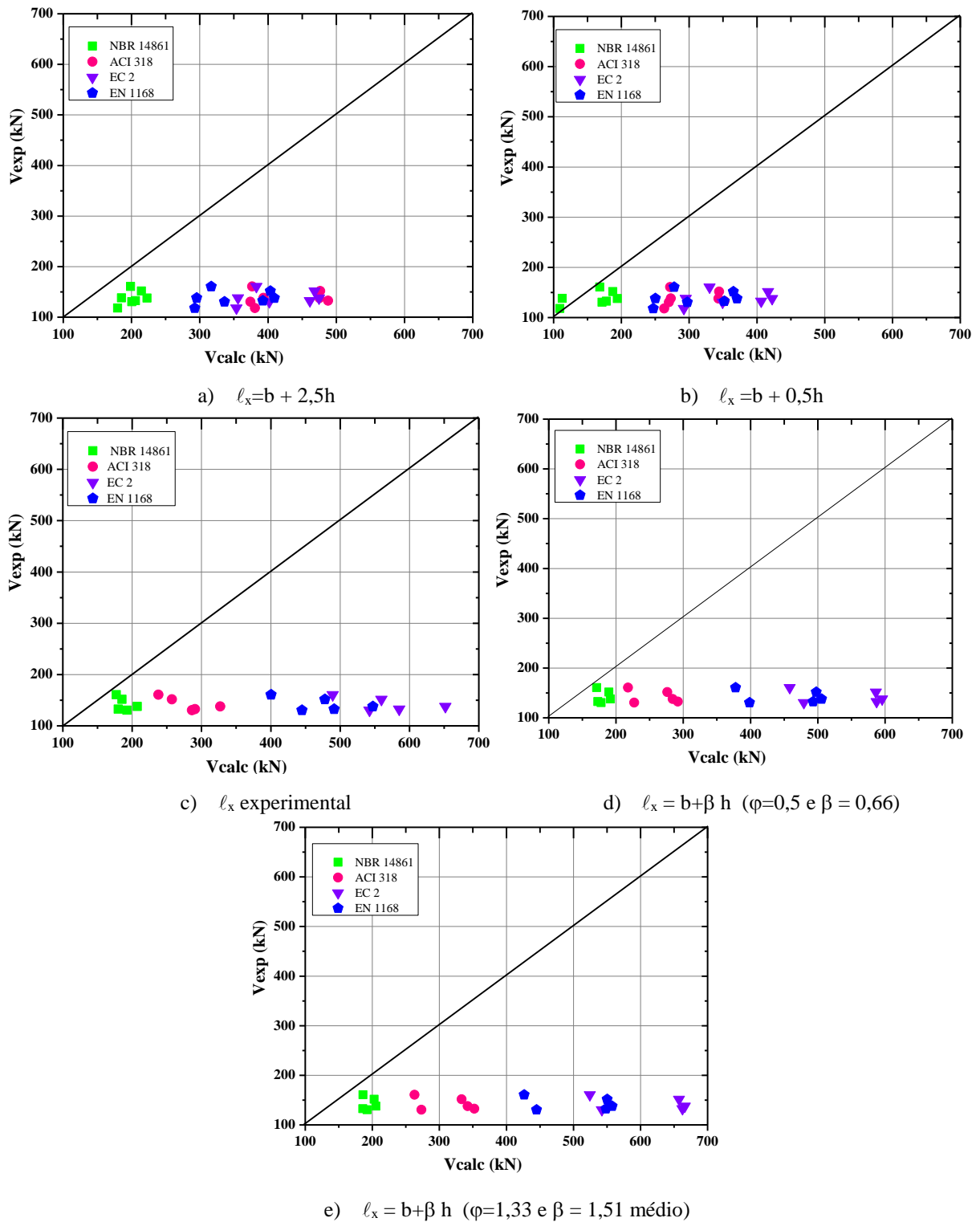
(a) Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28 e 3.30); (d) Eq. (3.28 e 3.30 com o coeficiente minorador $\varphi=0,80$).

Tabela 5.20 Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\varphi=1,33$)

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
M2-0-5-50-N	151,54	1,34	2,20	3,26	3,63	30,
M2-0-3-50-S	160,84	1,16	1,64	4,16	2,65	30,
M2-0-3-81-N	151,11	1,47	2,10	4,84	3,41	30,
M2-0-5-81-N	160,28	1,49	2,49	4,99	4,05	30,
M2-0-5-81-S	148,87	1,40	2,65	3,26	4,13	29,
Média:		1,37	2,21	4,31	3,58	-
Desvio Padrão:		0,13	0,39	0,79	0,60	-
Coef. de Variação:		9,83%	17,70%	18,30%	16,65%	-

(a) Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.28 e 3.30); (d) Eq. (3.28 e 3.30 com o coeficiente minorador $\varphi=0,80$).

Figura 5.26- Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com alvéolos preenchidos



5.6 LAJE ALVEOLAR COM CAPA E ALVÉOLOS PREENCHIDOS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das lajes alveolares com capa e com alvéolos preenchidos.

5.6.1 Modo de ruptura e resistência à força cortante

A resistência à força cortante obtida dos ensaios das lajes alveolares com capa e alvéolos preenchidos é mostrada na Figura 5.21, assim como a tensão cisalhante convencional.

Tabela 5.21 - Força cortante experimental para as lajes com capa e alvéolos preenchidos das séries I e II.

Modelo	$V_{u,exp}$ (kN)	b_w (mm)	d (mm)	$\tau_c = V_{u,exp} / b_w d$ (MPa)	Tipo de ruptura	Ângulo da fissura na nervura externa (θ) Direita / Esquerda	
Série I (ANTUNES, 2012)							
M1-5-3-50-N-A	175,22	387,51	120,98	3,74	Força cortante e torção	-	-
M1-5-3-50-N-B	208,06	406,93	135,20	3,78	Força cortante e torção	-	-
Série II							
M2-9-5-50-N	180,86	438,63	139,5	2,96	Força cortante e Flexão	52°	56°
M2-9-3-50-S	254,96	445,85	139,1	4,11	Flexão simples	59°	54°
M2-9-3-81-N	222,88	452,46	138,5	3,56	Força cortante e Flexão	46°	73°
M2-9-5-81-N	208,75	437,51	134,4	3,55	Força cortante e Flexão	53°	46°
M2-9-5-81-S	232,41	445,43	138,35	3,77	Força cortante e Flexão	49°	48°
M2-5-5-50-N-A	141,78	440,54	132,9	2,42	Força cortante e Flexão	58°	90°
M2-5-5-50-N-B	173,73	436,11	138,4	2,88	Flexão simples	90°	90°
M2-5-5-50-S-A	167,47	445,11	142	2,65	Força cortante e Flexão	33°	36°
M2-5-5-50-S-B	160,02	448,53	136,6	2,61	Força cortante e Flexão	90°	40°
M2-5-5-81-S-A	149,09	430,66	129,8	2,67	Força cortante e Flexão	32°	53°
M2-5-5-81-S-B	121,04	437,23	128,09	2,16	Flexão Pura	90°	90°

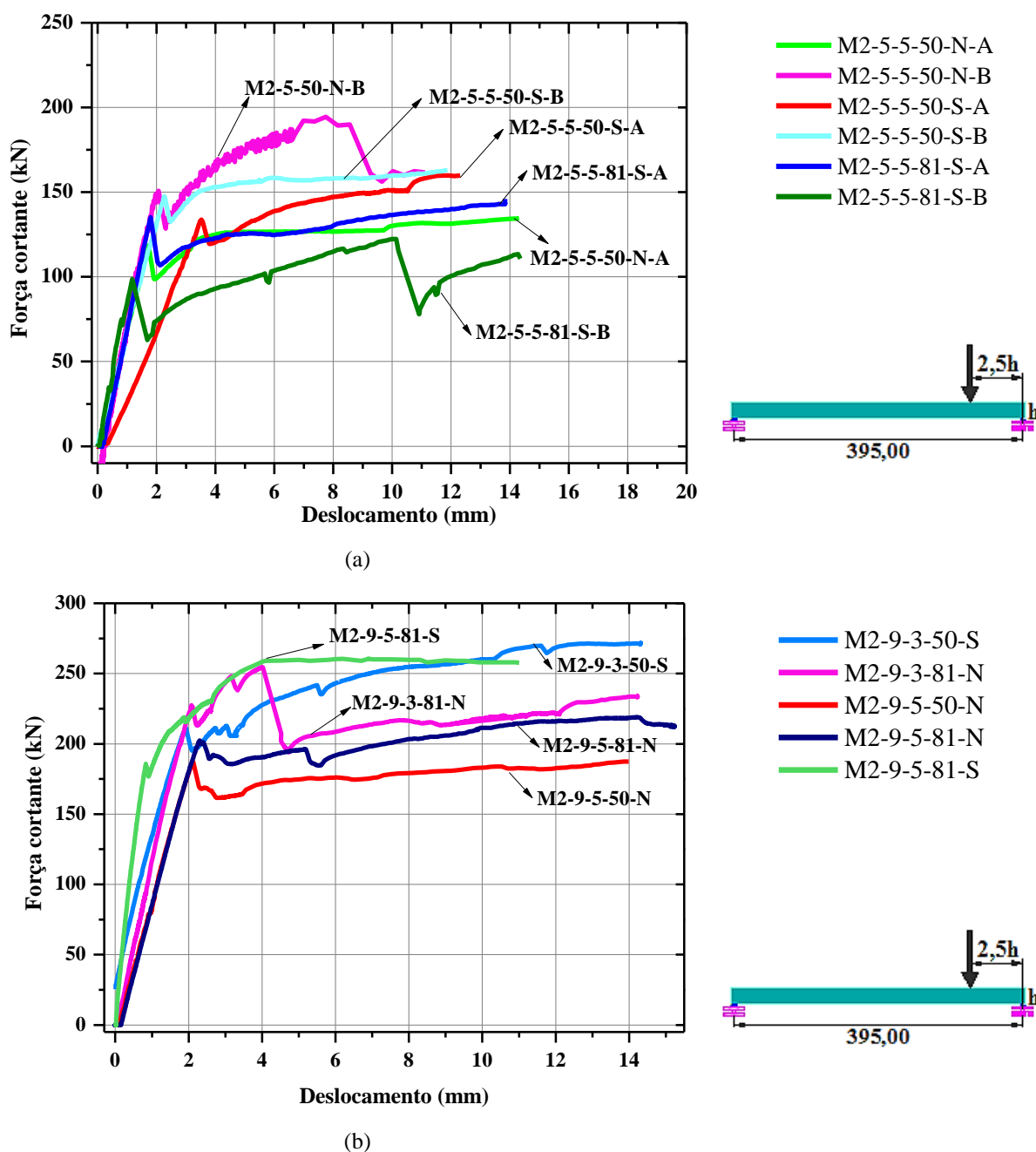
Nesse caso, a altura (d) utilizada foi a altura da laje alveolar, sem considerar a capa. Também é mostrado o somatório da largura das nervuras, sem considerar a largura dos alvéolos preenchidos. A resistência à força cortante experimental foi obtida considerando o peso próprio da laje na seção de aplicação do carregamento.

Da análise dos resultados da Série I, Antunes (2012) concluiu que houve aumento da resistência à força cortante dessas lajes com relação às lajes alveolares com capa. Estas, porém, apresentaram descolamento da capa, o que reduziu a sua resistência. Com isso, a autora concluiu que no caso das lajes com capa e alvéolos preenchidos, o aumento da resistência se

deu pela atuação conjunta da capa com os alvéolos preenchidos. A análise da força máxima resistida e da forma de ruptura das lajes da Série II indica conclusão semelhante.

Na Figura 5.27a é apresentada a relação entre a força cortante e o deslocamento vertical no ponto de aplicação do carregamento das lajes da Série II. O gráfico mostra o comportamento das lajes com capa de altura igual a 5 cm. Já na Figura 5.27b é mostrado o mesmo gráfico para as lajes com capa de 9 cm de altura.

Figura 5.27 - Força cortante *versus* deslocamento para lajes com capa e alvéolos preenchidos, série II.



Do ponto de vista de rigidez, o comprimento do trecho preenchido e a presença do aditivo microexpansor não afetou a resposta das lajes com capa de 5 cm de altura. Por outro lado, nas lajes com capa de 9 cm de altura houve um pequeno aumento da rigidez inicial das lajes com a presença do aditivo microexpansor, o que sugere a melhoria da aderência na interface entre o concreto de preenchimento e o concreto da laje alveolar devido à presença desse aditivo.

De forma geral, todas as lajes mostradas na Figura 5.27 apresentaram a formação de uma fissura nas nervuras (representada pelo pico de força no trecho inicial da curva equivalente à força de ruína das lajes alveolares) seguida do aumento da resistência. Isso se deve, basicamente, pela presença da capa nessas lajes. Esse aumento é menos sensível nas lajes com capa de 9 cm, indicando haver uma melhor aderência da capa nessas lajes.

Quanto à contribuição da capa estrutural e do preenchimento dos alvéolos nas lajes da Série II, ela pode ser avaliada pela tensão de cisalhamento convencional mostrada na Figura 5.21. A média da tensão cisalhante obtida para as lajes alveolares e capa de 5 cm foi de $2,57 \text{ kN/mm}^2$, com desvio padrão de 0,18, e para as lajes alveolares com capa de 9 cm foi de $3,59 \text{ kN/mm}^2$, com desvio padrão de 0,42. Esses valores foram obtidos considerando apenas a altura da laje alveolar simples e são 12,84% e 5,29% menores que a tensão de cisalhamento convencional das lajes com capa e sem alvéolos preenchidos. Com isso, pode-se concluir que nessas lajes houve contribuição do preenchimento dos alvéolos na resistência à força cortante apenas nas lajes com capa de 9 cm de altura que apresentaram melhor aderência.

Na Figura 5.28 é mostrado o panorama de fissuração da laje M2-9-5-50-N. Observa-se, tanto na nervura externa direita quanto na nervura externa esquerda, a ruptura por tração diagonal, acompanhada de algumas fissuras de flexão no ponto de aplicação do carregamento. Nessa laje não houve o descolamento da capa.

Figura 5.28 – Ruptura do modelo M2-9-5-50-N.



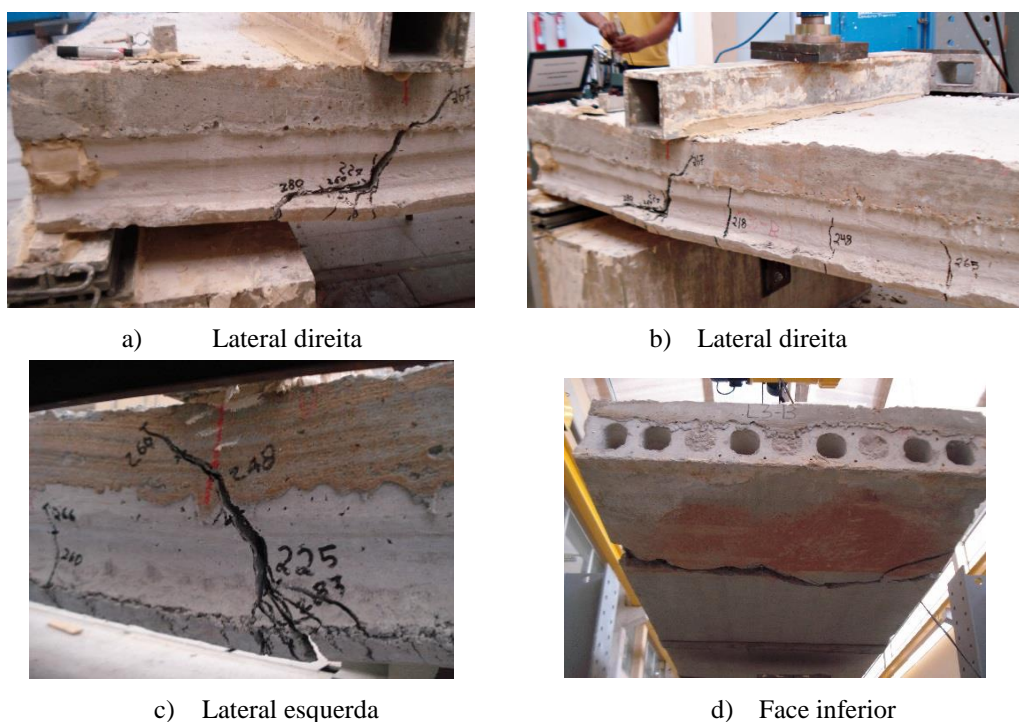
a) Lateral direita

b) Lateral esquerda

c) Face inferior

A Figura 5.29 apresenta a forma de ruptura do modelo M2-9-3-50-S, no qual a laje possuía três alvéolos preenchidos com concreto e aditivo microexpansor. Sua capa possuía 9 cm de altura. A forma de ruptura foi por flexão simples, caracterizada pela fissura com ângulo de quase 90°. Ao incrementar o carregamento, houve o surgimento de outras fissuras distribuídas entre o ponto de aplicação do carregamento e o apoio oposto. Nesta peça a capa de concreto não descolou. Nota-se, assim, um incremento de 39,06% na tensão cisalhante convencional quando comparado à laje sem a presença do aditivo no concreto de preenchimento (M2-9-5-50-N).

Figura 5.29 – Ruptura do modelo M2-9-3-50-S.



O panorama de fissuração dos modelos M2-9-3-81-N e M2-9-5-81-N são mostrados na Figura 5.30 e na Figura 5.31. Nos dois modelos observa-se a ruptura por combinação de cisalhamento e flexão. Os alvéolos preenchidos dessas lajes foram interceptados pela fissura que se formou com ângulo próximo a 90° e próxima à aplicação do carregamento. Também não houve o descolamento da capa de concreto nessas lajes. Não houve alteração significativa no panorama de fissuração dessas duas lajes e a resistência à força cortante da laje com três alvéolos foi maior. Isso confirma que o aumento de três para cinco alvéolos preenchidos não teve influência na resistência das lajes à força cortante.

Figura 5.30 – Ruptura do modelo M2-9-3-81-N.

