

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS MECANISMOS RESISTENTES À
FORÇA CORTANTE EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Matheus Lorena Gonçalves Marquesi

São Carlos

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS MECANISMOS RESISTENTES À
FORÇA CORTANTE EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Matheus Lorena Gonçalves Marquesi

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M357ce

Marquesi, Matheus Lorena Gonçalves.

Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas / Matheus Lorena Gonçalves Marquesi. -- São Carlos : UFSCar, 2014. 144 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Construção civil. 2. Lajes alveolares. 3. Flexo-cortante. 4. Tração diagonal. 5. Comprimento de transferência da protensão. I. Título.

CDD: 690 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
Rod. Washington Luís, Km 235
13565-905 – São Carlos – SP
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262
e-mail: ppgeciv@ufscar.br site: www.ppgeciv.ufscar.br

MATHEUS LORENA GONÇALVES MARQUESI

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em vinte e cinco de fevereiro de 2014.

Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Orientador

Prof. Tit. Fernando Rebouças Stucchi
Escola Politécnica/POLI-USP
Examinador externo

Prof. Assoc. Roberto Chust Carvalho
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Examinador interno

EPÍGRAFE

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus não sou o que era antes.”

Martin Luther King Jr.

AGRADECIMENTOS

a Deus, Senhor do universo, absoluto, invisível mas real, que me possibilitou finalizar
mais esta etapa com toda sorte de alegrias e dificuldades

a toda gente que direta ou indiretamente contribuiu para este trabalho, em especial aos
meus familiares e amigos, ao meu orientador e amigo Professor Marcelo A. Ferreira,
pelo apoio durante a realização deste trabalho, aos Professores Roberto Chust Carvalho
e Fernando Rebouças Stucchi pelo exemplo de dedicação ao ensino de engenharia e
contribuições nas bancas de qualificação e defesa.

“E aprendi que se depende sempre
De tanta, muita, diferente gente
Toda pessoa sempre é as marcas
das lições diárias de outras tantas pessoas.

É tão bonito quando a gente entende
Que a gente é tanta gente
Onde quer que a gente vá.

É tão bonito quando a gente sente
Que nunca está sozinho
Por mais que pense estar...”

Gonzaguinha

MARQUESI, M. L. G. **Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

Os mecanismos condicionantes à ruptura por força cortante em lajes alveolares são estudados: flexo-cortante e tração diagonal. Apresenta-se a revisão bibliográfica com ênfase nas recomendações dos principais códigos normativos acerca da resistência à força cortante em elementos sem armadura transversal. Quanto à flexo-cortante, considerações são feitas sobre a resistência à tração de concretos de alta resistência pela análise de 39 experimentos coletados na literatura e apresentados neste trabalho. Além disso, propõe-se a consideração da influência variável da protensão na resistência a força cortante. No tocante a tração diagonal, propõe-se o coeficiente β , que busca melhorar os modelos de cálculo tradicionais considerando de forma indireta a influência dos esforços cisalhantes devido à introdução da protensão na laje alveolar. São analisados 49 experimentos internacionais para a validação deste coeficiente e conclui-se que os modelos de cálculo modificados por este coeficiente apresentam melhoras significativas. Desenvolveu-se ainda um programa experimental em que foram ensaiadas 15 lajes alveolares variando a distância entre a extremidade da laje e seu apoio mais próximo. Todas as rupturas foram pelo mecanismo de tração diagonal. O comprimento de transferência de protensão estabelecido pela NBR14861 foi considerado adequado para as lajes ensaiadas pela correlação com os resultados dos ensaios de ruptura por força cortante.

Palavras-chave: Flexo-Cortante, Tração Diagonal, Comprimento de Transferência da Protensão, Lajes Alveolares Protendidas

ABSTRACT

MARQUESI, M. L. G. **Contribution to the study on shear strength mechanisms in prestressed hollow core slabs.** 2014. 144 f. Dissertation (Master in Structural and Construction Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2014.