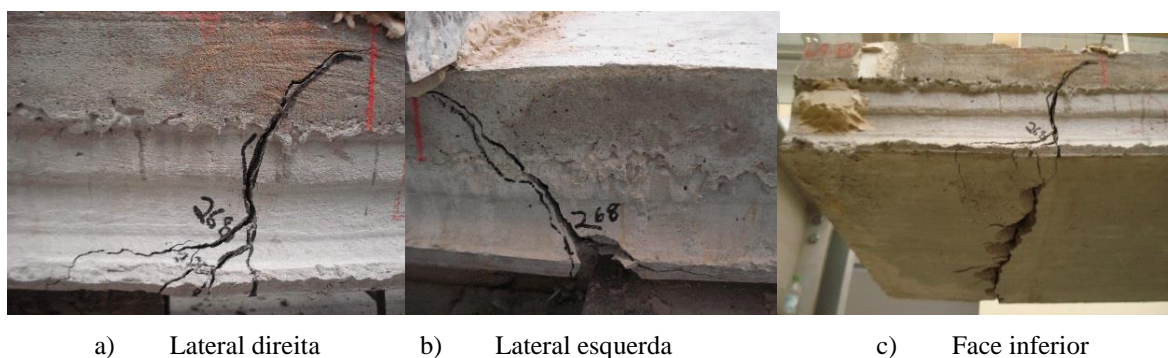
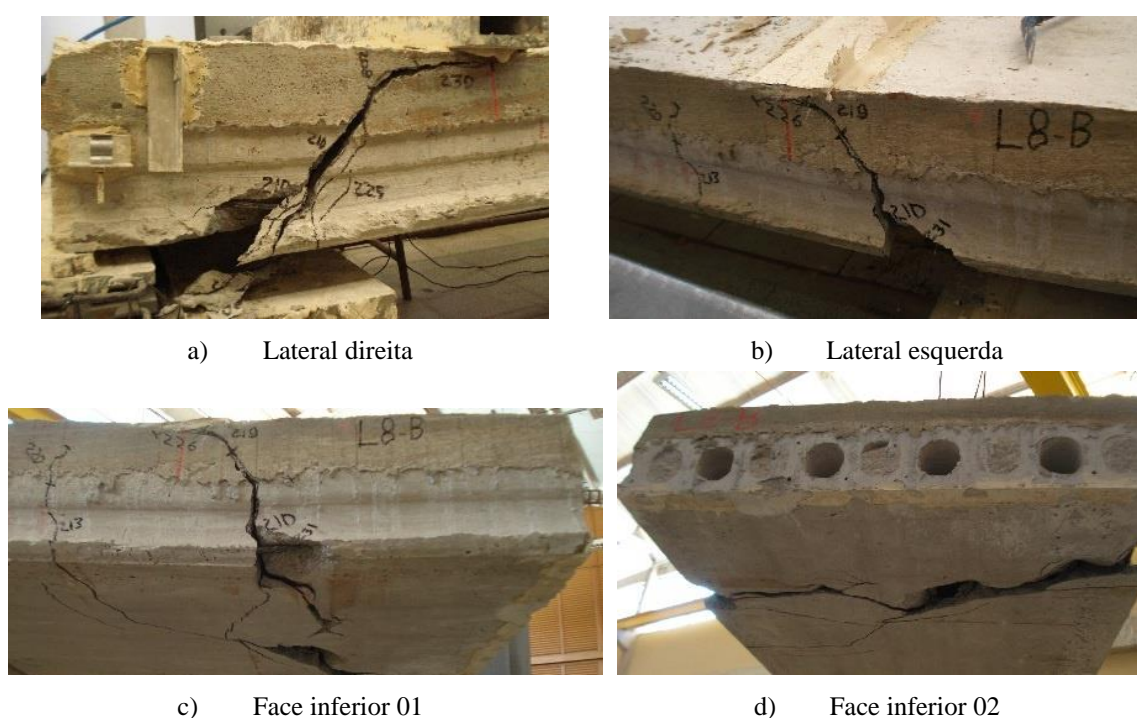
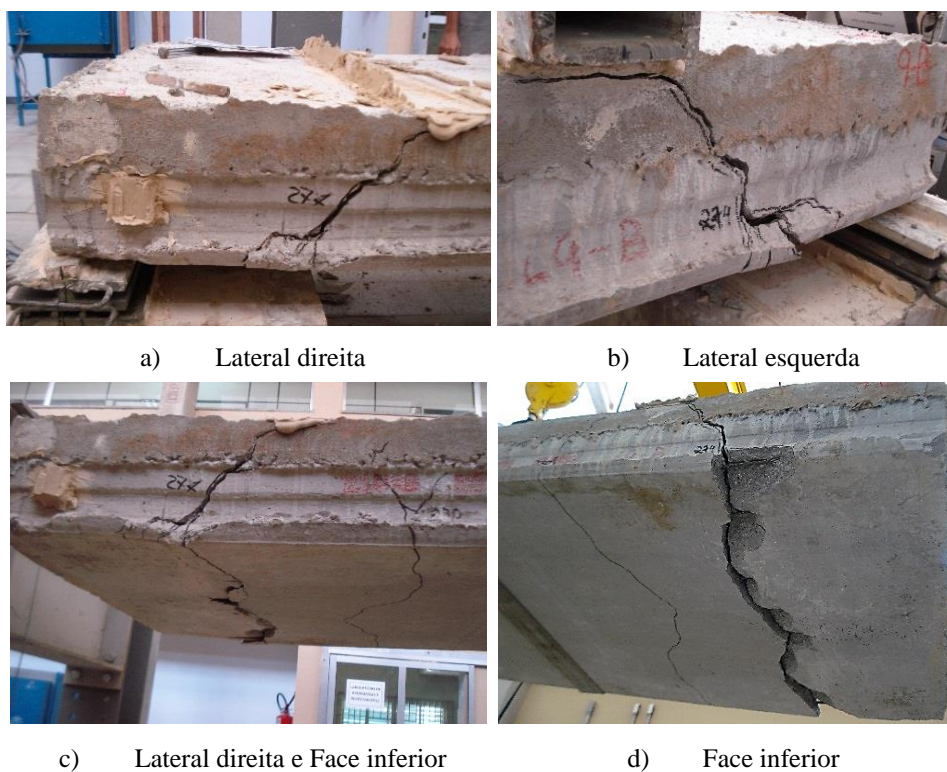


Figura 5.31 – Ruptura do modelo M2-9-5-81-N.



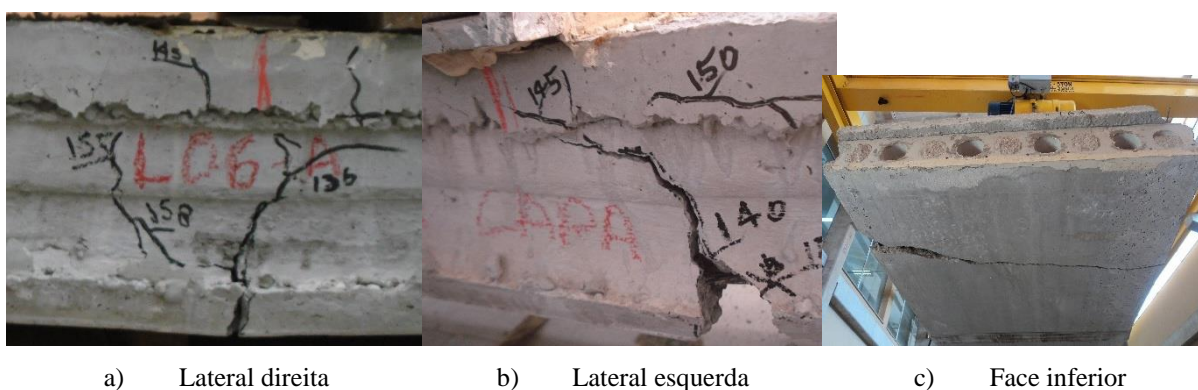
A Figura 5.32 apresenta o panorama de fissuração do modelo M2-9-5-81-S com rupturas nas nervuras externas com combinação de tração diagonal e flexão. Os alvéolos foram interceptados pela fissura inclinada que surgiu nas nervuras externas. A face inferior da laje mostra outra fissura no sentido transversal devido ao momento fletor. A capa deste modelo não descolou, apresentando boa aderência entre o concreto da capa e o da laje. Comparada à laje sem a presença do aditivo no concreto dos alvéolos, o modelo M2-9-5-81-S apresentou uma tensão de cisalhamento convencional 6% maior, além de apresentar um sensível aumento da capacidade resistente após o aparecimento da primeira fissura da laje. O seu comportamento se assemelha à uma ruptura por flexão, mostrando o efeito positivo do aditivo microexpansor no concreto dos alvéolos.

Figura 5.32 – Ruptura do modelo M2-9-5-81-S.



Observa-se no modelo M2-5-5-50-N-A um panorama típico de ruptura por flexão na nervura externa direita composta por fissuras verticais na laje e na capa (Figura 5.33). A nervura externa esquerda apresentou ruptura por tração diagonal. Houve o descolamento da capa e, assim, a mesma funcionou apenas como peso adicional a laje. A fissura na face inferior apresentou-se de forma diagonal, unindo a fissura da lateral direita com a da esquerda.

Figura 5.33 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-N-A.





d) Descolamento da capa 01 e) Descolamento da capa 02 f) Descolamento da capa 03

Analogamente ao modelo anterior, o modelo M2-5-5-50-S-A apresentou ruptura semelhante (Figura 5.34). A nervura externa direita apresentou uma fissura típica de ruína por tração diagonal enquanto a nervura externa esquerda apresentou uma ruína típica por flexão. A capa também descolou antes do início do carregamento em um trecho de 1,60 metros, alcançando quase o meio do vão da laje. Com isso, essa laje apresentou uma rigidez menor que as demais lajes desse grupo. Apesar da pouca eficiência da capa, ela contribuiu no sentido de aumentar a resistência mesmo depois da presença da fissura diagonal.

Figura 5.34 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-S-A.



a) Lateral direita b) Lateral esquerda c) Face inferior

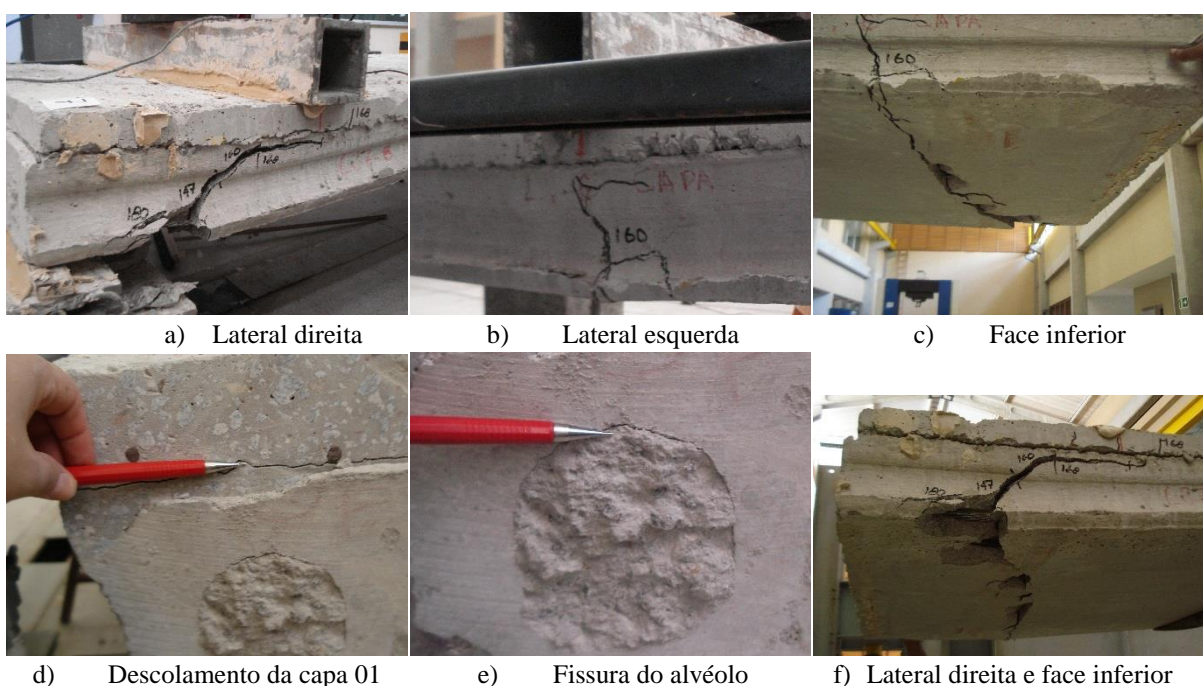


d) Descolamento da capa 01 e) Descolamento da capa 02 f) Descolamento da capa 03

O modelo M2-5-5-50-S-B apresentou ruptura na lateral direita por cisalhamento e a lateral esquerda por flexão (Figura 5.35). Em ambas, a fissura nas laterais não alcançou a capa, que contribuiu para o aumento da resistência depois da formação da fissura inclinada no apoio.

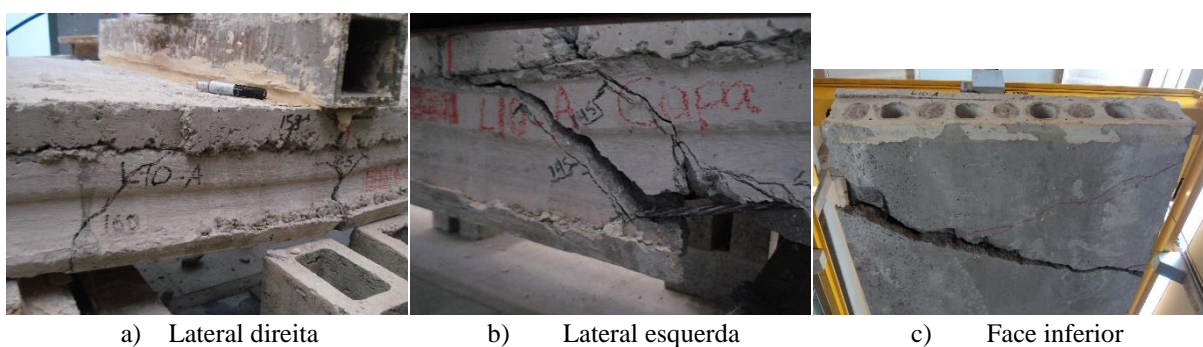
Houve, ainda, o escorregamento das cordoalhas, caracterizando falha na ancoragem. Houve, também, fissuração por retração no concreto de preenchimento na face superior dos alvéolos.

Figura 5.35 – Ruptura do modelo M2-5-5-50-S-B.



No modelo M2-5-5-81-S-A notou-se na lateral direita ruptura por flexão, e ao longo da aplicação da carga notou-se o surgimento de uma fissura levemente inclinada orientada a partir do apoio da laje (Figura 5.36). Na lateral esquerda observou-se a ruptura por cisalhamento e ao incremento da força houve a formação de outra fissura inclinada paralela à de ruptura. Nesta laje o descolamento da capa aconteceu de forma explícita. Ao final do ensaio foi possível levantá-la e verificar a ausência de resíduo de concreto da capa sobre a superfície da laje.

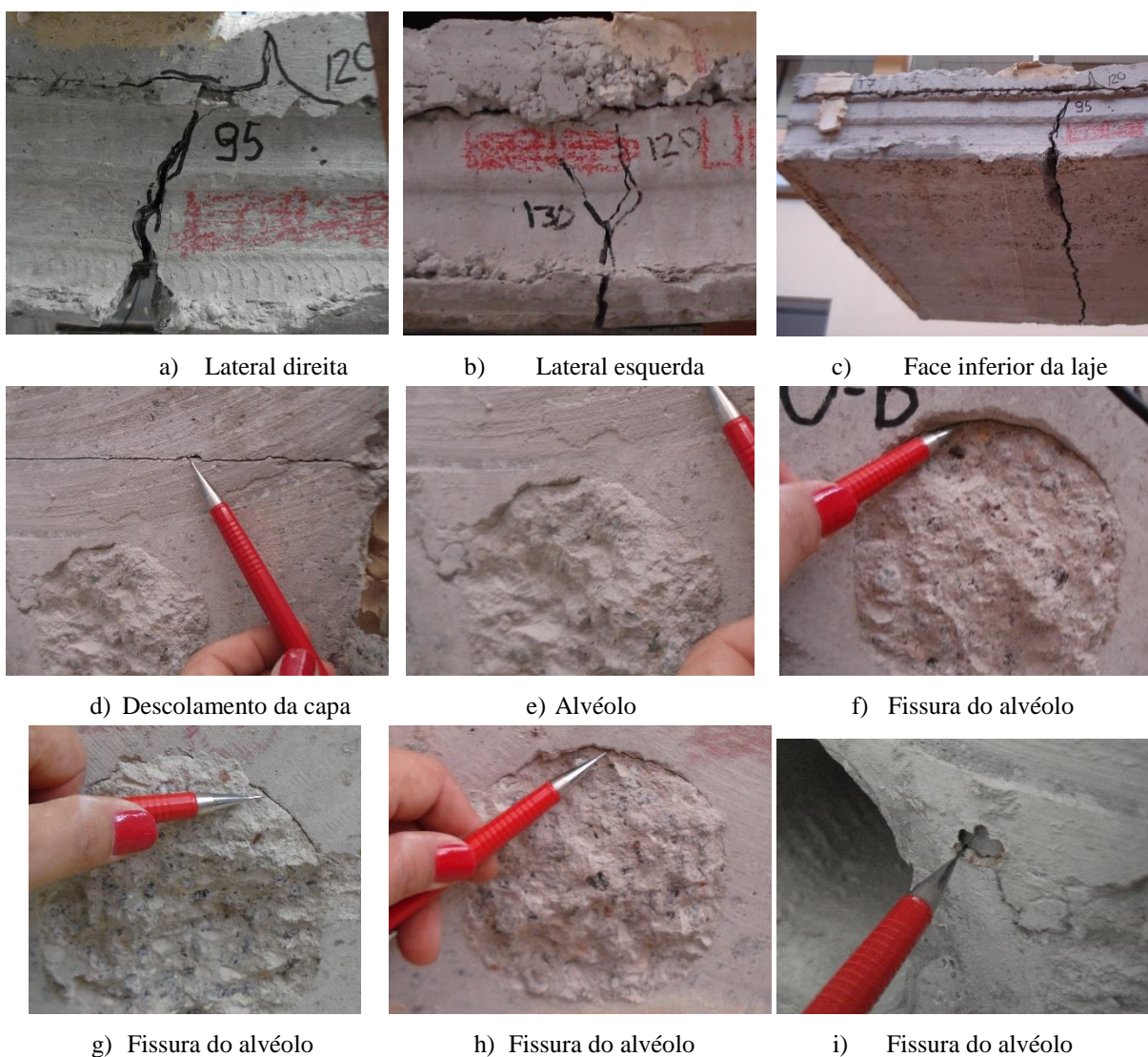
Figura 5.36 – Ruptura do modelo M2-5-5-81-S-A.





A laje M2-5-5-81-S-B apresentou a pior eficiência (Figura 5.37). Nela se formaram apenas fissuras de flexão. Houve o descolamento da capa tal como nas outras lajes desse grupo. Fissuras por retração também foram notadas em três dos cinco alvéolos preenchidos, além do encurtamento das cordoalhas na ordem de 3 mm.

Figura 5.37 – Ruptura do modelo M2-5-5-81-S-B.



5.7 COMPARAÇÃO COM MODELOS DE CÁLCULO

Os resultados experimentais foram comparados com o modelo de cálculo apresentado na NBR 14861 (ABNT, 2011). Além desta, foram feitas comparações dos valores experimentais com o Eurocode 2 (2004), com a EN 1168 (CEN, 2008) e com o ACI 318 (2008). Foram admitidas as mesmas hipóteses utilizadas na aplicação dos modelos de cálculo às lajes com capa e sem alvéolos preenchidos. Além disso, a contribuição da resistência dos alvéolos foi feita de forma semelhante à realizada nas lajes com alvéolos preenchidos, isto é, pela equação (3.22) para aplicação da norma NBR 14861, a equação (3.30) para o Eurocode 2 e EN 1168 e para o ACI 318 adicionou a largura dos alvéolos preenchidos ao somatório das nervuras da peça.