In this work flexure shear and tension shear are studied. It is presented a literature review with emphasis on the major normative recommendations about the shear strength in elements without shear reinforcement. Concerning flexure shear capacity considerations are made about the tensile strength of high strength concrete by analysis of 39 experiments. This samples were collected in the literature and are presented herein. Furthermore, it is proposed to consider the variable influence of prestressing on the shear strength. With respect to tension shear, it is proposed the coefficient β , which seeks to improve the traditional models considering indirectly the influence of shear stresses in transmission length. 49 international experiments are analyzed to validate this coefficient and it is concluded that the modified models show significant improvements. Yet developed an experimental program were tested 15 hollow core slabs varying the distance between the edge of the slab and its nearest support. All failures were by tension shear. The transmission length established by NBR14861 was considered adequate for the tested slabs by correlation with tension shear test results.

Keywords: Flexure Shear, Tension Shear, Transmission Length, Prestressed Hollow Core Slabs

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.4 COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 FUNDAMENTOS SOBRE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE	16
2.2 ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS	19
3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	22
3.1 NBR 14861: 2011	22
3.2 EUROCODE 2	23
3.3 EN1168: 2008	25
3.4 ACI 318-11	27
3.5 EXEMPLO DE CÁLCULO	30
4. FLEXO-CORTANTE	32
4.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A FLEXO-CORTANTE	32
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO NA FLEXO-CORTANTE	34
4.3 INFLUÊNCIA DO ESFORÇO AXIAL NA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE	39
4.3.1 ORIGEM DA PARCELA $0,15 \frac{c_p b d}{s}$	39
4.3.2 MODELO SIMPLIFICADO COM RESISTÊNCIA VARIÁVEL (MSRV)	45
4.3.3 MODELO GENERALIZADO	46
4.3.4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS PARA CÁLCULO DE V_p EM LAJES ALVEOLARES	47
5. TRAÇÃO DIAGONAL	54
5.1 MODELO TRADICIONAL PARA TRAÇÃO DIAGONAL	54
5.2 MODELO DE YANG	57
5.3 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL	61
5.4 PROPOSTA DE MELHORIA PARA O CÁLCULO DA TRAÇÃO DIAGONAL	63
5.5 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	64
6. PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
6.1 METODOLOGIA DE ENSAIO	75
6.2 INSTRUMENTAÇÃO	78
6.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS	80
6.3.1 Lajes A	80
6.3.2 Lajes B	82
6.4 ESQUEMAS DOS ENSAIOS	84
7. RESULTADOS E ANÁLISES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	86

7.1 LAJES A	86
7.1.1 RESULTADOS.....	86
7.1.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
7.2 LAJES B	97
7.2.1 RESULTADOS.....	97
7.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
7.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	107
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
8.1 CONCLUSÕES.....	110
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	115
APÊNDICE A	117
APÊNDICE B.....	122
APÊNDICE C	123
APÊNDICE D.....	129
APÊNDICE E	135
APÊNDICE F.....	138
APÊNDICE G.....	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: TENSÕES NUMA VIGA NÃO FISSURADA	17
FIGURA 2.2: TENSÕES PRINCIPAIS EM DOIS PONTOS	17
FIGURA 2.3: FLUXO IDEALIZADO DAS TENSÕES EM ELEMENTOS SEM ARMADURA TRANSVERSAL	18
FIGURA 2.4: FISSURA CRÍTICA DE FLEXO-CORTANTE	18
FIGURA 2.5: RUPTURAS POR TRAÇÃO DIAGONAL EM LAJES ALVEOLARES	19
FIGURA 3.1: PONTOS A SEREM CONSIDERADOS NA BUSCA PELO PONTO CRÍTICO	26
FIGURA 3.2: CURVAS DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE E SOLICITAÇÃO	31
FIGURA 4.1: IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES NA EQUAÇÃO BRASILEIRA PARA FLEXO-CORTANTE	32
FIGURA 4.2: MECANISMOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA DE FORÇA CORTANTE	33
FIGURA 4.3: DISTRIBUIÇÃO POR AUTORES DOS 39 EXPERIMENTOS COLETADOS	35
FIGURA 4.4: COMPARAÇÃO DE F_{CTM} ENTRE EC2 E NBR6118: 2014	37
FIGURA 4.5: GRÁFICOS COMPARATIVOS ENTRE TENSÕES EXPERIMENTAL E CALCULADA	37
FIGURA 4.6: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE TENSÕES EXPERIMENTAL E CALCULADA	38
FIGURA 4.7: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE TENSÕES EXPERIMENTAL E CALCULADA ($\sigma < 2\%$)	38
FIGURA 4.8: A) EFEITO DA PROTENSÃO; B) ESQUEMA DE ENSAIOS TÍPICOS DE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE	40
FIGURA 4.9: ENVOLTÓRIA RESISTENTE SUGERIDA POR KANI	43
FIGURA 4.10: ÁREA HACHURADA CORRESPONDENTE A bd E COMPARAÇÃO COM A_c PARA UMA NERVURA	44
FIGURA 4.11: EXPERIMENTO <i>VTT P50-16</i> [MM]	47
FIGURA 4.12: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE TENSÕES EXPERIMENTAL E CALCULADA	51
FIGURA 4.13: GRÁFICO COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS PELOS TRÊS MODELOS E A TRAÇÃO DIAGONAL	52
FIGURA 5.1: POSIÇÃO DO PONTO CRÍTICO PELO MODELO TRADICIONAL DE CÁLCULO DA TRAÇÃO DIAGONAL	55
FIGURA 5.2: ILUSTRAÇÃO DO QUE OCORRERIA SEM AS TENSÕES CISALHANTES NA TRANSFERÊNCIA DA PROTENSÃO	56
FIGURA 5.3: POSIÇÃO DO PONTO CRÍTICO EM LAJES COM ALVÉOLOS OBLONGOS	56
FIGURA 5.4: DIAGRAMA DE TENSÕES NO ELEMENTO "A"	57
FIGURA 5.5: LOCALIZAÇÃO DO PONTO CRÍTICO	60
FIGURA 5.6: COMPARAÇÃO ENTRE EC2 E YANG	62
FIGURA 5.7: DEFINIÇÃO DA ALTURA DO PONTO CRÍTICO H_{pc}	64
FIGURA 5.8: TRAÇÃO DIAGONAL EC2 TRADICIONAL	66
FIGURA 5.9: TRAÇÃO DIAGONAL PROPOSTA EC2	66
FIGURA 5.10: TRAÇÃO DIAGONAL ACI 318: 2011	68
FIGURA 5.11: TRAÇÃO DIAGONAL PROPOSTA ACI	68
FIGURA 5.12: TRAÇÃO DIAGONAL EN1168:2008 ALTERNATIVA	69
FIGURA 5.13: NBR14861 (FLEXO-CORTANTE)	73
FIGURA 5.14: PROPOSTA TRAÇÃO DIAGONAL NBR14861	73
FIGURA 6.1: MEDIÇÃO REALIZADA COM PAQUÍMETRO NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA LAJE	76
FIGURA 6.2: PREPARAÇÃO DO APOIO PARA A LAJES	76