Foram verificadas as mesmas seções críticas utilizadas nas análises anteriores. A altura (h) foi tomada igual à altura real das lajes alveolares mais a altura da capa estrutural. A primeira seção analisada foi a do ponto de aplicação do carregamento, localizada a $\ell_x = b + 2,5h$, sendo h a altura da laje e b a largura do apoio (Tabela 5.22). A segunda seção analisada foi a localizada a $\ell_x = b + 0,5h$ (Tabela 5.23). A terceira seção foi a determinada diretamente no ensaio (Tabela 5.24). Já a quarta seção foi a localizada a $\ell_x = b + \beta h$ com $\varphi = 0,5$ (Tabela 5.25) e a quinta seção com a proposta de se utilizar $\varphi = 1,33$ (Tabela 5.26). Assim como nas lajes com alvéolos preenchidos, em todas as análises os resultados estimados pelos modelos de cálculo superestimaram a resistência à força cortante das lajes (Figura 5.42). Isso indica que não houve contribuição significativa dos alvéolos preenchidos na resistência à força cortante da laje. A exceção foram as lajes da Série I. Neste caso, os valores estimados pela norma NBR 14861 foram inferiores aos observados nos ensaios, o que indicaria a contribuição dos alvéolos preenchidos. Entretanto, os resultados dessa série não foram conclusivos.

Ao se analisar mais detalhadamente os resultados da Série II, nota-se, de forma geral, que os modelos de cálculo apresentaram melhores resultados quando comparados com as lajes com capa de 9 cm. Isso, provavelmente, pode estar relacionado com o maior momento de fissuração dessas lajes e pelo descolamento da capa antes do final do ensaio das lajes com capa de 5 cm. Entretanto, todos os modelos que se baseiam no mecanismo de ruptura por tração diagonal (Eurocode 2 e EN 1168) superestimaram a resistência das lajes ensaiadas devido à elevada estimativa de contribuição do alvéolo preenchido na resistência à força cortante feita por meio

da equação (3.30). Nesse sentido, a equação (3.22) proposta pela NBR 14861 é mais conservadora na estimativa da contribuição dos alvéolos preenchidos.

Com isso, quando se considera a seção crítica determinada pelas equações 5.3 e 5.4, porém com $\varphi=1,33$, a resistência estimada pela NBR 14861 foi, em média, apenas 7% superior aos valores obtidos nos ensaios das lajes com capa de 9 cm, porém com coeficiente de variação na faixa de 30%. Ainda, se forem consideradas apenas as lajes com capa de 9 cm de altura e comprimento de preenchimento de 81 cm (independente da presença de aditivo e do número de alvéolos preenchidos), a resistência estimada pela NBR 14861 foi, em média, apenas 1% superior aos valores obtidos nos ensaios. Isso indica que a expressão sugerida pela NBR 14861 para a estimativa da contribuição dos alvéolos preenchidos estaria adequada para as lajes de pequena altura com preenchimento após a protensão da laje, inclusive na limitação de considerar a contribuição de apenas dois alvéolos preenchidos. Porém, deve-se ressaltar que esse aparente ajuste do modelo de cálculo da NBR 14861 somente foi possível devido ao fato dele subestimar, em média, em 13% a resistência das lajes alveolares com capa.

Tabela 5.22 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, seção analisada: $\ell_x = b + 2,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série I (ANTUNES, 2012)						
M1-5-3-50-N-A	175,22	1,01	2,84	1,89	1,43	55,
M1-5-3-50-N-B	208,06	0,86	2,27	1,59	1,20	55,
Série II						
M2-5-5-50-N-A	141,78	1,62	3,72	3,97	2,58	55,
M2-5-5-50-N-B	173,73	1,41	3,33	3,26	2,12	55,
M2-5-5-50-S-A	167,47	1,44	3,57	3,29	2,13	55,
M2-5-5-50-S-B	160,02	1,45	3,53	3,41	2,20	55,
M2-5-5-81-S-A	149,09	1,45	3,59	3,51	2,26	55,
M2-5-5-81-S-B	121,04	1,83	4,56	4,35	2,81	-
Média:		1,38	3,42	3,16	2,09	-
Desvio Padrão:		0,31	0,67	0,95	0,54	-
Coeficiente de Variação		22,36%	19,51%	30,23%	25,78%	-
M2-9-5-50-N	180,86	1,79	3,71	3,52	2,97	62,5
M2-9-3-50-S	254,96	1,05	2,13	2,17	1,77	62,5
M2-9-3-81-N	222,88	1,26	2,47	2,59	2,12	62,5
M2-9-5-81-N	208,75	1,46	3,23	3,02	2,54	62,5
M2-9-5-81-S	232,41	1,28	2,93	2,76	2,32	62,5
Média:		1,37	2,89	2,81	2,35	-
Desvio Padrão:		0,28	0,62	0,50	0,45	-
Coeficiente de Variação		20,34%	21,42%	17,86%	19,10%	-

(a)Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29 e 3.30); (d) Eq. (3.29 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\varphi=0,80$).

□□□□□□□□

Tabela 5.23 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + 0,5h$

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série I (ANTUNES, 2012)						
M1-5-3-50-N-A	175,2	0,90	1,78	1,59	1,36	13,00
M1-5-3-50-N-B	208,0	0,74	1,43	1,34	1,14	13,00
Série II						
M2-5-5-50-N-A	141,7	1,39	2,45	3,50	3,02	13,29
M2-5-5-50-N-B	173,7	1,21	2,20	2,88	2,49	13,46
M2-5-5-50-S-A	167,4	1,23	2,35	2,89	2,48	13,45
M2-5-5-50-S-B	160,0	1,23	2,33	2,98	2,54	13,47
M2-5-5-81-S-A	149,0	1,25	2,36	3,08	2,63	13,38
M2-5-5-81-S-B	121,0	1,57	3,01	3,81	3,26	13,51
Média:		1,19	2,24	2,76	2,37	-
Desvio Padrão:		0,16	0,47	0,86	0,74	-
Coefficiente de Variação		22,12%	20,96%	31,33%	31,37%	-
M2-9-5-50-N	180,8	1,50	2,43	3,09	2,65	13,42
M2-9-3-50-S	254,9	0,91	1,40	1,87	1,55	13,49
M2-9-3-81-N	222,8	1,11	1,62	2,23	1,86	13,52
M2-9-5-81-N	208,7	1,30	2,13	2,66	2,28	13,75
M2-9-5-81-S	232,4	1,13	1,92	2,42	2,07	13,38
Média:		1,19	1,90	2,45	2,08	-
Desvio Padrão:		0,22	0,41	0,46	0,42	-
Coefficiente de Variação		18,80%	21,42%	18,75%	20,05%	-

(a)Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29 e 3.30); (d) Eq. (3.29 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$). □

Tabela 5.24 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: □ ℓ_x experimental.

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série II						
M2-5-5-50-N-A	141,78	1,62	3,72	3,97	3,37	49,0
M2-5-5-50-N-B	173,73	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
M2-5-5-50-S-A	167,47	1,41	3,41	3,29	2,77	43,0
M2-5-5-50-S-B	160,02	1,33	2,84	3,37	2,83	28,0
M2-5-5-81-S-A	149,09	1,36	3,04	3,53	2,97	32,2
M2-5-5-81-S-B	121,04	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Média:		1,43	3,25	3,54	2,99	-
Desvio Padrão:		0,13	0,39	0,31	0,27	-
Coefficiente de Variação		9,29%	11,96%	8,64%	8,98%	-
M2-9-5-50-N	180,86	1,49	2,36	3,03	2,61	11,5
M2-9-3-50-S	254,96	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
M2-9-3-81-N	222,88	1,26	2,47	2,60	2,13	48,5
M2-9-5-81-N	208,75	1,43	3,05	3,03	2,55	41,9
M2-9-5-81-S	232,41	1,26	2,79	2,77	2,33	42,6
Média:		1,36	2,67	2,86	2,40	-
Desvio Padrão:		0,12	0,31	0,21	0,22	-
Coefficiente de Variação		8,78%	11,69%	7,50%	9,13%	-

(a)Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29 e 3.30); (d) Eq. (3.29 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Tabela 5.25 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\phi=0,5$ segundo MARQUESI, 2014)

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série II						
M2-5-5-50-N-A	141,7	1,51	2,55	3,59	3,09	16,68
M2-5-5-50-N-B	173,7	1,27	2,29	2,95	2,54	16,49
M2-5-5-50-S-A	167,4	1,19	2,47	2,99	2,55	16,26
M2-5-5-50-S-B	160,0	0,97	2,45	3,06	2,60	16,81
M2-5-5-81-S-A	149,0	1,27	2,44	3,15	2,69	15,60
M2-5-5-81-S-B	121,0	1,59	3,12	3,92	3,33	15,85
Média:		1,30	2,55	3,27	2,80	-
Desvio Padrão:		0,22	0,29	0,39	0,33	-
Coefficiente de Variação		17,25%	11,31%	11,89%	11,78%	-
M2-9-5-50-N	180,8	1,52	2,55	3,19	2,76	16,85
M2-9-3-50-S	254,9	0,92	1,46	1,93	1,62	16,42
M2-9-3-81-N	222,8	1,11	1,69	2,30	1,94	15,93
M2-9-5-81-N	208,7	1,32	2,20	2,72	2,35	16,08
M2-9-5-81-S	232,4	1,13	2,02	2,50	2,17	15,76
Média:		1,20	1,98	2,53	2,17	-
Desvio Padrão:		0,23	0,43	0,47	0,43	-
Coefficiente de Variação		19,12%	21,56%	18,60%	19,75%	-

Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29 e 3.30); (d) Eq. (3.29 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Tabela 5.26 - Comparações entre os valores experimentais e de cálculo - seção analisada: $\ell_x = b + \beta h$ ($\phi=1,33$)

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861} / V_{exp}^{(a)}$	$V_{ACI318} / V_{exp}^{(b)}$	$V_{EC2} / V_{exp}^{(c)}$	$V_{EN1168} / V_{exp}^{(d)}$	ℓ_x (cm)
Série II						
M2-5-5-50-N-A	141,7	1,50	3,06	3,98	3,38	29,81
M2-5-5-50-N-B	173,7	1,31	2,75	3,27	2,78	30,09
M2-5-5-50-S-A	167,4	1,34	2,97	3,30	2,78	31,23
M2-5-5-50-S-B	160,0	1,34	2,94	3,41	2,86	30,33
M2-5-5-81-S-A	149,0	1,34	2,94	3,52	2,96	29,42
M2-5-5-81-S-B	121,0	1,70	3,75	4,39	3,68	29,88
Média:		1,42	3,07	3,64	3,07	-
Desvio Padrão:		0,15	0,35	0,45	0,37	-
Coefficiente de Variação		10,66%	11,41%	12,27%	12,11%	-
M2-9-5-50-N	180,8	1,60	3,07	3,53	2,98	30,59
M2-9-3-50-S	254,9	0,71	1,76	2,18	1,78	30,43
M2-9-3-81-N	222,8	1,02	2,04	2,60	2,13	29,85
M2-9-5-81-N	208,7	1,00	2,67	3,03	2,56	30,28
M2-9-5-81-S	232,4	1,02	2,43	2,77	2,33	29,88
Média:		1,07	2,40	2,82	2,36	-
Desvio Padrão:		0,32	0,52	0,50	0,45	-
Coefficiente de Variação		30,20%	21,53%	17,79%	19,02%	-

(a)Eq. (3.13 e 3.20); (b) Eq. (3.39); (c) Eq. (3.29 e 3.30); (d) Eq. (3.29 e 3.30 com o coeficiente minorador global $\phi=0,80$).

Figura 5.38- Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com capa de 5 cm e alvéolos preenchidos

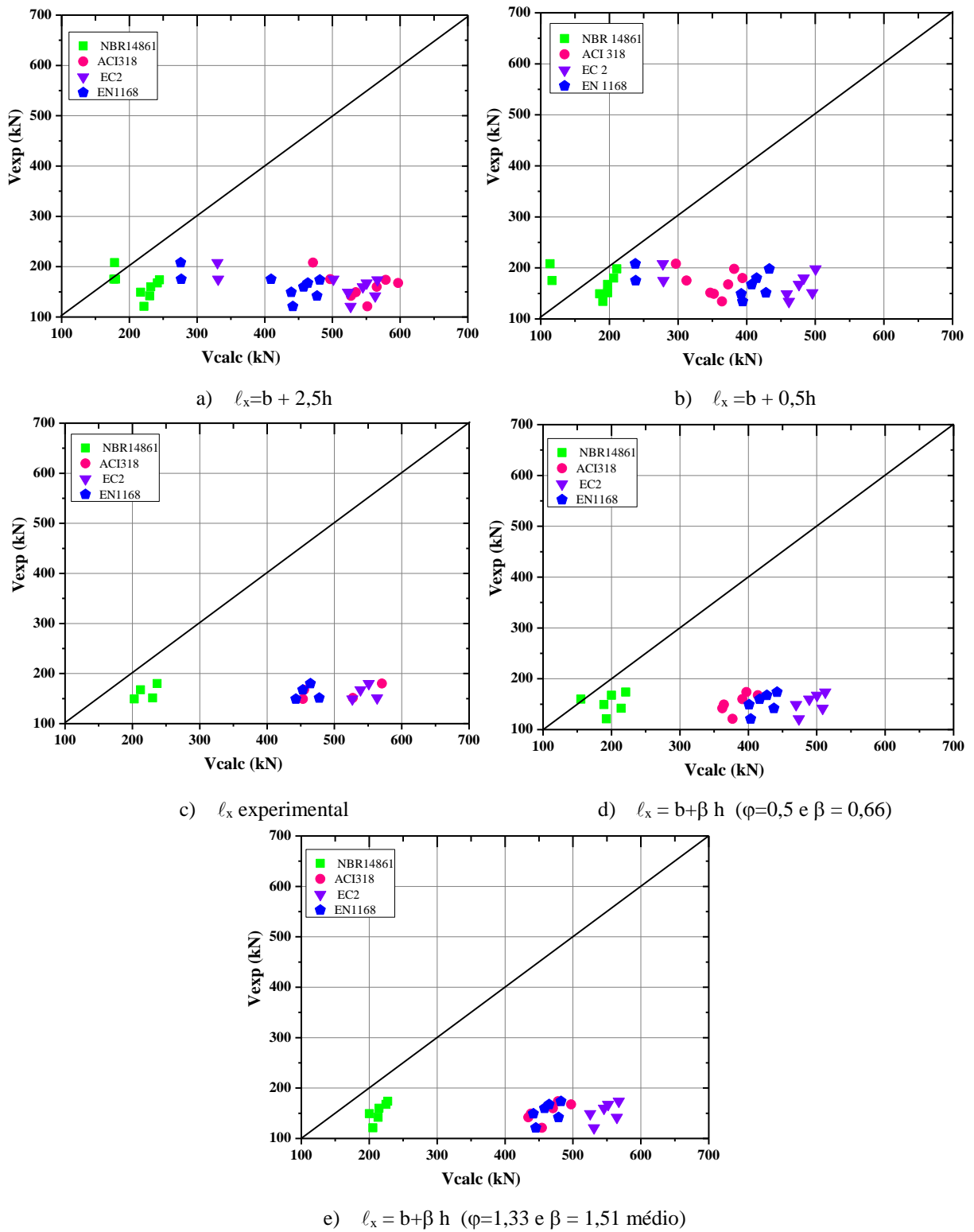
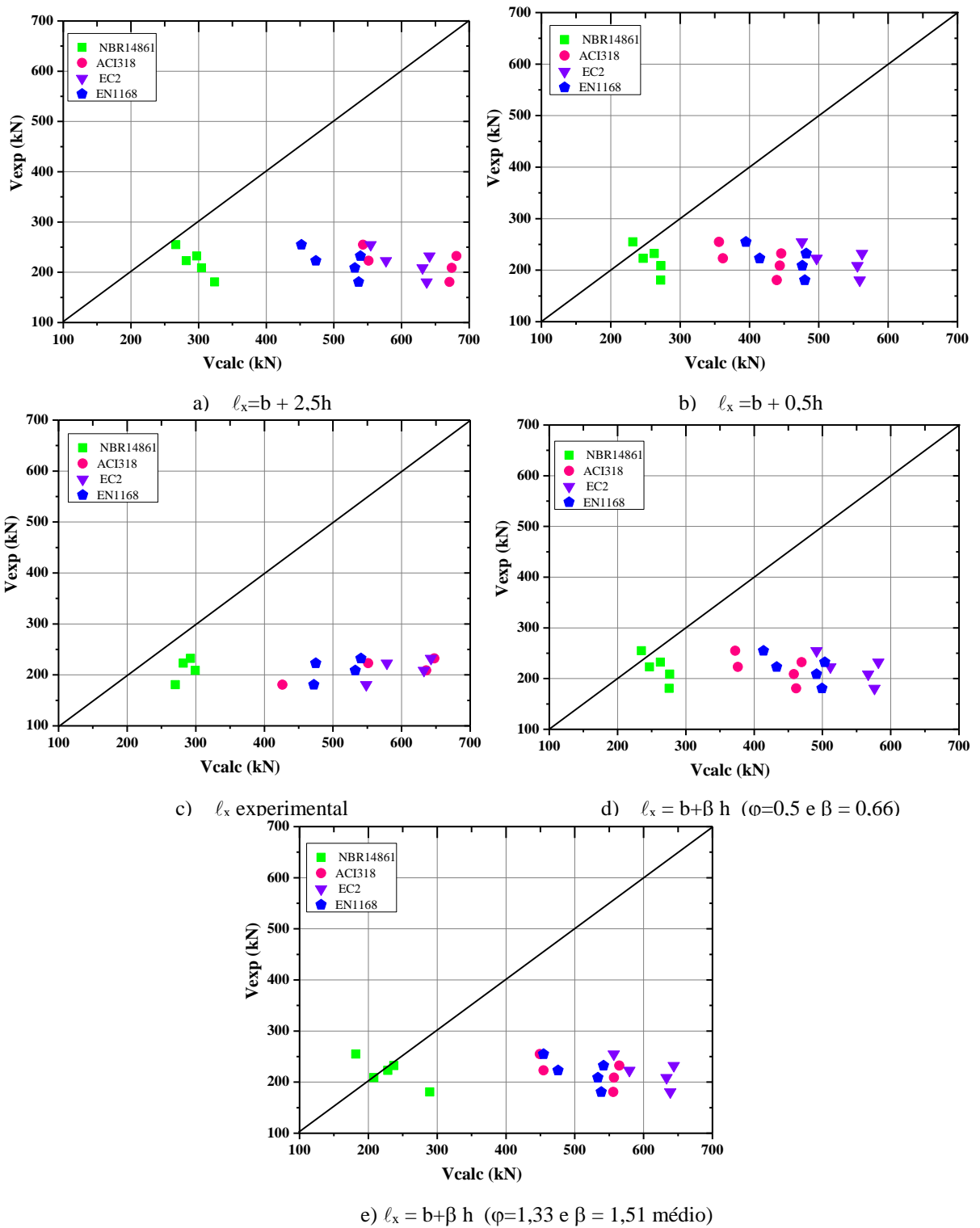


Figura 5.39 - Comparações dos valores experimentais com os valores calculados, lajes com capa de 9 cm e alvéolos preenchidos



5.8 VERIFICAÇÃO DO FATOR DE PROPORÇÃO DE PROTENSÃO (α)

O fator de proporção de protensão é obtido por meio da relação entre a distância da seção x a partir do final da laje (ℓ_x) e o comprimento de transmissão (ℓ_{pt2}). E o seu valor deve ser menor ou igual a 1. Com o intuito de verificar a influência do fator de proporção de protensão, realizou-se os cálculos de resistência a força cortante para as lajes de referência, com o valor do α igual a 1. Os cálculos foram realizados para as lajes de referência, lajes com capa, lajes sem capa e alvéolos preenchidos e por fim lajes com capa e alvéolos preenchidos. As comparações dos valores foram realizadas com a seção analisada na posição $x = 2,5 + b$, sendo b a largura do apoio. A Tabela 5.27 apresenta os resultados para as lajes de referência.