FIGURA 6.3: APOIOS PARA OS ENSAIOS DAS LAJES ALVEOLARES.....	77
FIGURA 6.4: REGULARIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA LAJES NA REGIÃO DE CONTATO COM A VIGA DE TRANSMISSÃO	77
FIGURA 6.5: VIGAS DE TRANSMISSÃO, RÓTULAS E CHAPAS METÁLICAS POSICIONADAS.....	78
FIGURA 6.6: TRANSDUTOR (LVDT) PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS.....	78
FIGURA 6.7: ESQUEMA GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS DE FORÇA CORTANTE.....	79
FIGURA 6.8: SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	79
FIGURA 6.9: SEÇÃO TRANSVERSAL NOMINAL DAS LAJES A	80
FIGURA 6.10: SEÇÃO TRANSVERSAL LA06-C-A	81
FIGURA 6.11: SEÇÃO TRANSVERSAL NOMINAL DAS LAJES B	82
FIGURA 6.12: SEÇÃO TRANSVERSAL LA03-C-B.....	83
FIGURA 6.13: SEÇÃO TRANSVERSAL CONSTRUÍDA CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DAS GRANDEZAS MEDIDAS	83
FIGURA 6.14: ESQUEMA GERAL DOS ENSAIOS	84
FIGURA 6.15: ESQUEMA DO ENSAIO LA-01-C-B	84
FIGURA 7.1: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA02, LA03 E LA04	86
FIGURA 7.2: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA05 E LA06	87
FIGURA 7.3: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA07, LA08 E LA09.....	88
FIGURA 7.4: LAJE LA04 E SUA RUPTURA.....	88
FIGURA 7.5: LAJE LA06 E SUA RUPTURA.....	89
FIGURA 7.6: LAJE LA09 E SUA RUPTURA.....	89
FIGURA 7.7: RELAÇÃO ENTRE $V_{EXP.}$ E A POSIÇÃO DA SEÇÃO ANALISADA	92
FIGURA 7.8: RELAÇÃO ENTRE $V_{EXP.}$ E $LPT(\phi)$	93
FIGURA 7.9: COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE OS MODELOS ANALISADOS.....	95
FIGURA 7.10: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA02-A E LA02-B.....	97
FIGURA 7.11: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA03-A E LA03-B.....	97
FIGURA 7.12: FORÇA CORTANTE VS. DESLOCAMENTO: LA04, LA05 E LA06	98
FIGURA 7.13: LAJE LA03-C-B-A E SUA RUPTURA.....	99
FIGURA 7.14: LAJE LA03-C-B-B E SUA RUPTURA	99
FIGURA 7.15: LAJE LA06-C-B E SUA RUPTURA	99
FIGURA 7.16: LAJE LA01-C-B: PROBLEMAS NA AQUISIÇÃO DE DADOS	101
FIGURA 7.17: RELAÇÃO ENTRE $V_{EXP.}$ E A POSIÇÃO DA SEÇÃO ANALISADA	102
FIGURA 7.18: RELAÇÃO ENTRE $V_{EXP.}$ E A POSIÇÃO DA SEÇÃO ANALISADA	103
FIGURA 7.19: COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE OS MODELOS ANALISADOS.....	105
FIGURA 7.20: RELAÇÃO ENTRE $V_{EXP.}$ E POSIÇÃO DA SEÇÃO ANALISADA.....	107
FIGURA 7.21: PORCENTAGEM DE VARIAÇÃO DA CORTANTE VARIANDO O COMPRIMENTO DE APOIO	107
FIGURA 7.22: ESCORREGAMENTO DE CORDOALHAS LAJES A E LAJES B	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS COLETADOS.....	35
TABELA 4.2: CARACTERÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS COLETADOS.....	49
TABELA 4.3: MODELO SIMPLIFICADO PARA CONSIDERAÇÃO DE V_p	50
TABELA 4.4: MODELO SIMPLIFICADO COM RESISTÊNCIA VARIÁVEL (MSRV) PARA CONSIDERAÇÃO DE V_p	50
TABELA 4.5: MODELO GENERALIZADO PARA CONSIDERAÇÃO DE V_p	51
TABELA 5.1: RESUMO DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICO DOS MODELOS ANALISADOS PARA V_{exp}/V_{calc}	70
TABELA 5.2: PARÂMETROS ESTATÍSTICO DAS PROPOSTAS PARA V_{exp}/V_{calc}	74
TABELA 6.1: NOMENCLATURAS E CARACTERÍSTICAS DAS LAJES A	80
TABELA 6.2: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES A	81
TABELA 6.3: NOMENCLATURAS E CARACTERÍSTICAS DAS LAJES B	82
TABELA 6.4: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES B.....	84
TABELA 6.5: CARACTERÍSTICAS DOS ESQUEMAS DOS ENSAIOS	85
TABELA 7.1: SEÇÃO CONTROLE PARA PROPOSTA E RESPECTIVAS PERDAS DE PROTENSÃO	90
TABELA 7.2: SEÇÕES CONTROLE E V_{exp}	91
TABELA 7.3: CÁLCULOS PELOS MODELOS ANALISADOS UTILIZANDO $F_{CT,INF}$	94
TABELA 7.4: CÁLCULOS FEITOS UTILIZANDO $F_{CT,M}$	94
TABELA 7.5: SEÇÃO CONTROLE PARA PROPOSTA E RESPECTIVAS PERDAS DE PROTENSÃO NAS CORDOALHAS INFERIORES.....	100
TABELA 7.6: SEÇÃO CONTROLE PARA PROPOSTA E RESPECTIVAS PERDAS DE PROTENSÃO NAS CORDOALHAS SUPERIORES.....	100
TABELA 7.7: SEÇÕES CONTROLE E V_{exp}	101
TABELA 7.8: CÁLCULOS PELOS MODELOS ANALISADOS UTILIZANDO $F_{CT,INF}$	104
TABELA 7.9: CÁLCULOS FEITOS UTILIZANDO $F_{CT,M}$	104