Tabela 5.27 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, com a utilização do fator de proporção da protensão $\alpha=1$, para lajes de referência.

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{NBR14861}^{(a)} / V_{exp}$
Série I (ANTUNES, 2012)		
M1-A	154,59	0,93
M1-B	159,26	0,97
Série II		
M2-A	163,97	0,97
M2-A*	148,71	1,08
M2-B	134,73	1,20
M2-B*	133,90	1,19
M3-A**	168,61	0,99
M3-B**	160,15	1,02
Média:		1,04
Desvio Padrão:		0,10
Coeficiente de Variação:		10,04%

(a) Eq. (3.12 e 3.13), com o fator de proporção da protensão $\alpha=1$;

Os primeiros resultados são para as lajes de referência, onde a média da relação da força cortante de cálculo (NBR 14861, 2011) e a força cortante experimental, correspondeu a 1,04, este valor é 16,80% inferior em relação à média obtida com a utilização do fator α de acordo com seção analisada (Tabela 5.4). Os valores da força cortante de cálculo sem a influência do fator de proporção α se aproximou dos valores obtidos experimentalmente.

A Tabela 5.28 mostra a comparação entre os valores experimentais e de cálculo, com a utilização do fator de proporção da protensão $\alpha=1$, para as lajes sem capa e com alvéolos preenchidos.

Tabela 5.28 – Comparações entre os valores experimentais e de cálculo, com a utilização do fator de proporção da protensão $\alpha=1$.

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{\text{NBR14861}}^{(a)} / V_{\text{exp}}$
Série I (ANTUNES, 2012)		
M1-0-3-50-N-A	118,04	1,57
M1-0-3-50-N-B	138,32	1,38
Série II		
M2-0-5-50-N	151,54	1,45
M2-0-3-50-S	160,84	1,27
M2-0-3-81-N	130,40	1,58
M2-0-5-81-N	137,66	1,65
M2-0-5-81-S	132,78	1,59
Média:		1,50
Desvio Padrão:		0,14
Coef. de Variação:		9,14%

(a) Eq. (3.13 e 3.20) com o fator de proporção da protensão $\alpha=1$;

Para as lajes sem capa e presença de alvéolos preenchidos a variação não foi expressiva mostrando um aumento de 2,74% na média dos valores em relação aos valores experimentais. E foi mantido o desvio padrão em 0,14.

Para as lajes com capa e lajes sem capa com alvéolos preenchidos os valores não se alteraram, pois na análise na verificação da força cortante de cálculo o fator de proporção de protensão apresentou valor superior a 1, e então adotou-se o fator $\alpha=1$.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O escopo deste trabalho foi a avaliação do comportamento de lajes alveolares protendidas de pequena altura (16 cm) e com preenchimento dos alvéolos realizado posteriormente à liberação da protensão. Procurou-se verificar a influência da adição de um aditivo microexpansor ao concreto com o objetivo de reduzir a retração do concreto de preenchimento dos alvéolos. Além disso, procurou-se avaliar a influência da extensão de preenchimento dos alvéolos e da presença da capa estrutural na resistência à força cortante das lajes alveolares protendidas. E, por fim, procurou-se comparar os resultados obtidos nos modelos físicos com os resultados obtidos por meio de equações disponíveis em normas nacionais e internacionais para lajes alveolares protendidas.

Considerando as lajes alveolares ensaiadas, cuja altura era de apenas 16 cm, para a força aplicada a $2,5h$ e $2,0h$ do apoio, os resultados experimentais e suas respectivas análises mostraram que o mecanismo de resistência à força cortante foi afetado pela presença de fissuras de flexão devido ao baixo momento de fissuração da laje. Nesse tipo de ensaio, o mecanismo mais provável de ruptura nas proximidades do apoio é a ruptura por tração diagonal. Porém, devido ao nível da protensão aplicada nas lajes, à presença de cabos de protensão na face superior (que reduzem o momento de fissuração) e à reduzida altura, a forma de ruptura predominante foi por tração diagonal em uma face da laje acompanhada por fissuras de flexão na outra face. Isso se dá porque o aumento da força de protensão aumenta a resistência das nervuras às tensões cisalhantes, porém é pouco efetivo para aumentar o momento de fissuração devido à reduzida altura da laje. Com isso, os modelos de cálculo baseados no mecanismo de flexo-cortante parecem ser mais adequados para estimar a resistências desse tipo de laje.

A capa estrutural de fato contribuiu para a resistência à força cortante da laje alveolar, sendo o seu aumento proporcional à altura da laje. Entretanto, é importante garantir a boa aderência entre os concretos da capa e da laje. Entre os principais procedimentos estão a garantia de boa rugosidade na superfície da laje durante o processo de produção, técnicas adequadas de limpeza antes do lançamento do concreto da capa e garantia de um adequado processo de cura. Com esses cuidados, foi possível garantir a aderência da capa no Estado Limite Último para as lajes com capa de 9 cm, mesmo com as lajes alveolares utilizadas na pesquisa apresentando

rugosidade superficial inferior à exigida pela NBR 9062 e pela FIB (2008) para superfícies rugosas.

A principal conclusão dessa pesquisa é que não foi observado aumento da resistência à força cortante das lajes alveolares devido ao preenchimento dos alvéolos, tanto nas lajes sem capa quanto com capa de concreto. Com isso, não houve influência nem do número de alvéolos preenchidos nem do comprimento de preenchimento do alvéolo na resistência à força cortante das lajes alveolares.

A adição do aditivo microexpansor ao concreto de preenchimento dos alvéolos não proporcionou aumento na resistência à força cortante da laje, entretanto ele contribuiu para o aumento da rigidez da laje antes da sua ruína. Isso indica que ele contribuiu para diminuir o deslizamento que ocorre entre o concreto de preenchimento e a face interna dos alvéolos da laje. De fato, na dosagem de 14 kg/m^3 , esse aditivo foi capaz de compensar a retração do concreto em corpos de prova seco ao ambiente por até 210 dias sem apresentar influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto.

Dentre os modelos de cálculo analisados, o modelo sugerido pela NBR 14861 foi o que mais se aproximou dos resultados dos ensaios por se basear no mecanismo de ruptura por flexo-cortante. Porém, mostrou-se conservador. O modelo do ACI 318 também apresentou boa estimativa da resistência das lajes alveolares sem capa. Por outro lado, os modelos do Eurocode 2 e da EN 1168 sistematicamente superestimaram a resistência à força cortante das lajes alveolares por se basearem no mecanismo de ruptura por tração diagonal.

Na aplicação do modelo de cálculo da NBR 14861, adotou-se o comprimento de transferência (l_{pt2}) sugerido pelo ACI 318 de cinquenta vezes o diâmetro da cordoalha. Com esse valor, os valores estimados pela NBR 14861 foram mais próximos dos valores obtidos dos ensaios, enquanto com o valor de 85 vezes o diâmetro da cordoalha os valores foram excessivamente conservadores.

O modelo da NBR 14861 não define uma seção crítica onde deve ser verificada a resistência à força cortante das lajes, apenas recomenda que se tome uma distância da face do apoio maior que metade da altura da laje. No caso das lajes ensaiadas com a força concentrada a 2,5h do apoio, os valores tomados na seção a 0,5h da face do apoio foram excessivamente conservadores. Para corrigir esses resultados, foi proposta uma modificação na expressão sugerida por Marquesi (2014) para a determinação da seção crítica em lajes alveolares de modo

a representar o comportamento das lajes com alvéolos oblongos. Os resultados obtidos com o modelo da NBR 14861 nessa nova seção crítica apresentaram boa aproximação com os resultados experimentais das lajes alveolares com capa e sem capa de concreto.

Ao aplicar as equações da NBR 14861, adotando o fator de proporção da protensão α igual a 1, o resultado foi satisfatório para as lajes de referência. Os valores médios de cálculo se aproximaram dos valores alcançados experimentalmente. Para os demais modelos o resultado foi uma pequena variação ou nenhuma.

O modelo de cálculo da NBR 14861 foi o que apresentou melhor estimativa da resistência à força cortante das lajes com capa e alvéolos preenchidos. Entretanto, essa aproximação se deu pelo fato desse modelo subestimar a resistência à força cortante das lajes alveolares com capa. Para as lajes com alvéolos preenchidos, sem a presença de capa, o modelo da NBR 14861 superestimou em 37% a resistência à força cortante das lajes.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final deste trabalho, são sugeridos alguns temas que poderão impulsionar a barreira do conhecimento no tema de lajes alveolares protendidas:

- ◆ Aprofundar o estudo quanto as lajes alveolares com alvéolos preenchidos, visando a realização do preenchimento antes da protensão.
- ◆ Análise do preenchimento de todos os alvéolos.
- ◆ A utilização de lajes com alturas superiores a 20cm com alvéolos oblongos para verificação da forma de ruptura;
- ◆ Avaliar o real comprimento de transferência da força de protensão nas lajes alveolares confeccionados pelo método de pré-tração.
- ◆ Analisar os modelos de cálculo baseados no mecanismo de flexo-cortante no sentido de propor alteração no modelo de cálculo da NBR 14861 de modo a que ele melhor represente os resultados dos ensaios de lajes com altura reduzida.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 67** - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1996. p. 7
- ABNT_____. **NM 131** - Concreto Endurecido - Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto. 1997. 10 p.
- ABNT_____. **NM 47** - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. 2002. 23 p.
- ABNT_____. **NBR 9062** - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006. p. 41
- ABNT_____. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2007. 9 p.
- ABNT_____. **NBR 8522** - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação. Rio de Janeiro. 2008. 16 p.
- ABNT_____. **NBR 9833** - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. 2008. p. 7
- ABNT_____. **NBR 15823** - Concreto auto-adensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. 2010.
- ABNT_____. **NBR 14861** - Lajes Alveolares Pré-Moldadas de Concreto Protendido- Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro. 2011. p. 36
- ABNT_____. **NBR 7222** - Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011. 3 p.
- ABNT_____. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro. 2014. 170 p.
- ABNT_____. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, **ACI - 318**. Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, MI. 2008.
- ACKER, A. V. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto**. Tradução de Marcelo Araújo FERREIRA. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- AECWeb Portal da arquitetura, engenharia e construção**, 2013. Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/emp/cont/m/xxx_8129_5382>. Acesso em: 15 Fevereiro 2014.
- ANTUNES, C. F. M. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 146. 2012.
- BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autoógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. Tese (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 144. 2004.
- BARROS, J. A. O. **Tese (Doutorado em engenharia civil) - Comportamento do betão reforçado com fibras: Análise experimental e simulação numérica**. Universidade do Porto. Porto, p. 507. 1995.

BRUNESI, E.; BOLOGNINI, D.; NASCIMBENE, R. Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: numerical and experimental comparisons. **Materials and Structures - RILEM**, v. 47, 7 Janeiro 2014. ISSN 1871-6873.

CATÓIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada**. Universidade de São Paulo, EESC-USP. São Carlos, p. 325. 2011.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION - CEN. **EN 1992-1-1:2004 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings**. Brussels, Belgium, p. 225. 2004.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – **EN 1168: 2008**. Precast Concrete Product – Hollow Core Slabs. Brussels. 2008

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 12390-4 - Testing hardened concrete. Compressive strength. Specification for testing machines**. Brussels. 2000.

CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA. FICHA. **CEB-CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA**, 2014. Disponível em:
<http://chimicaedile.com.br/arquivos/idro/ficha_seguranca.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2015.

COSTA, O. O. **Avaliação de desempenho elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 132. 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. 1ª. ed. São Carlos: EESC-USP, 2000.

EQUIPE DE FURNAS, L. D. C. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - ensaios e propriedades**. São Paulo: PINI, 1997.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON - FIB. Structural connections for precast concrete buildings. fib Bulletin N° 43. London, p. 370. 2008.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE - **FIP**. Guide to Good Practice - Composite Floor Structures. London:, 1998.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE. **FIP**. Guide to good practise - quality assurance of hollow core slab. London, England: 1992.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON - FIB (CEB-FIB). Guide to good practice: special design considerations for precast prestressed hollow core floors. Lausanne. 2000.

FERREIRA, MARCELO A.; FERNANDES, NEITON S.; CARVALHO, ROBERTO C.; ORTENZI, ALTIBANO. Avaliação de desempenho da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido. **Concreto e Construções - IBRACON**, São Paulo, n. 48, Outubro, Novembro e Dezembro 2007. 41.

FIP. Guide to good practice: shear at the interface of precast and in-situ concrete. FIP. Wrexham Springs, England. 1982.

FRANÇA, A. A. V. **Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 136. 2012.

FURNAS, E., L.,C.. **Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo- ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

- GIRHAMMAR, U. A.; PAJARI, M. Tests and analysis on shear of composite slabs of hollow units and concrete topping. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1708-1722, 2008.
- HASPARYK, N. P.; LOPES, A.N.M.; ANDRADE, M.A.S.; SANTOS, S.B.. Deformações por Retração e Fluência. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. ed. SÃO PAULO: PINI, 2005. Cap. 22, p. 656-685.
- KONG, F. K.; EVANS, R. H. **Reinforced and prestressed concrete**. UK. 2001.
- MACGREGOR, J. G.; WIGHT, J. K. **Reinforced Concrete - Mechanics and Design**. 6^a. ed. Pearson, 2012.
- MARQUESI, M. L. G. **Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas**.(Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 146. 2014.
- MELO, C. E. E. **Manual Munte de Projetos em Pré-fabricados de Concreto**. 2^a. ed. São Paulo: PINI, 2007.
- MERCX, W. P. M.; WALRAVEN, J. C. **The bearing capacity of prestressed hollow core slabs**. HERON, Netherlands, 3, 1983. 46.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3^a. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- MOLD. Prodedimentos para lajes alveolares, p. 9, 2011. Acesso em: 10 Março 2014.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. Longman, p. 438. 1994.
- PAJARI, M. **Resistence of prestressed hollow core slabs against web shear failure**. Research Notes 2292. ed. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2005.
- PALMER, K. D.; SCHULTZ, A. E. **Web shear strength of precast, prestressed concrete hollow core slabs units: a final report**. Department of civil engineering. University of Minnesota. Minneapolis. 2009.
- RILEM DRAFT RECOMMENDATION. 50-FMC. Committee On Fracture Mechanics Of Concrete. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. **Matériaux et Constructions**, v. 33, p. 347-351, july 1985. ISSN 1359-5997.
- RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao estudo da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação a baixas idades em concretos estruturais**. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 247. 2010.
- SANTOS, A. P.. **Análise de continuidade de lajes alveolares: Estudo teórico e experimental**. (Tese de doutorado). Universidade de São Carlos. São Carlos, p. 370. 2014.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S.; SILVA, V. D. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. **Construction and Building MATERIALS**, 25 September 2007. 1688–1695.
- TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições**. Dissertação (Mestrado em construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 107. 2008.
- THIEL, E. **Thiel Engenharia**, 2013. Disponível em: <<http://www.thiel.eng.br/noticias/detalhes/31>>. Acesso em: 15 Fevereiro 2014.

TKALČIĆ ET AL. Prestressed hollow core slabs - shear resistance test according to HRN 1168:2005. **FIB SYMPOSIUM**, Dubrovnik, Croatia, 20-23 May 2007. 313-320.

YANG, L. Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure. **Journal of Structural Engineering**, v. 120, n. 9, p. 2675-2696, September 1994. ISSN 0733-9445.

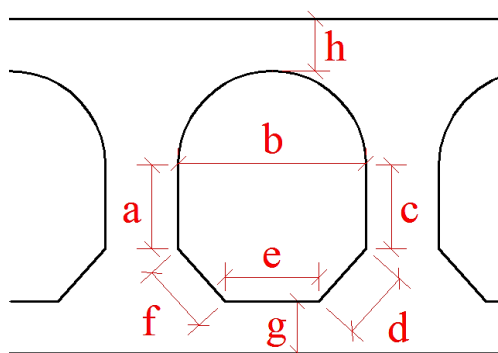
**APÊNDICE A – CÁLCULO E DEFINIÇÕES DAS
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES**

Determinação do campo amostral de medidas necessárias para a definição da área real da laje alveolar pretendida. Para precisar o número de medidas foi utilizada a formulação estatística que o tamanho mínimo que deve ter a amostra para uma população finita ao se fazer a estimação da média populacional μ com um erro máximo E , a um nível de confiança desejado α . Esta formulação tem como requisitos, que: amostra aleatória simples (todas amostras de mesmo tamanho têm igual chance de serem selecionadas), o valor do desvio padrão populacional (σ) é conhecido. A população é normalmente distribuída ou $n > 30$.

$$n = \frac{N\sigma^2(Z_{\alpha/2})^2}{(N-1)E^2 + \sigma^2(Z_{\alpha/2})^2} \quad (\text{A.1})$$

Onde N é o tamanho da população, que neste caso corresponde ao número de alvéolos e é igual a 360. A variável E é o erro amostral tolerável, que neste problema foi admitido igual a 2%. Para utilização de 95% de confiança, o valor crítico Z corresponde a 1,96. Ao utilizar essa margem de erro, o número de amostras deveria ser de 76. Adotou-se, então, o nível de confiança mínimo, o que resulta em $n \geq 31$. Foram, então, selecionadas 49 amostras para medição das dimensões dos alvéolos, conforme mostrado na Figura A.1.

Figura A. 1 – Medidas realizadas nos alvéolos.



Após determinadas todas as dimensões nas 49 amostras, foi calculada a média e o desvio padrão de cada uma delas (Tabela A. 1), com estes valores calculou-se o coeficiente de variação das dimensões dos alvéolos ficou em 8,42%. Utilizando este valor na Eq. (A.1), conclui-se que o tamanho mínimo da amostra é igual a 47, ou seja, as 49 amostras registradas foram suficientes para determinar as dimensões reais de todas as lajes ensaiadas.

Tabela A. 1 – Média das medidas da laje alveolares de referência

Geometria	Dimensão Média	Desvio Padrão
h_{laie} capa 5cm (mm):	52,93	-
h_{laie} capa 9cm (mm):	93,28	-
bw_{int} (mm):	39,21	0,88
bw_{ext} (mm):	44,250	1,58
$balv$ (mm):	85,150	2,46
hpc (mm):	59,05	17,82
$hlaje$ (mm):	168,43	2,05
Larg. Sup (mm):	119,72	0,36
Larg. Inferior (mm):	122,0393	0,84
g - linha inf. do alv. até a face inf. da laje:	35,77	2,90
h - linha sup. do alv. até a face sup. da laje:	36,31	3,41
f - chanfro esquerdo (mm):	29,09	2,62
d - chanfro direito (mm):	29,29	2,64
e - face inferior do alvéolo (mm):	41,31	2,42
a - lateral esquerda do alvéolo (mm):	34,87	2,98
c - lateral direita do alvéolo (mm):	34,06	3,07

**APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES DE DOSAGENS
COM O CONCRETO DE PREENCHIMENTO NO ESTADO
FRESCO E ENDURECIDO.**

Foram realizadas 11 dosagens para a determinação da quantidade ideal de aditivo microexpansor no concreto de preenchimento dos alvéolos por meio da análise da retração. Por questões técnicas, foram utilizadas somente 4 delas, definidas por: R07 (concreto com aditivo visocrete 0,9% e aditivo Dry 1 NG - 14,0 kg/m³); R08 (concreto com aditivo visocrete 0,9% e aditivo Dry 1 NG - 6,0 kg/m³); R10 (concreto de referência, mistura com aditivo visocrete 0,9%) e R11 (concreto com aditivo visocrete 0,9% e aditivo Dry 1 NG -10,0 kg/m³). O valor de 0,9% de aditivo do tipo visocrete corresponde a 224,18 gramas.

As tabelas abaixo apresentam a os resultados dos ensaios para o concreto de preenchimento dos alvéolos no estado fresco e endurecido.

Tabela B. 1- Resultados dos ensaios para o concreto no estado fresco.

Ensaio Concreto Fresco	Dosagens			
	R07	R08	R09	R10
Ar incorporado (%):	0,70	1,05	0,95	1,00
Diâmetro de espalhamento (cm):	81,5	76,0	75,5	77,5
Tempo de escoamento (s):	5,14	8,03	7,67	5,35
Peso Concreto + Tara (g):	21400	21450	21300	21550
Massa específica (kg/m ³)	2.341,99	2.348,59	2.328,81	2.361,78

**APENDICE C – RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE
DAS LAJES**

Tabela C. 1 – Resistência à força cortante pela NBR14861, variando as seções analisadas.

Modelo	$\ell x = 2,5h + b$	$\ell x = b + 0,5.h$	ℓx experimental	$\ell x = b + \beta h$ e $\varphi = 0,5$	$\ell x = b + \beta h$ e $\varphi = 1,33$
M1-A	138,52	109,51	-	-	-
M1-B	149,24	117,51	-	-	-
M2-A	154,62	126,91		129,70	159,36
M2-A*	155,91	127,93	144,51	130,66	160,70
M2-B	157,35	128,98	144,50	131,59	162,20
M2-B*	155,21	127,33	142,87	129,73	159,98
M3-A*	154,26	132,98	152,90	135,65	167,40
M3-B*	150,23	129,65	147,15	132,11	162,97
M1-5-0-A	169,19	139,42	-	-	-
M1-5-0-B	172,63	141,23	-	-	-
M2-5-0-A	186,72	150,93	180,07	155,50	169,21
M2-5-0-A*	185,60	149,99	167,58	154,78	168,43
M2-5-0-B	189,58	152,51	164,23	157,60	171,86
M2-9-0-A*	217,93	180,35	211,59	187,11	201,24
M2-9-0-B*	221,60	182,39	221,60	189,32	204,10
M2-9-5-50-N	323,80	272,17	270,24	275,60	289,34
M2-9-3-50-S	266,50	232,00	266,50	234,97	181,76
M2-9-3-81-N	281,73	246,94	281,73	246,73	228,38
M2-9-5-81-N	304,56	272,21	299,19	276,40	207,90
M2-9-5-81-S	297,28	262,90	292,39	262,86	237,14
M1-0-3-50-N-A	179,79	109,26	-	-	-
M1-0-3-50-N-B	185,47	112,82	-	-	-
M2-0-5-50-N	214,55	187,38	185,31	189,34	202,86
M2-0-3-50-S	198,72	168,06	177,11	171,25	186,17
M2-0-3-81-N	200,56	171,63	192,61	178,00	192,20
M2-0-5-81-N	222,85	193,99	207,31	191,71	205,44
M2-0-5-81-S	205,88	177,81	180,03	173,03	185,94
M1-5-3-50-N-A	177,28	157,57	-	-	-
M1-5-3-50-N-B	178,27	153,27	-	-	-
M2-5-5-50-N-A	230,11	197,40	230,11	214,16	213,19
M2-5-5-50-N-B	244,51	210,94	244,51	220,94	227,34
M2-5-5-50-S-A	241,47	206,32	236,87	199,97	224,67
M2-5-5-50-S-B	231,64	197,60	212,13	155,18	214,46
M2-5-5-81-S-A	216,88	185,77	202,98	189,02	200,40
M2-5-5-81-S-B	221,70	190,56	221,70	192,70	205,56

Tabela C. 2 – Resistência à força cortante pelo ACI 318, variando as seções analisadas.

Modelo	$\ell_x=2,5h+b$	$\ell_x =b+0,5.h$	ℓ_x experimental	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=0,5$	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=1,33$
M1-A	188,03	112,54	-	-	-
M1-B	170,37	124,36	-	-	-
M2-A	182,06	126,64	126,81	132,22	159,36
M2-A*	183,68	127,73	127,62	133,18	160,49
M2-B	186,75	129,79	130,27	135,03	162,68
M2-B*	182,79	127,04	124,75	131,82	155,43
M3-A*	192,88	134,10	134,27	139,44	168,07
M3-B*	186,90	130,02	130,12	134,93	162,80
M1-5-0-A	292,40	193,03	-	-	-
M1-5-0-B	293,87	193,21	-	-	-
M2-5-0-A	274,76	181,07	155,54	148,74	152,54
M2-5-0-A*	272,32	179,46	151,02	147,49	151,25
M2-5-0-B	276,13	182,03	151,36	149,58	153,41
M2-9-0-A*	338,27	223,61	191,61	183,32	188,10
M2-9-0-B*	340,12	224,89	194,82	184,28	189,10
M2-9-5-50-N	670,86	439,51	426,44	461,66	556,04
M2-9-3-50-S	543,20	356,25	543,20	372,33	449,37
M2-9-3-81-N	551,26	361,69	551,26	376,26	454,72
M2-9-5-81-N	674,18	443,90	635,97	458,36	556,91
M2-9-5-81-S	681,31	446,03	647,87	469,51	564,81
M1-0-3-50-N-A	381,03	263,18	-	-	-
M1-0-3-50-N-B	393,50	272,96	-	-	-
M2-0-5-50-N	476,63	344,28	257,44	276,28	333,25
M2-0-3-50-S	376,81	272,09	237,85	218,01	263,06
M2-0-3-81-N	374,20	270,07	286,29	227,05	273,33
M2-0-5-81-N	475,52	343,18	327,17	284,15	342,11
M2-0-5-81-S	487,99	352,30	290,72	292,08	352,11
M1-5-3-50-N-A	496,90	312,47	-	-	-
M1-5-3-50-N-B	471,47	296,88	-	-	-
M2-5-5-50-N-A	527,49	347,17	527,49	362,10	434,22
M2-5-5-50-N-B	578,84	381,92	578,84	397,41	478,12
M2-5-5-50-S-A	597,19	394,03	570,64	413,96	497,25
M2-5-5-50-S-B	565,43	373,16	455,25	391,49	470,48
M2-5-5-81-S-A	534,73	352,39	453,24	364,26	438,12
M2-5-5-81-S-B	551,51	364,15	551,51	377,07	454,42

Tabela C. 3 – Resistência à força cortante pelo EC2, variando as seções analisadas.

Modelo	$\ell_x=2,5h+b$	$\ell_x =b+0,5.h$	ℓ_x experimental	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=0,5$	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=1,33$
M1-A	254,74	186,34	-	-	-
M1-B	280,22	214,92	-	-	-
M2-A	288,72	182,90	288,72	171,93	293,34
M2-A*	294,92	242,11	288,80	175,37	299,23
M2-B	292,86	240,30	291,70	173,42	296,07
M2-B*	291,91	239,51	291,64	172,46	294,60
M3-A*	306,81	251,82	306,81	181,73	310,34
M3-B*	297,06	243,96	297,06	175,68	370,04
M1-5-0-A	363,72	285,84	-	-	-
M1-5-0-B	381,59	298,52	-	-	-
M2-5-0-A	394,51	327,51	394,58	339,79	397,04
M2-5-0-A*	392,60	325,94	391,16	339,17	394,83
M2-5-0-B	395,16	328,16	368,14	341,91	397,19
M2-9-0-A*	453,65	376,55	454,97	392,55	455,42
M2-9-0-B*	468,95	388,92	469,68	404,96	470,77
M2-9-5-50-N	637,24	559,12	548,52	576,19	638,88
M2-9-3-50-S	554,33	475,75	553,83	491,53	556,72
M2-9-3-81-N	577,02	496,85	578,52	511,64	579,42
M2-9-5-81-N	630,97	555,80	632,62	567,00	633,49
M2-9-5-81-S	641,39	562,51	642,90	581,94	643,82
M1-0-3-50-N-A	353,67	292,19	-	-	-
M1-0-3-50-N-B	356,09	294,97	-	-	-
M2-0-5-50-N	468,21	416,59	559,67	586,42	657,57
M2-0-3-50-S	383,07	330,26	489,20	458,43	524,33
M2-0-3-81-N	401,98	349,41	542,26	479,43	542,26
M2-0-5-81-N	474,75	422,35	651,94	595,78	666,20
M2-0-5-81-S	461,32	406,33	585,22	587,50	662,54
M1-5-3-50-N-A	331,29	278,87	-	-	-
M1-5-3-50-N-B	330,10	277,98	-	-	-
M2-5-5-50-N-A	563,30	495,77	563,54	508,63	564,67
M2-5-5-50-N-B	566,45	500,34	419,94	512,40	567,60
M2-5-5-50-S-A	550,50	483,21	551,19	500,51	551,84
M2-5-5-50-S-B	545,00	476,32	538,81	489,18	545,75
M2-5-5-81-S-A	523,00	458,45	526,74	469,91	525,27
M2-5-5-81-S-B	527,04	461,72	382,29	473,94	531,01

Tabela C. 4 – Resistência à força cortante pelo EN 1168, variando as seções analisadas.

Modelo	$\ell_x=2,5h+b$	$\ell_x =b+0,5.h$	ℓ_x experimental	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=0,5$	$\ell_x =b+\beta h$ e $\varphi=1,33$
M1-A	205,32	149,69	-	-	-
M1-B	225,86	172,76	-	-	-
M2-A	223,96	185,80	223,96	134,32	223,96
M2-A*	228,76	189,73	224,22	137,02	228,76
M2-B	227,17	188,32	226,31	135,53	227,17
M2-B*	226,43	187,70	226,23	134,79	226,43
M3-A*	237,99	197,34	237,99	142,02	237,99
M3-B*	230,42	191,18	230,42	137,30	230,42
M1-5-0-A	292,39	230,48	-	-	-
M1-5-0-B	306,69	240,63	-	-	-
M2-5-0-A	307,70	259,01	307,77	268,01	310,17
M2-5-0-A*	306,22	257,79	305,32	267,46	308,45
M2-5-0-B	308,20	259,52	288,44	269,57	310,23
M2-9-0-A*	353,08	296,90	354,40	308,62	354,85
M2-9-0-B*	364,94	306,52	365,66	318,30	366,76
M2-9-5-50-N	536,75	479,76	472,02	499,29	538,39
M2-9-3-50-S	452,16	394,97	451,66	413,64	454,56
M2-9-3-81-N	473,43	414,89	474,92	433,01	475,82
M2-9-5-81-N	530,96	476,35	532,61	491,34	533,48
M2-9-5-81-S	539,31	481,96	540,82	503,48	541,74
M1-0-3-50-N-A	292,69	247,13	-	-	-
M1-0-3-50-N-B	295,47	250,18	-	-	-
M2-0-5-50-N	403,44	365,29	478,02	497,69	550,32
M2-0-3-50-S	316,91	277,88	400,45	377,73	426,49
M2-0-3-81-N	336,28	297,43	445,09	398,61	445,09
M2-0-5-81-N	409,27	370,54	547,19	505,67	557,77
M2-0-5-81-S	392,49	351,85	491,38	493,06	548,57
M1-5-3-50-N-A	276,65	238,48	-	-	-
M1-5-3-50-N-B	275,79	237,84	-	-	-
M2-5-5-50-N-A	477,36	428,07	477,60	437,47	478,71
M2-5-5-50-N-B	481,37	433,12	371,89	441,95	482,52
M2-5-5-50-S-A	463,63	414,57	464,32	427,25	464,97
M2-5-5-50-S-B	457,57	407,22	453,21	416,69	458,32
M2-5-5-81-S-A	439,13	392,28	442,87	401,08	441,76
M2-5-5-81-S-B	441,63	394,17	334,05	403,55	445,51

**APÊNDICE D - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS
LAJES**

Tabela D. 1 – Características geométricas das lajes ensaiadas na série II.

Dimensões (mm)	M2-A	M2-A*	M2-B	M2-B*	M3-A	M3-B	M2-5-0-A	M2-5-0-A*
b_{w,int_1}	39,08	40,26	39,53	40,07	43,59	40,81	41,79	40,75
b_{w,int_2}	38,02	41,86	40,50	40,62	48,23	42,29	34,84	40,85
b_{w,int_3}	37,15	41,55	33,69	37,51	36,71	34,63	40,40	35,55
b_{w,int_4}	34,08	33,80	37,87	33,51	39,52	38,32	35,42	39,85
b_{w,int_5}	38,02	38,81	35,59	37,69	36,33	34,32	38,06	35,37
b_{w,int_6}	33,64	34,23	37,40	33,90	39,07	38,50	42,17	38,18
b_{w,int_7}	40,21	37,15	40,30	41,69	41,46	41,27	41,14	41,89
b_{w,int_8}	38,75	39,95	39,57	39,40	40,63	39,11	39,41	39,38
Média $b_{w,int}$	47,14	43,04	43,34	47,05	42,72	40,87	42,99	41,30
b_{w,ext_1}	43,98	47,79	47,87	42,94	46,75	47,59	47,04	46,93
b_{w,ext_2}	39,01	39,84	39,57	39,44	44,74	44,23	45,02	44,12
Média b_w	39,01	39,84	39,57	39,44	41,45	40,13	40,53	40,33
Σb_w	390,07	398,44	395,66	394,38	414,51	401,33	405,31	403,28
b_{alv-1}	79,10	81,43	81,02	79,02	80,64	80,95	79,68	75,77
b_{alv-2}	87,58	85,57	87,23	87,54	83,17	83,60	85,99	85,97
b_{alv-3}	88,10	85,77	87,24	88,25	85,36	86,86	86,63	87,11
b_{alv-4}	88,09	88,16	88,31	87,88	85,66	87,65	86,22	86,10
b_{alv-5}	88,03	87,01	87,78	87,76	85,51	87,85	86,24	85,70
b_{alv-6}	88,33	87,71	88,30	87,70	86,77	87,84	87,60	85,94
b_{alv-7}	87,59	87,95	87,93	87,11	86,56	87,95	87,99	85,75
b_{alv-8}	87,02	87,11	87,62	85,27	86,42	87,54	86,03	86,31
b_{alv-9}	80,65	79,03	78,62	80,89	76,78	78,66	77,40	79,30
Média b_{alv}	86,05	85,53	86,01	85,71	84,10	85,43	84,86	84,66
Σb_{alv}	774,49	769,74	774,05	771,42	756,87	768,90	763,78	761,97
$d_{1-inferior}$	131,38	132,29	141,87	134,40	141,14	136,24	133,88	134,93
$d_{2-inferior}$	140,13	136,55	139,79	136,50	139,20	140,82	138,26	139,29
$d_{3-inferior}$	142,14	134,18	142,39	141,82	136,33	140,51	139,61	141,87
$d_{4-inferior}$	142,38	141,55	142,22	140,95	140,81	141,94	141,86	142,20
$d_{5-inferior}$	140,78	137,87	139,28	140,35	137,96	136,81	136,56	141,17
$d_{6-inferior}$	138,34	139,13	136,57	135,78	135,44	135,54	137,95	137,39
$d_{7-inferior}$	130,23	129,18	128,87	128,21	128,18	130,27	128,10	128,86
$d_{8-inferior}$	136,79	135,11	137,77	135,84	136,38	136,49	136,48	136,50
$d_{médio-inferior}$	34,00	35,91	33,85	31,82	38,47	33,59	42,80	31,93
$d_{9-supeior}$	34,00	32,36	34,80	32,19	34,86	33,96	40,56	32,91
$d_{10-supeior}$	36,00	37,06	34,87	32,53	34,86	33,94	39,03	31,60
$d_{11-supeior}$	37,00	36,12	37,50	36,84	34,18	33,40	36,12	34,48
$d_{12-supeior}$	35,25	35,36	35,26	33,35	35,59	33,72	39,63	32,73
$d_{médio-supeior}$	63,30	54,77	51,47	69,61	53,86	48,67	60,46	49,92

h_{pc1}	63,30	54,77	51,47	69,61	53,86	48,67	60,46	49,92
h_{pc2}	65,00	60,73	54,18	59,13	53,64	61,98	57,96	54,67
h_{pc3}	64,30	61,50	60,57	63,03	55,69	60,49	56,05	60,77
h_{pc4}	65,59	64,31	58,64	60,56	60,69	55,76	55,04	63,49
h_{pc5}	64,78	64,89	58,69	59,05	61,86	57,34	56,87	64,05
h_{pc6}	62,77	60,58	55,39	57,61	62,11	50,81	53,49	62,84
h_{pc7}	60,41	62,78	58,47	56,82	61,57	52,81	54,03	62,47
h_{pc8}	64,90	64,72	50,60	59,19	61,59	64,35	55,37	56,84
h_{pc9}	64,18	66,10	59,57	60,98	57,94	63,29	57,57	59,72
h_{pc10}	60,07	64,47	60,78	57,20	62,45	65,58	56,54	57,36
h_{pc11}	60,73	65,56	61,67	52,68	59,05	61,91	55,36	48,89
h_{pc12}	55,01	64,37	65,66	41,74	62,86	62,34	53,81	61,70
Média h_{pc}	62,59	62,90	57,97	58,13	59,44	58,78	56,05	58,56
$h_{laje 1}$	167,53	172,70	169,80	168,91	171,29	171,03	165,79	167,74
$h_{laje 2}$	171,03	166,31	168,32	167,45	168,34	169,78	166,72	165,46
$h_{laje 3}$	172,08	170,31	169,11	170,71	168,84	170,04	165,01	164,59
Média h_{laje}	170,21	169,77	169,08	169,02	169,49	170,28	165,84	165,93
h_{capa1}	-	-	-	-	-	-	57,38	49,14
h_{capa2}	-	-	-	-	-	-	48,99	52,94
h_{capa3}	-	-	-	-	-	-	50,70	52,71
Média h_{capa}							52,36	51,60
Largura Superior	120,00	119,10	120,00	119,60	119,50	120,10	119,90	119,90
Largura Inferior	123,00	121,60	123,00	121,10	122,00	121,70	122,60	122,40
Comprimento 1	399,80	400,00	399,70	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Comprimento 2	399,90	400,00	399,65	400,00	400,00	400,00	399,95	400,00

Legenda

$b_{w, int}$	Medida da nervura interna da laje
$b_{w, ext}$	Medida da nervura externa da laje
b_{alv}	Largura do alvéolo
$d_{inferior}$	Distância entre o centroide da cordoalha inferior até a face superior da laje
$d_{superior}$	Distância entre o centroide da cordoalha superior até a face superior da laje
h_{pc}	Distância vertical entre a face inferior da laje até o ponto da nervura com menor largura
h_{laje}	Altura da laje alveolar
h_{capa}	Altura da capa

Tabela D.1 continuação 1 - Características geométricas das lajes ensaiadas na série II.