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Numa estrutura de concreto os pavimentos são os maiores responsáveis pelo consumo deste material. Agora mais do que nunca, o mundo demanda soluções de engenharia fundamentadas na sustentabilidade. Neste contexto, isso significa construir o que precisa ser construído com economia e suficiente segurança, de forma a garantir infraestrutura e qualidade de vida para o presente e para o futuro. Para cada situação, um sistema construtivo deve ser escolhido levando em consideração suas vantagens técnicas e ambientais, recursos humanos locais e materiais disponíveis.

No contexto da pré-fabricação em concreto, as lajes ou painéis alveolares protendidos tem ganhado cada vez mais importância e competitividade sendo utilizadas em diversas tipologias construtivas, não apenas em estruturas de concreto, mas também em sistemas mistos e híbridos. Os pavimentos em lajes alveolares conseguem minimizar o consumo de concreto e maximizar os vãos, convergindo para uma solução otimizada. Isso se dá pelo efeito benéfico da protensão associada a uma seção transversal estruturalmente eficiente. Além disso, a facilidade de fabricação e montagem proporciona uma vantagem significativa na economia de tempo em relação aos sistemas estruturais moldados *in loco*. Além de não demandar tempo de cura do concreto na obra, uma vez montado, o piso torna-se uma plataforma segura para os subempreiteiros iniciarem seus trabalhos.

Os vazios longitudinais denominados alvéolos reduzem o consumo de concreto, implicando em um peso próprio menor em relação a uma laje maciça com características estruturais semelhantes. Isso justifica a seção complexa da laje alveolar, produzida basicamente por duas maneiras: extrusão ou formas deslizantes. As armaduras utilizadas são cordoalhas, e até mesmo fios de aço, protendidos longitudinalmente na borda inferior, podendo ser utilizados também na borda superior. Devido ao processo de fabricação, é dificultada e indesejável a utilização de armaduras transversais. Desta forma, uma das principais preocupações para com esse elemento estrutural é a sua capacidade resistente à força cortante.

As rupturas por força cortante são caracterizadas por pequenas flechas e pouca ductilidade. Em projeto, é comum buscar situações em que as resistências últimas sejam governadas pela flexão, já que este mecanismo possui alta capacidade de aviso ao se aproximar do seu estado limite. No entanto, existem algumas situações em que o cisalhamento devido à força cortante se faz condicionante, como por exemplo, situações com cargas concentradas elevadas ou vãos pequenos com altas cargas predominantemente distribuídas. Lajes em edifícios como armazéns industriais, obras portuárias, obras com cargas móveis significativas, dentre outras, precisam de atenção especial no cálculo da resistência à força cortante. Já em edifícios residenciais e escritórios, cargas uniformes são predominantes podendo não ser condicionante ao dimensionamento exceto em casos especiais, como uma parede divisória de alvenaria apoiada diretamente sobre a laje.

No Brasil, diferentemente da Europa e dos Estados Unidos (referenciais adotados para este trabalho), a capacidade resistente à força cortante em lajes alveolares é calculada por uma única formulação, no entanto, dois mecanismos de ruptura distintos tem se mostrado presentes em ensaios laboratoriais. A formulação utilizada na NBR14861 foi desenvolvida na Europa, de forma empírica, considerando as principais variáveis que influenciam a resistência à força cortante em vigas e faixas de lajes maciças retangulares, em regiões previamente fissuradas por flexão. No cenário internacional, além desta formulação, ou formulações análogas, existem outras que buscam representar potenciais rupturas por força cortante em regiões não fissuradas por flexão. Em elementos protendidos, este último caso é predominante nas proximidades dos apoios. Neste trabalho esses dois mecanismos de ruptura são chamados respectivamente de flexo-cortante e tração diagonal.