Dimensões (mm)	M2-5-0-B	M2-9-0-A*	M2-9-0-B*	M2-0-3-50-S	M2-0-3-81-N	M2-0-5-81-N	M2-0-5-50-N
b_{w,int_1}	40,98	39,49	40,25	44,57	48,45	42,24	38,40
b_{w,int_2}	41,90	41,90	42,06	40,32	42,12	41,38	41,50
b_{w,int_3}	39,00	37,63	43,68	39,30	41,75	37,14	34,25
b_{w,int_4}	36,32	35,83	36,29	41,05	38,89	35,35	38,36
b_{w,int_5}	39,52	38,77	40,55	37,31	35,60	39,99	32,22
b_{w,int_6}	35,44	35,62	38,79	37,25	38,19	34,81	38,54
b_{w,int_7}	42,11	41,68	39,24	44,23	35,85	40,96	40,28
b_{w,int_8}	38,54	40,68	43,41	40,04	43,27	40,75	40,39
Média $b_{w,int}$	39,23	38,95	40,53	40,51	40,52	39,08	37,99
b_{w,ext_1}	48,35	47,38	41,26	39,30	43,30	47,71	40,53
b_{w,ext_2}	43,82	40,70	47,84	48,40	41,75	42,60	49,26
Média $b_{w,ext}$	46,09	44,04	44,55	43,85	42,53	45,16	44,90
Média b_w	40,47	39,88	41,26	41,12	40,88	40,18	39,25
Σb_w	445,21	438,63	453,90	452,28	449,69	442,01	431,72
b_{alv-1}	75,77	77,00	79,95	79,41	77,25	79,85	83,02
b_{alv-2}	85,97	87,57	84,40	84,54	85,95	88,10	86,29
b_{alv-3}	87,11	85,35	85,57	86,97	87,24	90,90	87,05
b_{alv-4}	86,10	86,85	84,84	84,40	87,03	88,23	87,98
b_{alv-5}	85,70	86,98	84,57	85,66	86,35	87,51	88,40
b_{alv-6}	85,94	85,88	84,63	87,59	86,30	85,40	87,66
b_{alv-7}	85,75	86,45	86,10	86,29	85,59	88,16	88,85
b_{alv-8}	86,31	85,88	85,02	84,83	83,31	85,35	87,02
b_{alv-9}	79,30	80,38	77,11	76,47	79,97	80,79	78,85
Média b_{alv}	85,27	84,70	83,58	84,02	84,33	86,03	86,12
Σb_{alv}	682,18	762,34	752,19	756,16	758,99	774,29	775,12
$d_{1-inferior}$	134,20	131,11	138,19	130,48	125,85	132,93	121,85
$d_{2-inferior}$	142,35	137,94	141,18	145,01	136,08	139,99	135,09
$d_{3-inferior}$	144,13	141,62	142,38	147,85	139,03	132,92	138,12
$d_{4-inferior}$	145,69	144,73	141,88	146,03	139,12	142,61	134,78
$d_{5-inferior}$	145,16	145,39	146,55	147,52	135,81	140,51	139,64
$d_{6-inferior}$	144,95	142,47	145,00	148,43	138,82	139,99	135,59
$d_{7-inferior}$	142,13	142,42	141,84	145,80	137,70	138,55	136,31
$d_{8-inferior}$	131,15	127,74	126,70	134,23	132,12	132,95	125,76
$d_{médio-inferior}$	141,22	139,18	140,47	143,17	135,57	137,56	133,39
$d_{9-supeior}$	45,22	36,91	40,53	37,63	38,67	40,15	30,41
$d_{10-supeior}$	42,91	38,39	45,61	41,41	40,81	40,28	36,60
$d_{11-supeior}$	40,91	35,87	42,67	36,50	35,34	39,62	31,50
$d_{12-supeior}$	45,18	32,21	43,36	35,26	35,20	40,06	32,61

$d_{\text{médio-superior}}$	43,56	35,85	43,04	37,70	37,51	40,03	32,78
h_{pc1}	54,54	65,91	50,89	50,80	63,37	60,68	70,30
h_{pc2}	48,30	65,64	52,77	55,67	55,62	63,61	53,40
h_{pc3}	57,87	63,49	55,66	58,93	56,18	62,71	60,33
h_{pc4}	55,80	63,22	58,27	58,69	59,24	59,20	62,50
h_{pc5}	57,28	62,47	57,40	54,55	55,57	59,79	56,07
h_{pc6}	56,92	62,96	58,38	57,58	57,03	58,72	56,50
h_{pc7}	52,64	54,05	61,20	57,02	54,91	58,26	60,57
h_{pc8}	54,80	60,44	65,32	55,47	57,28	52,97	57,07
h_{pc9}	53,80	59,27	57,11	55,30	52,72	58,03	56,53
h_{pc10}	61,30	62,34	63,54	58,40	58,42	58,70	58,53
h_{pc11}	61,07	59,08	62,99	54,75	55,74	63,03	59,45
h_{pc12}	48,90	54,83	64,13	58,50	66,91	52,99	65,37
Média h_{pc}	55,27	61,14	58,97	56,31	57,75	59,06	59,72
$h_{\text{laje 1}}$	161,34	168,70	176,65	167,65	169,07	166,68	170,44
$h_{\text{laje 2}}$	167,20	169,73	166,73	169,31	166,62	169,23	171,78
$h_{\text{laje 3}}$	170,65	171,73	167,75	171,13	167,30	169,90	174,64
Média h_{laje}	166,40	170,05	170,38	169,36	167,66	168,60	172,29
h_{capa1}	59,23	101,42	88,02	-	-	-	-
h_{capa2}	47,96	100,63	90,76	-	-	-	-
h_{capa3}	37,53	87,68	87,40	-	-	-	-
Média h_{capa}	48,24	96,58	88,73	-	-	-	-
Largura Superior	119,80	119,00	119,10	119,60	119,90	119,80	120,00
Largura. Inferior	122,20	122,90	121,10	123,00	120,90	121,50	123,00
Comprimento 1	400,00	400,00	400,00	399,90	400,00	400,60	400,00
Comprimento 2	400,20	400,00	400,00	400,20	400,10	400,20	399,90

Legenda

$b_{w, \text{int}}$	Medida da nervura interna da laje
$b_{w, \text{ext}}$	Medida da nervura externa da laje
b_{alv}	Largura do alvéolo
d_{inferior}	Distância entre o centroide da cordoalha inferior até a face superior da laje
d_{superior}	Distância entre o centroide da cordoalha superior até a face superior da laje
h_{pc}	Distância vertical entre a face inferior da laje até o ponto da nervura com menor largura
h_{laje}	Altura da laje alveolar
h_{capa}	Altura da capa

Tabela D.1 continuação 2 - Características geométricas das lajes ensaiadas na série II.

Dimensões (mm)	M2-0-5-81-S	M2-9-5-50-N	M2-9-3-50-S	M2-9-3-81-N	M2-5-5-50-N-A	M2-5-5-50-N-B
bw,int_1	39,80	40,84	41,62	41,47	42,91	40,49
bw,int_2	40,69	41,46	40,72	43,14	41,44	41,35
bw,int_3	34,23	35,61	39,92	38,39	36,33	36,12
bw,int_4	37,74	38,31	35,72	36,96	38,16	38,43
bw,int_5	33,46	36,15	39,30	40,44	35,45	35,44
bw,int_6	37,67	37,49	34,83	36,79	37,98	37,78
bw,int_7	40,52	41,70	41,28	43,47	41,81	42,06
bw,int_8	40,45	39,78	42,43	42,47	40,43	39,56
Média bw int	38,07	38,92	39,48	40,39	39,31	38,90
bw,ext_1	43,02	40,99	47,89	48,54	40,11	38,91
bw,ext_2	47,74	47,38	42,66	40,40	46,61	47,07
Média bw ext	45,38	44,19	45,28	44,47	43,36	42,99
Média bw	39,40	39,88	40,53	41,13	40,05	39,65
□ bw	433,39	438,63	445,85	452,46	440,54	436,11
balv-1	80,85	79,33	78,10	77,76	81,37	79,85
balv-2	85,36	85,59	86,62	86,54	84,78	85,99
balv-3	87,45	86,05	88,10	86,92	85,95	86,28
balv-4	87,56	85,95	86,97	86,66	86,51	86,80
balv-5	88,07	86,78	86,65	84,66	86,63	87,32
balv-6	87,88	86,76	86,78	81,71	87,30	86,78
balv-7	87,67	87,57	86,43	86,30	87,36	87,37
balv-8	87,77	87,46	83,82	86,66	86,36	87,77
balv-9	80,18	77,12	80,58	80,21	79,73	76,96
Média balv	85,87	84,73	84,89	84,16	85,11	85,01
□□balv.	772,79	762,61	764,05	757,42	765,99	765,12
d1-inferior	130,37	134,78	131,12	130,32	126,35	125,04
d2-inferior	135,91	142,23	140,51	139,96	136,32	140,92
d3-inferior	139,89	142,59	141,31	142,30	138,14	143,80
d4-inferior	138,61	141,05	147,94	144,66	135,69	141,35
d5-inferior	144,43	143,99	141,36	141,91	135,80	144,90
d6-inferior	136,13	141,07	140,65	140,64	136,60	141,30
d7-inferior	134,71	129,76	138,93	137,38	132,61	138,94
d8-inferior	127,92	140,62	131,33	130,92	121,41	131,02
dmédio-inferior	136,00	139,51	139,14	138,51	132,87	138,41
d9-supeior	36,29	36,91	31,93	39,32	32,61	39,84
d10-supeior	34,81	38,39	35,04	35,04	33,86	37,32
d11-supeior	34,27	35,87	41,31	41,31	35,60	37,41

d12-supeiror	36,15	32,21	38,83	39,38	34,45	40,77
dmédio-superior	35,38	35,85	36,78	38,76	34,13	38,84
hpc1	62,51	53,12	68,40	65,91	65,86	67,50
hpc2	52,98	58,75	55,43	52,83	55,94	54,68
hpc3	53,66	63,12	62,18	59,17	56,14	55,04
hpc4	54,31	60,19	66,00	60,32	61,83	53,74
hpc5	55,90	61,65	57,08	58,67	61,49	53,50
hpc6	51,81	58,96	59,19	56,99	57,01	52,64
hpc7	50,33	57,17	55,54	58,06	55,05	54,74
hpc8	52,30	60,25	61,23	50,22	59,78	57,44
hpc9	53,76	59,81	54,67	58,42	63,01	59,72
hpc10	55,22	56,62	57,13	53,28	61,69	53,48
hpc11	58,94	64,41	55,67	55,40	61,53	55,42
hpc12	54,35	66,15	47,69	47,99	57,21	52,93
Média hpc	54,67	60,02	58,35	56,44	59,71	55,90
hlaje 1	167,97	164,23	167,91	168,55	166,92	167,59
hlaje 2	167,86	166,00	168,02	168,53	162,38	167,53
hlaje 3	169,00	170,45	168,82	169,43	163,45	167,44
Média hlaje	168,28	166,89	168,25	168,84	164,25	167,52
hcapa1	-	85,00	96,50	100,50	46,04	55,03
hcapa2	-	90,00	91,50	95,00	44,91	56,96
hcapa3	-	96,00	90,00	91,00	43,61	61,05
Média hcapa	-	90,33	92,67	95,50	44,85	57,68
Largura Superior	119,90	119,70	119,01	119,60	120,30	120,00
Largura Inferior	122,10	123,10	122,10	120,60	121,70	123,80
Comp. Lateral 1	400,00	400,00	399,30	399,60	399,40	399,30
Comp. Lateral 2	400,70	400,20	399,90	399,70	399,30	399,70
Média Laterais	399,55	400,10	399,60	399,65	399,35	399,50

Legenda

$b_{w, int}$	Medida da nervura interna da laje
$b_{w, ext}$	Medida da nervura externa da laje
b_{alv}	Largura do alvéolo
$d_{inferior}$	Distância entre o centroide da cordoalha inferior até a face superior da laje
$d_{superior}$	Distância entre o centroide da cordoalha superior até a face superior da laje
h_{pc}	Distância vertical entre a face inferior da laje até o ponto da nervura com menor largura
h_{laje}	Altura da laje alveolar
h_{capa}	Altura da capa

Tabela D.1 continuação 3 - Características geométricas das lajes ensaiadas na série II.

Dimensões (mm)	M2-5-5-50-S-A	M2-5-5-50-S-B	M2-9-5-81-N	M2-9-5-81-S	M2-5-5-81-S-A	M2-5-5-81-S-B
bw,int_1	40,09	42,90	39,97	41,44	49,15	39,57
bw,int_2	42,11	41,86	40,73	42,72	40,52	41,31
bw,int_3	36,12	36,82	38,66	36,65	38,93	33,84
bw,int_4	39,30	38,69	38,81	37,49	37,15	40,66
bw,int_5	35,92	36,54	38,17	35,70	32,92	33,83
bw,int_6	39,20	38,14	33,46	37,94	39,62	37,07
bw,int_7	41,92	43,37	39,56	41,78	33,00	40,69
bw,int_8	41,90	42,57	48,46	41,37	41,69	40,89
Média bw int	39,57	40,11	39,73	39,39	39,12	38,48
bw,ext_1	40,60	41,52	39,55	41,55	38,87	39,85
bw,ext_2	48,38	45,77	40,41	49,40	39,69	51,04
Média bw ext	44,49	43,65	39,98	45,48	39,28	45,45
Média bw	40,46	40,75	39,77	40,49	39,15	39,75
□ bw	445,11	448,29	437,51	445,43	430,66	437,23
balv-1	80,15	78,49	79,71	78,96	79,19	84,41
balv-2	87,28	84,76	87,21	83,55	87,67	87,37
balv-3	87,05	86,89	86,71	86,12	89,68	87,00
balv-4	87,84	85,80	87,65	85,79	88,39	86,04
balv-5	87,72	86,33	88,61	86,33	86,73	87,49
balv-6	87,87	86,83	87,40	87,16	88,08	87,62
balv-7	88,12	85,47	88,69	86,64	87,35	89,03
balv-8	87,36	85,42	85,81	86,97	87,42	87,05
balv-9	78,50	76,89	83,64	76,58	84,89	77,89
Média balv	85,77	84,10	86,16	84,23	86,60	85,99
□□ balv.	771,89	756,88	775,43	758,10	779,40	773,90
d1-inferior	131,30	126,47	134,64	129,04	122,30	112,75
d2-inferior	143,47	136,75	133,45	139,01	130,71	122,21
d3-inferior	146,74	138,63	136,82	139,04	135,98	132,93
d4-inferior	145,05	137,91	139,36	138,93	135,35	131,89
d5-inferior	147,45	140,37	137,24	140,52	138,97	137,92
d6-inferior	143,02	142,03	136,78	140,27	135,86	135,70
d7-inferior	143,93	132,18	133,35	141,09	122,06	129,36
d8-inferior	134,67	138,63	123,30	138,87	117,29	121,95
dmédio- inferior	141,95	136,62	134,37	138,35	129,82	128,09
d9-supeior	41,29	36,87	40,52	33,21	46,48	48,42
d10-supeior	41,35	33,14	44,89	32,88	44,27	53,43
d11-supeior	41,36	34,67	39,96	32,91	45,50	46,13
d12-supeior	43,68	37,62	36,98	32,79	39,70	51,85

dmédio-superior	41,92	35,58	40,59	32,95	43,99	49,96
hpc1	57,84	53,44	61,71	53,02	51,23	65,17
hpc2	60,30	62,54	63,43	67,78	59,39	61,94
hpc3	58,91	59,68	67,82	61,90	59,83	62,09
hpc4	64,02	67,53	55,01	67,53	61,61	59,76
hpc5	57,14	61,60	61,88	60,97	56,85	61,61
hpc6	59,84	56,45	57,73	58,70	59,66	65,20
hpc7	58,92	65,74	60,43	61,59	53,13	65,47
hpc8	56,23	68,08	61,29	59,81	58,13	65,85
hpc9	54,57	66,98	59,84	64,72	58,22	65,91
hpc10	60,42	69,19	58,39	63,79	56,65	61,58
hpc11	56,69	63,61	53,55	60,08	60,25	65,62
hpc12	63,00	69,13	61,68	59,97	65,10	66,02
Média hpc	58,99	63,66	60,23	61,66	58,34	63,85
hlaje 1	161,79	170,15	172,06	166,98	163,44	169,38
hlaje 2	170,47	166,04	173,22	165,46	164,92	169,54
hlaje 3	170,38	167,34	174,94	165,40	169,47	166,59
Média hlaje	167,55	167,84	173,41	165,95	165,94	168,50
hcapa1	51,42	49,43	85,00	95,00	56,45	67,21
hcapa2	59,07	54,41	100,00	95,00	48,99	53,42
hcapa3	61,77	56,50	100,50	92,00	54,95	51,25
Média hcapa	57,42	53,45	95,17	94,00	53,46	57,29
Largura Superior	120,10	119,80	120,00	119,40	119,40	120,00
Largura Inferior	121,20	120,46	122,00	121,60	122,10	122,30
Comp. Lateral 1	399,90	399,50	399,80	399,60	399,50	400,00
Comp. Lateral 2	400,30	399,60	399,70	399,50	399,60	400,00

Legenda

$b_{w, \text{int}}$	Medida da nervura interna da laje
$b_{w, \text{ext}}$	Medida da nervura externa da laje
b_{alv}	Largura do alvéolo
d_{inferior}	Distância entre o centroide da cordoalha inferior até a face superior da laje
d_{superior}	Distância entre o centroide da cordoalha superior até a face superior da laje
h_{pc}	Distância vertical entre a face inferior da laje até o ponto da nervura com menor largura
h_{laje}	Altura da laje alveolar
h_{capa}	Altura da capa
Largura Superior	Largura superior da seção transversal
Largura Inferior	Largura inferior da seção transversal

**APENDICE E – GRÁFICOS DE DESLOCAMENTO
VERTICAL DAS LAJES**

Figura E. 1 – Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes de referência)

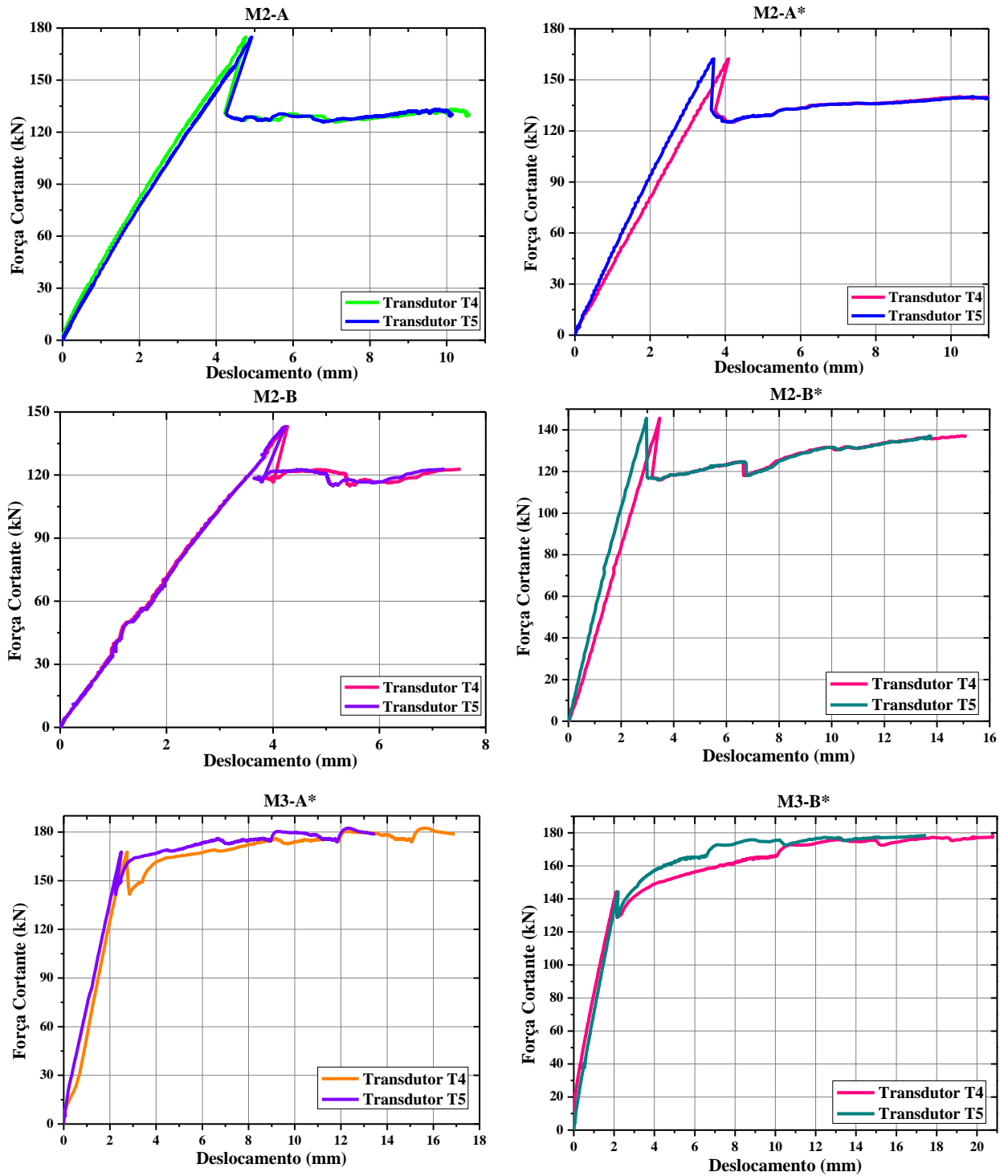


Figura E. 2 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa)

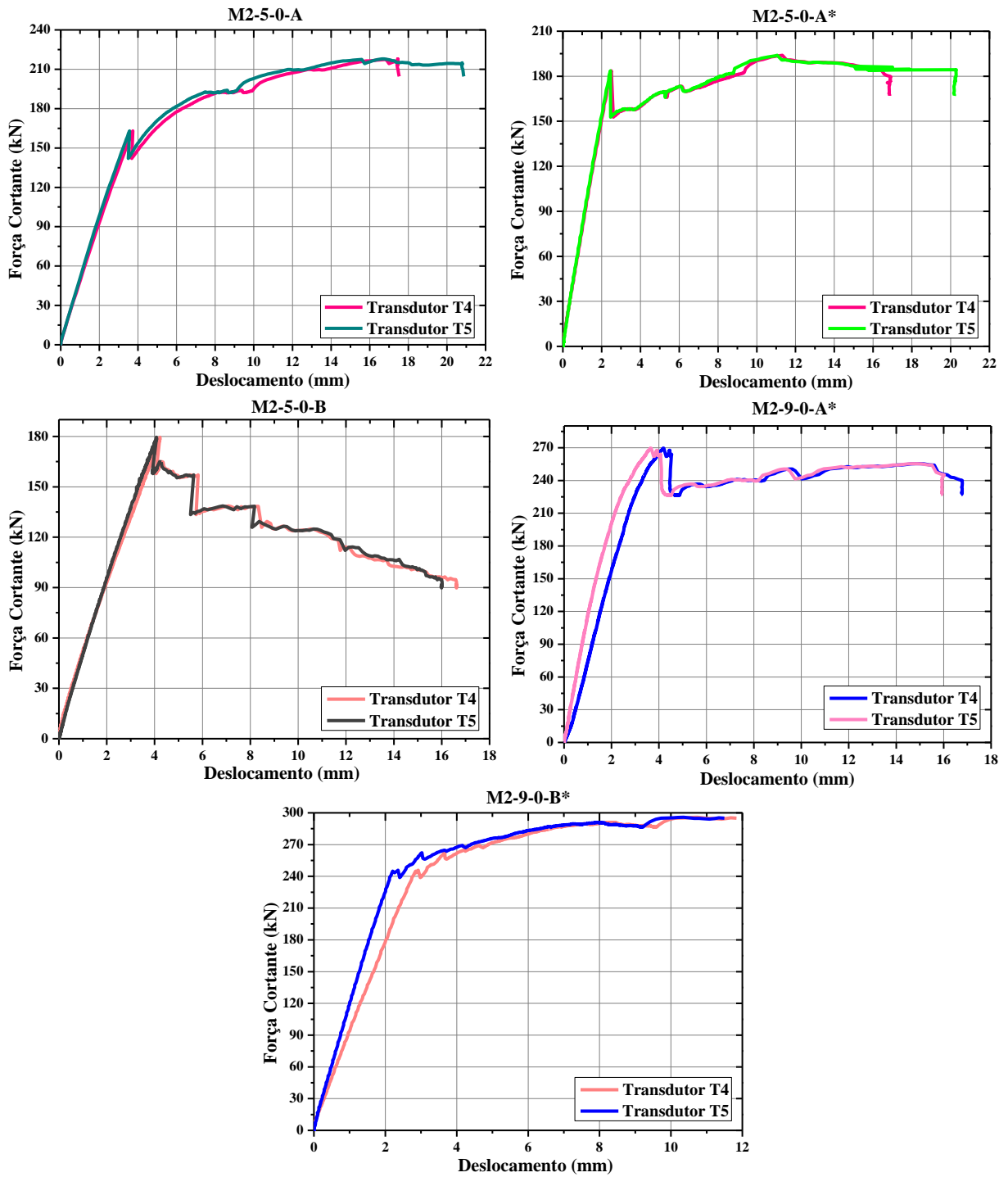


Figura E. 3 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com alvéolos preenchidos)

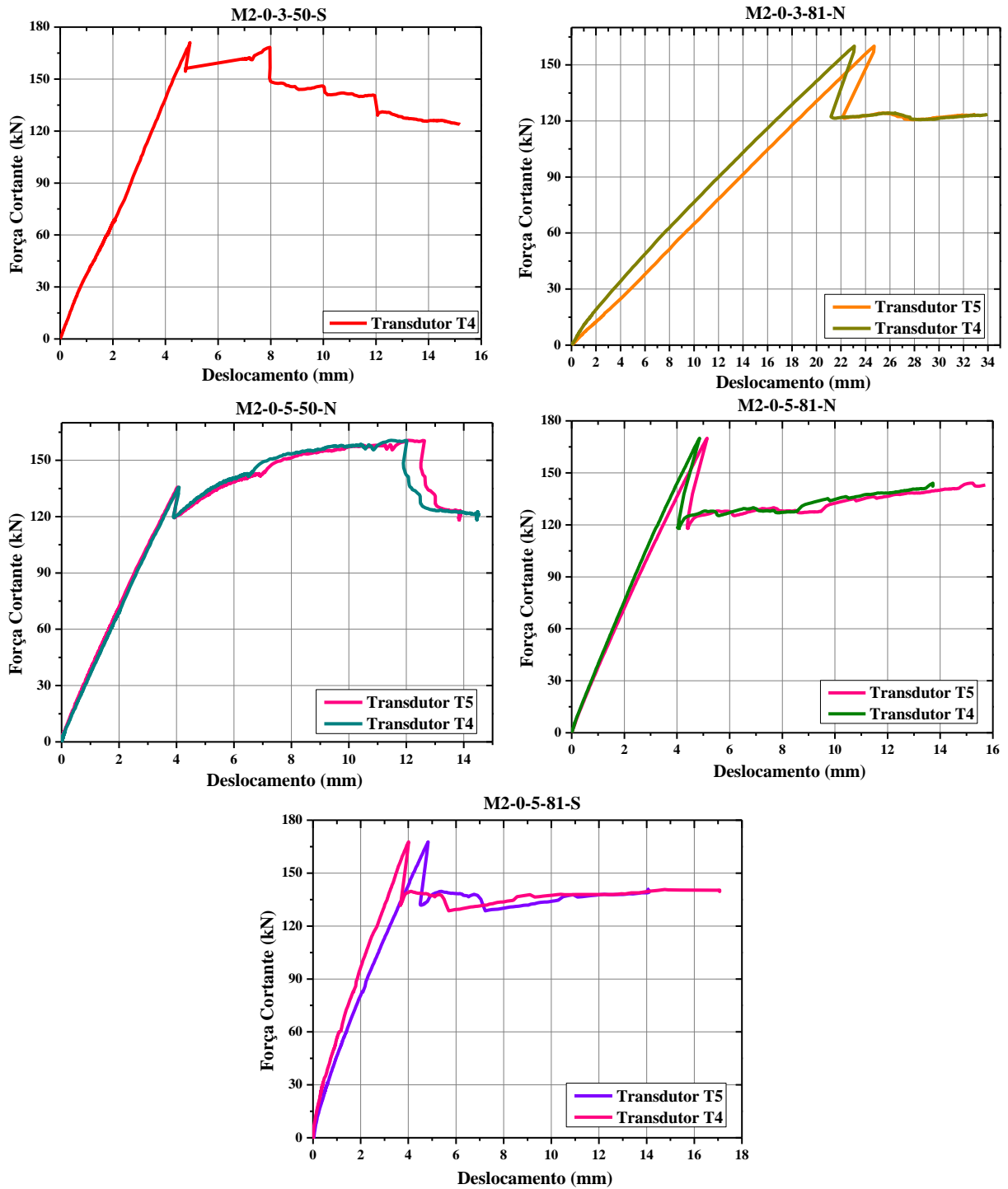


Figura E. 4 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa 5 cm e alvéolos preenchidos)

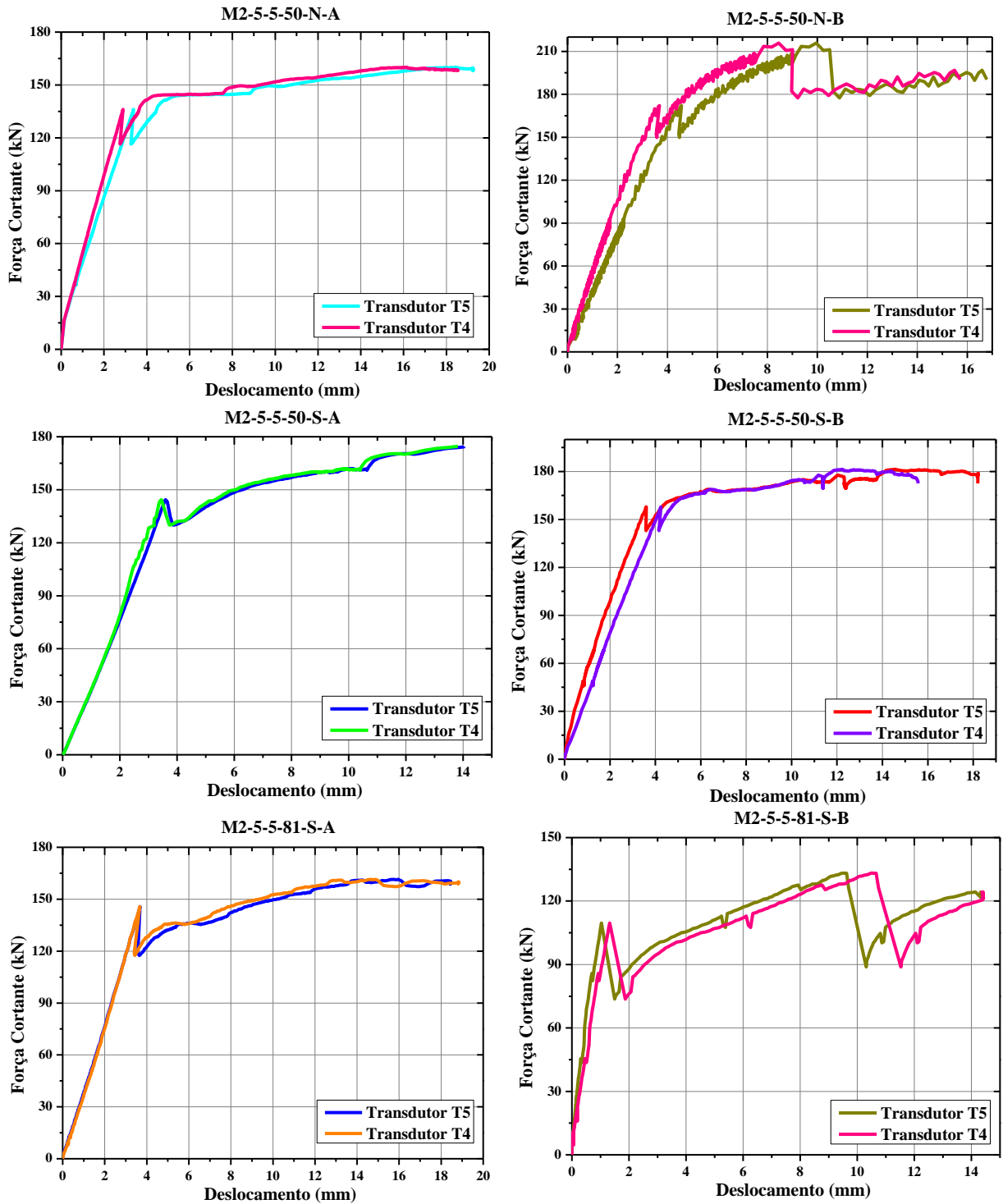


Figura E. 5 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa 9 cm e alvéolos preenchidos)

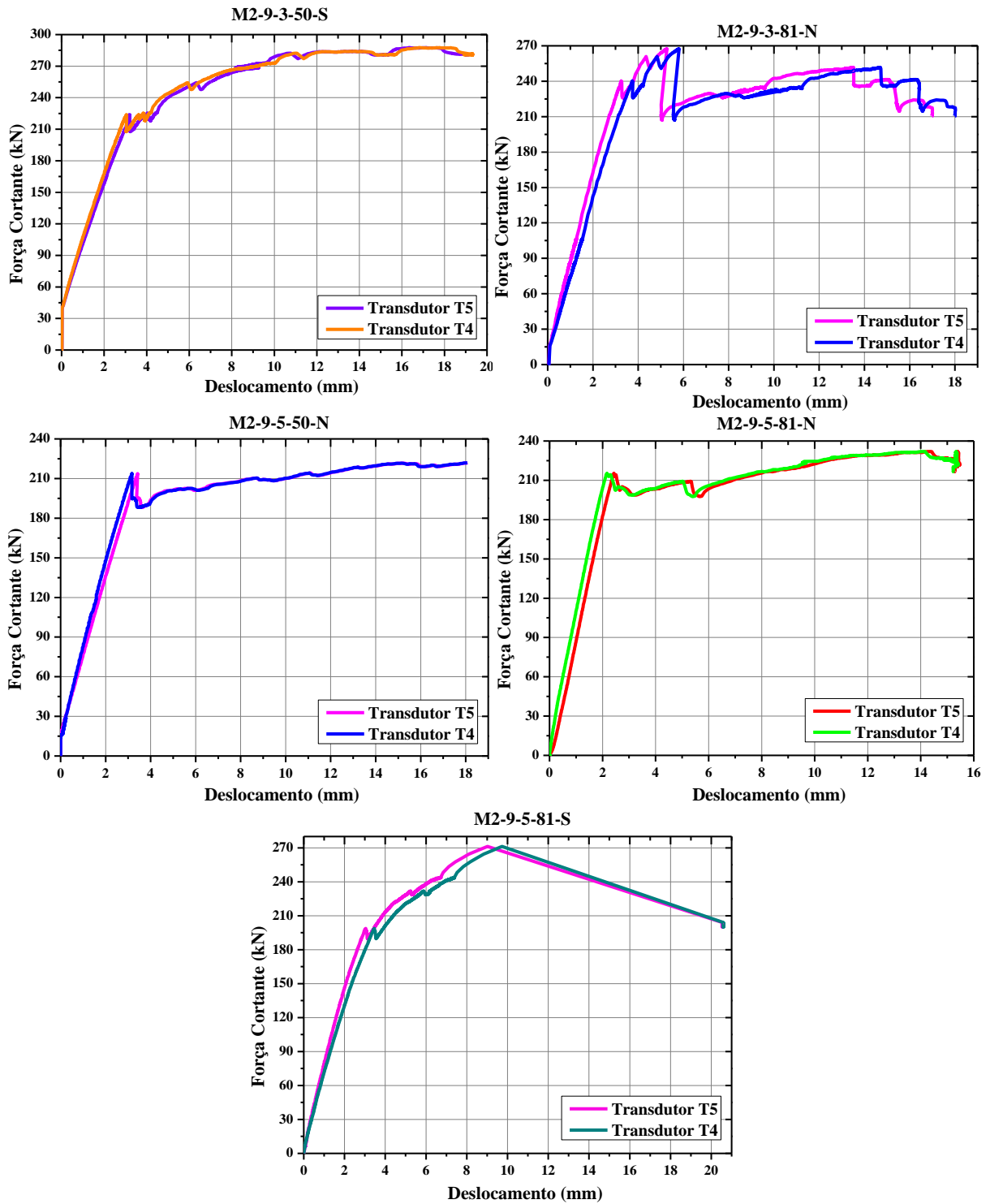


Figura E. 6 - Leituras obtidas no ponto de aplicação da força . (Lajes de referência)