1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a utilização de lajes alveolares de até 26 cm de altura tem sido crescente e tem se mostrado competitiva em relação aos sistemas convencionais. As lajes são utilizadas em edificações comerciais, residenciais e industriais com a obrigatoriedade da utilização do capeamento (conforme NBR14861).

Considerando atendidos padrões mínimos de qualidade segundo a NBR14861, o cálculo das lajes alveolares à força cortante pode estar com segurança demasiada para algumas situações. Isso pode levar a medidas como preenchimento de alvéolos ou até aumento da altura da laje sem real necessidade. A previsão da resistência à força cortante, representada pela situação em que a tensão principal nas nervuras da laje alcança a máxima

tensão de tração do concreto (ruptura por tração diagonal) constitui uma lacuna no projeto das lajes brasileiras. Já no âmbito internacional, apesar de existir formulações para representar este mecanismo, elas têm se mostrado insatisfatórias para casos de lajes com alvéolos oblongos (alvéolos não circulares) (Pajari, 2004 e Ghosh, 2006).

Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de avançar no entendimento dos mecanismos de ruptura por força cortante, sendo o primeiro passo para uma possível otimização de sua verificação em lajes alveolares.

Este trabalho promove uma continuação dos estudos nas linhas de pesquisa em lajes alveolares do Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-fabricados de Concreto da Universidade Federal de São Carlos, NETPRE/UFSCar.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal e geral deste trabalho é analisar o comportamento e o desempenho mecânico de lajes alveolares protendidas quanto à resistência à força cortante. Como objetivos específicos, apresentam-se:

- Comparação de prescrições normativas relativas tanto à flexo-cortante quanto à tração diagonal em lajes alveolares protendidas;
- Contribuir com melhorias tanto para o cálculo da flexo-cortante no âmbito nacional, quanto para o cálculo da tração diagonal no âmbito internacional;
- Contrapor resultados experimentais com formulações nacionais e internacionais evidenciando a possibilidade da utilização do mecanismo de tração diagonal em lajes brasileiras;
- Avaliar o comprimento de transferência de protensão nas lajes alveolares de forma indireta por meio da capacidade resistente à força cortante em ensaios considerando a variação do comprimento do apoio;

1.4 COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho é composto por mais 7 capítulos, descritos a seguir.

No segundo capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica envolvendo os fundamentos do tema desenvolvido. Algumas pesquisas são apresentadas, no entanto, os

trabalhos considerados mais relevantes aos assuntos aqui abordados são apresentados ou detalhados ao longo do texto.

No capítulo 3, apresentam-se as recomendações sobre resistência à força cortante em elementos sem armadura transversal dos principais códigos normativos. Um exemplo de laje alveolar é mostrado ao final deste capítulo evidenciando as principais diferenças entre os modelos de cálculo.

No capítulo 4, o mecanismo da flexo-cortante é estudado. Quanto a variável resistência à tração do concreto, 39 dados de elementos armados (faixas de lajes e vigas pouco esbeltas) coletados na literatura e com resistência à compressão superior à 50 MPa são analisados buscando verificar a adequabilidade da formulação nacional. Vale lembrar que no período da elaboração deste trabalho, a norma brasileira de concreto estrutural, NBR6118, passou por alterações e dentre elas, e talvez a mais significativa, a alteração das classes de resistência do concreto aos quais essa norma é aplicável, passando do intervalo C10 - C50 para C20 - C90. Quanto à influência da protensão na resistência à força cortante, apresenta-se a origem do modelo adotado até então e algumas sugestões de melhorias.

No capítulo 5, apresenta-se o estado da arte do mecanismo da tração diagonal em lajes alveolares e propõe-se o coeficiente β para considerar, a influência dos esforços cisalhantes oriundos da introdução da protensão. Analisam-se 49 experimentos internacionais para a validação deste coeficiente. Propõe-se ainda uma formulação nacional para a tração diagonal com a ressalva da necessidade de mais estudos nesta área e da não uniformidade na qualidade do produto laje alveolar em todo o Brasil.

O capítulo 6 introduz o programa experimental desenvolvido nesta pesquisa com as características das lajes ensaiadas e os esquemas estruturais utilizados.

No capítulo 7, os resultados deste programa experimental são apresentados e analisados. Considerações são feitas sobre o comprimento de transferência da protensão e sua influência na resistência à força cortante no mecanismo tração diagonal além de comentários sobre a adequabilidade dos modelos ensaiados quanto a capacidade resistente prevista.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões deste trabalho. Em seguida, as referências bibliográficas são elencadas e sete apêndices são apresentados como suporte ao entendimento dos assuntos aqui analisados ou apresentando informações complementares.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS SOBRE RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE

Considerando uma viga retangular no regime elástico, pode-se idealizar a intensidade da tensão de cisalhamento devido à força cortante pela equação proposta por Jourawski no século 19 (Timoshenko, 1983) que segue:

$$\vartheta = \frac{V S}{I b} \quad (2.1)$$

em que,

V é a força cortante atuante na seção analisada;

S é o momento estático ou momento de primeira ordem;

I é o momento de inércia ou momento de segunda ordem;

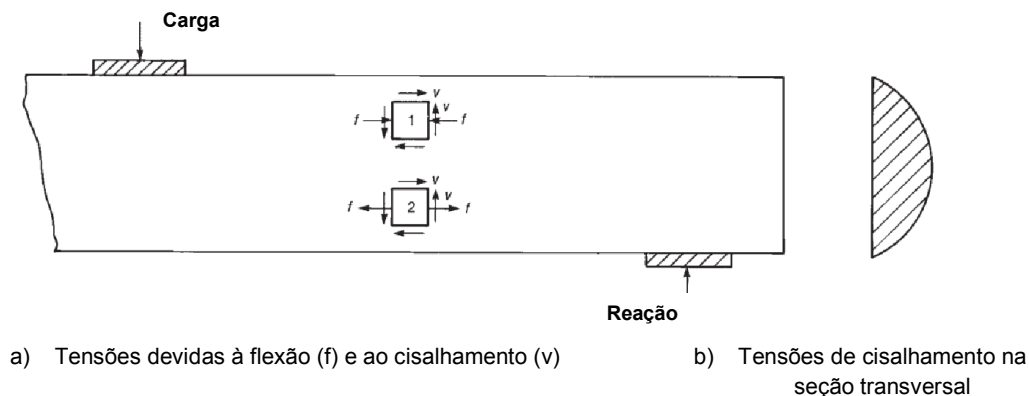
b largura do elemento na seção analisada;

Na Figura 2.1 parte b , mostra-se o diagrama das tensões de cisalhamento correspondente a esta formulação. Na parte a da figura, está a representação qualitativa do estado tensão em dois pontos. No ponto 1, as tensões oriundas da flexão, indicadas como f , são de compressão enquanto que no ponto 2, são de tração. Para as tensões de cisalhamento, pares de componentes v provocam tensões horizontais e verticais. As componentes horizontais são importantes para verificação das tensões nas interfaces de seções compostas como, por exemplo, na verificação da aderência entre a laje alveolar e sua capa estrutural, em seções no estádio I.

Na Figura 2.2 são apresentadas as tensões principais dos elementos 1 e 2. O valor dessas tensões e o plano em que atuam podem ser calculados utilizando-se do círculo de Mohr. As superfícies ou trajetórias em que as tensões principais atuam em uma viga no regime

elástico é mostrada na Figura 2.3. Estas trajetórias correspondem às orientações dos elementos 1 e 2.