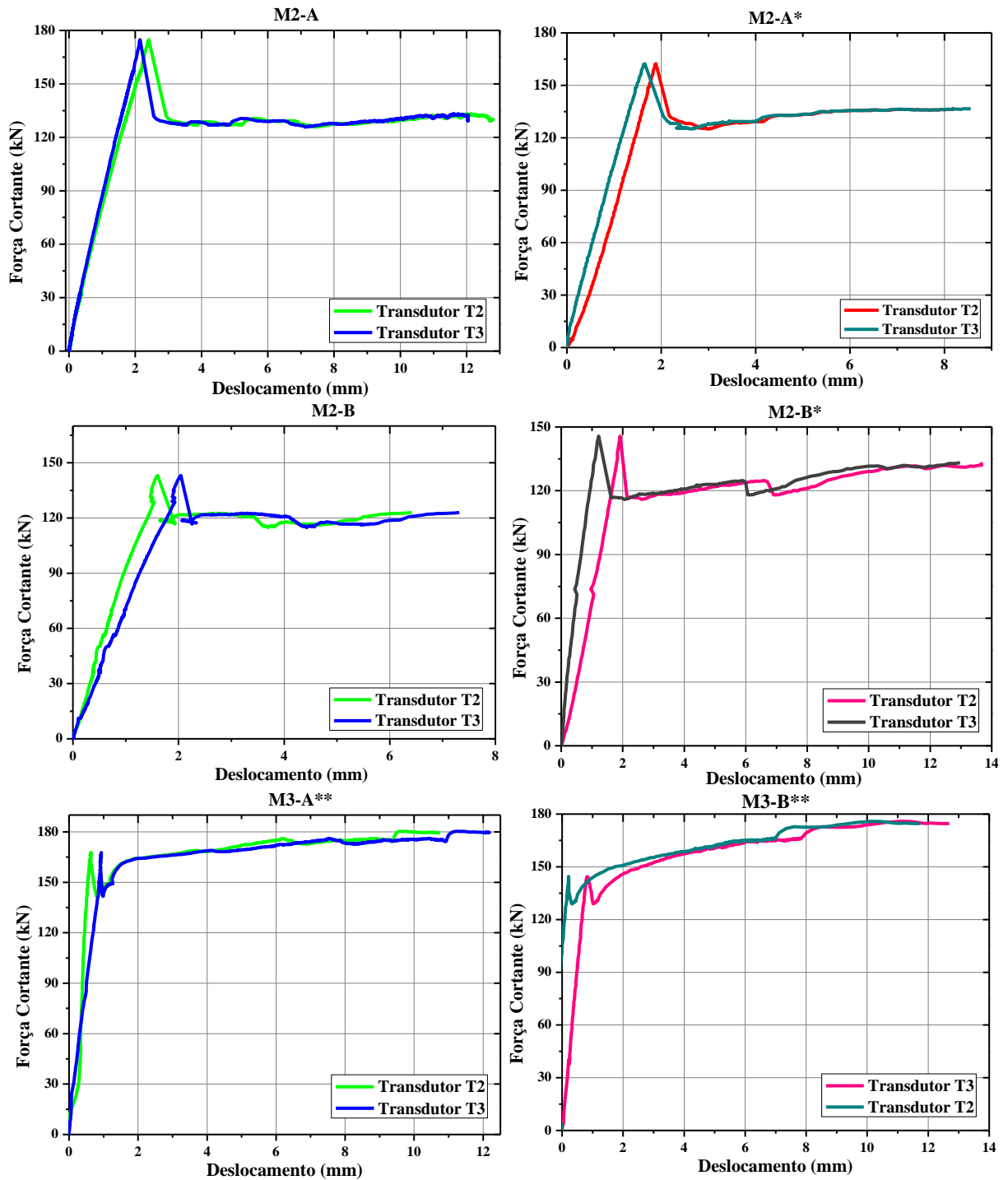


Figura E. 7 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa)

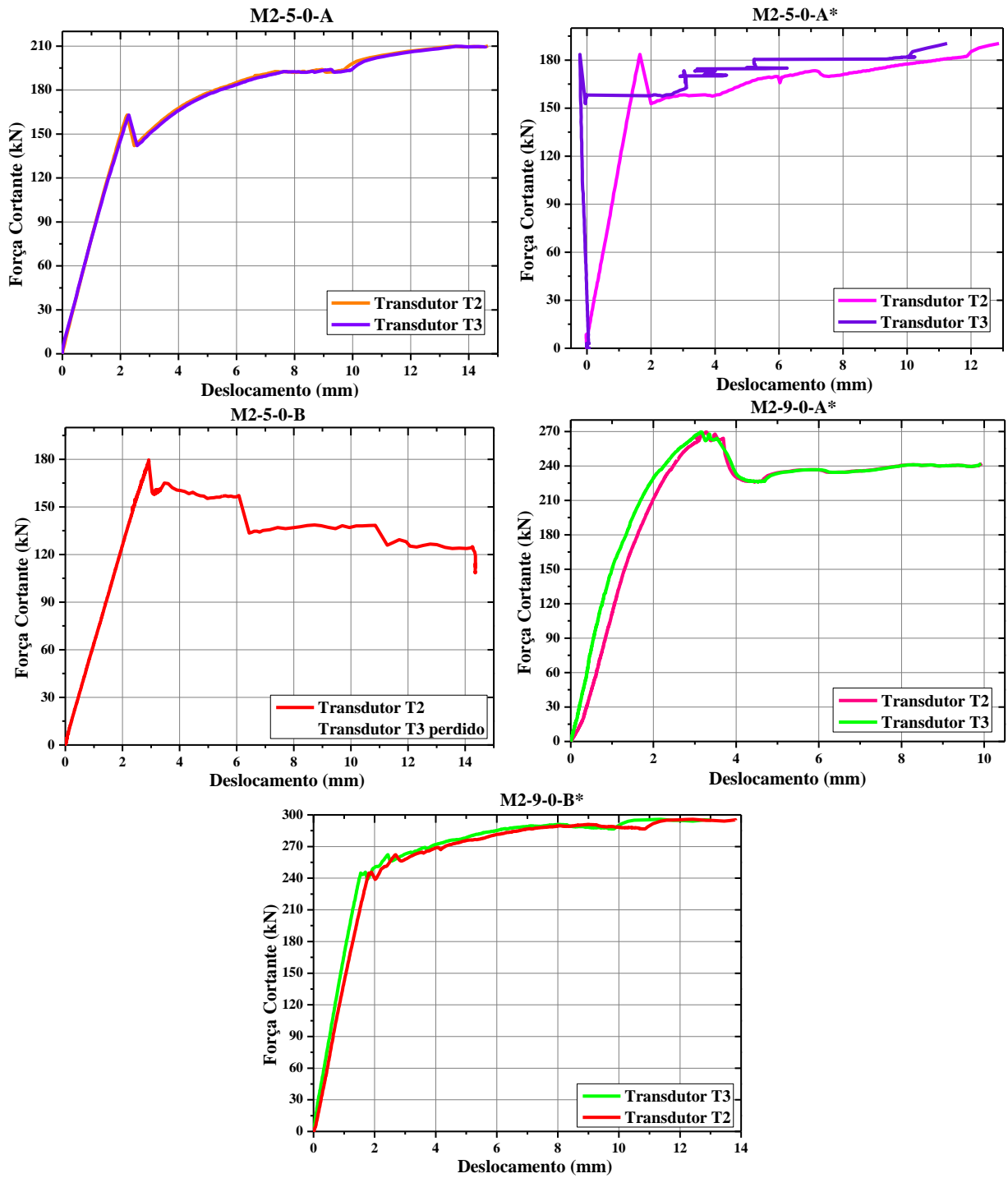


Figura E. 8 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com alvéolos preenchidos)

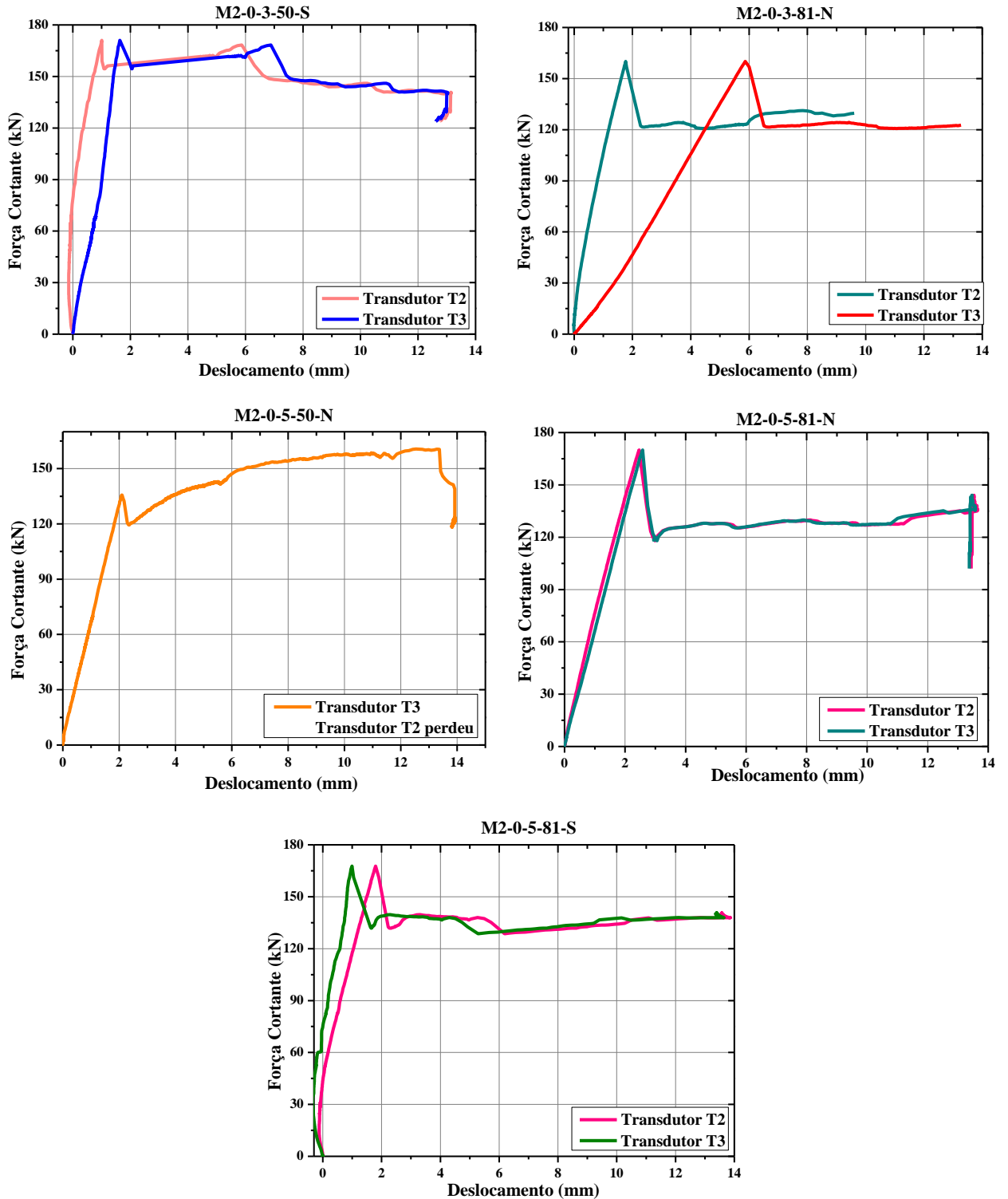


Figura E. 9 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa 5cm e alvéolos preenchidos)

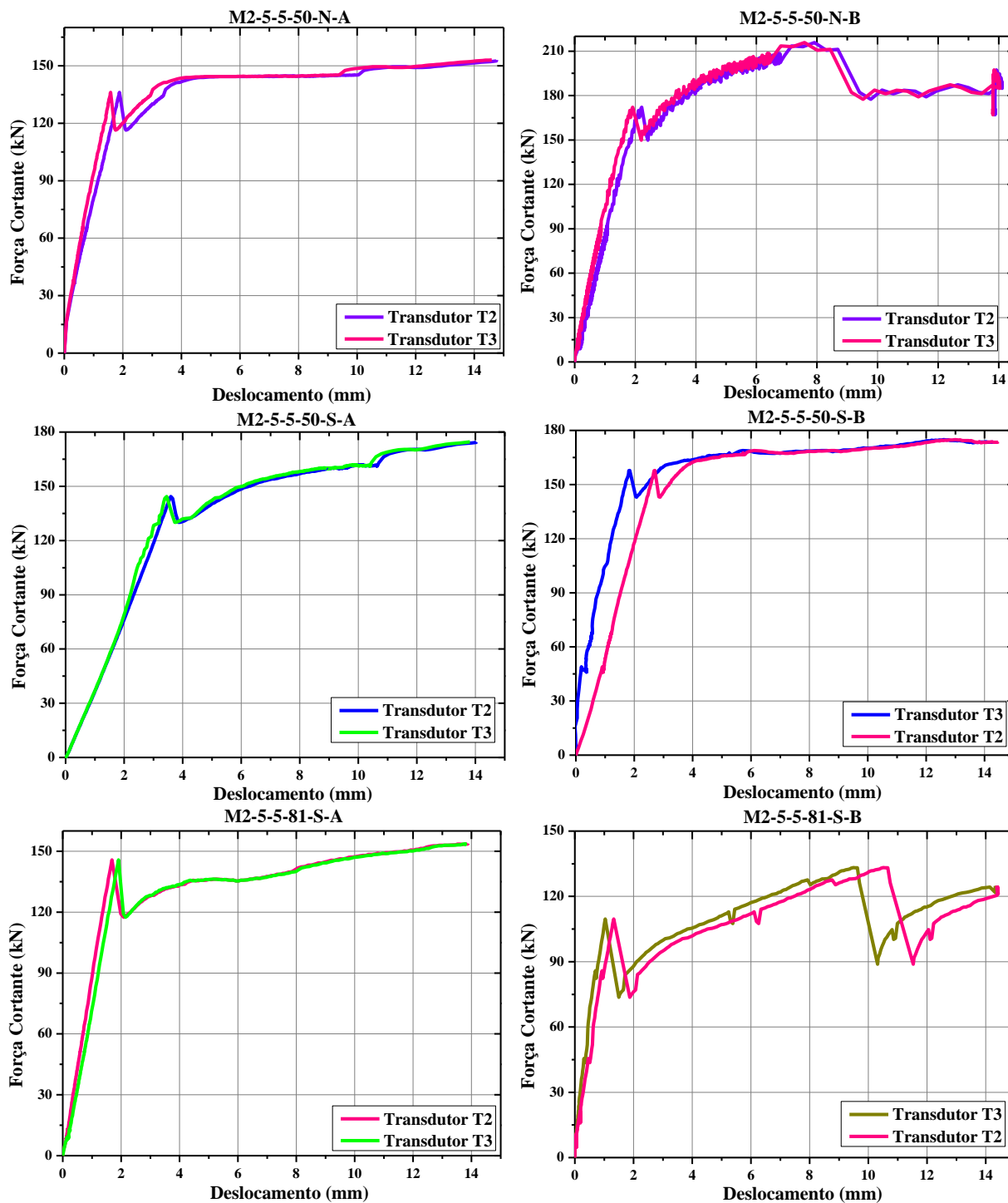
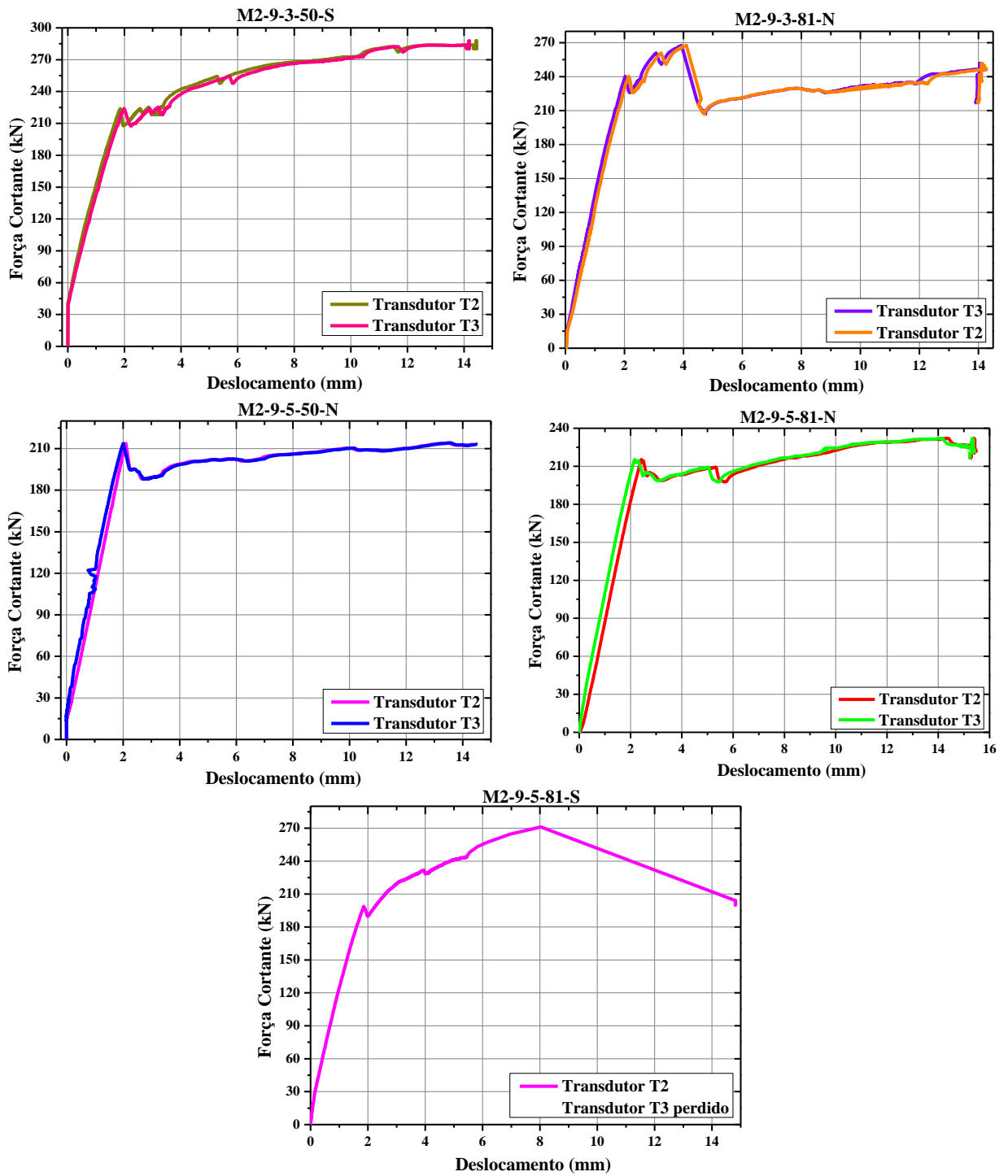


Figura E. 10 - Leituras obtidas no meio do vão da peça. (lajes com capa 9 cm e alvéolos preenchidos)



**APENDICE F –POSICIONAMENTO DOS
TRANSDUTORES**