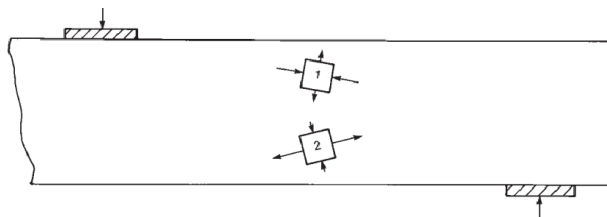
Figura 2.1: Tensões numa viga não fissurada



(Fonte: adaptado de McGregor, 2012)

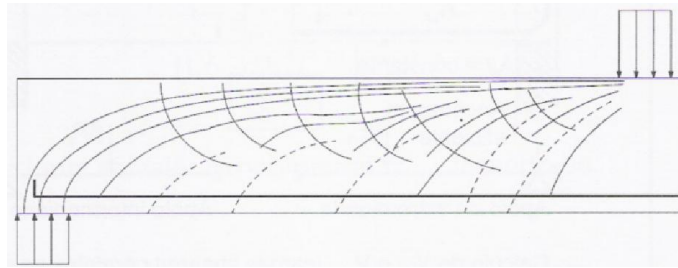
Para uma viga ou laje de concreto armado sem armadura transversal, as fissuras inclinadas que ocorrem a partir de fissuras de flexão configuram um padrão de fissuração semelhante ao das trajetórias das tensões principais, como pode ser visto na Figura 2.3. No entanto, como menciona MacGregor (2012), apesar de haver semelhança entre as trajetórias das tensões principais e as fissuras típicas inclinadas, esta relação não é plenamente estabelecida.

Figura 2.2: Tensões principais em dois pontos



(Fonte: adaptado de McGregor, 2012)

Figura 2.3: Fluxo idealizado das tensões em elementos sem armadura transversal



(Fonte: Fusco, 2008)

Figura 2.4: Fissura crítica de flexo-cortante



(Fonte: Sherwood et al, 2006)

A Figura 2.4 ilustra a ruptura de uma laje espessa sem armadura transversal. Neste caso, dois tipos de fissuras podem ser visualizados. As fissuras verticais, ocasionadas pela flexão, ocorrem primeiramente. A partir delas, as fissuras inclinam devido à interação com o esforço cortante. A esse mecanismo dá-se o nome de flexo-cortante.

Nos elementos de concreto armado, é muito comum que as fissuras de flexão apareçam antes que a tensão máxima de tração seja atingida na sua alma ou nervura. Desta forma, após a fissuração por flexão, novos equilíbrios são estabelecidos e mecanismos complementares importantes, como o efeito pino da armadura longitudinal e o engrenamento dos agregados se fazem presentes, contribuindo com a capacidade resistente.

Já nos elementos protendidos, a fissuração é retardada de forma a possibilitar que outro mecanismo seja condicionante, como exemplo, a tração diagonal em lajes alveolares.

Figura 2.5: Rupturas por tração diagonal em lajes alveolares



(Fonte: Próprio autor)

2.2 ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS

Walraven (1983) apresenta um estudo importante sobre a capacidade resistente de lajes alveolares. Neste estudo, além da resistência à força cortante, o autor aborda a capacidade à flexão e o mecanismo por perda de ancoragem. Quanto à resistência à força cortante, os dois mecanismos são estudados: flexo-cortante (*flexure shear* ou *shear compression*) e tração diagonal (*tension shear* ou *web shear*).

Quanto à tração diagonal, Walraven sugere um coeficiente redutor de 0,75 na formulação utilizada (idêntica à do *Eurocode 2* atual) com f_{ct} (e não $f_{ct,inf} = 0,7f_{ct}$) devido a resultados contra segurança, principalmente em lajes com alvéolos não circulares. A explicação para esse fenômeno foi sugerida pelo fato de lajes com alvéolos oblongos apresentarem maiores regiões numa mesma nervura com largura mínima. Dessa forma a probabilidade de ruptura é maior que nas lajes com alvéolos circulares, onde a largura da nervura é mínima em apenas um ponto.

Yang (1994) propôs em seu trabalho um importante estudo sobre o mecanismo de ruptura por tração diagonal. O método proposto por este pesquisador busca quantificar a tensão de cisalhamento provocada pela introdução da protensão. A metodologia utilizada para

a validação do método foi modelagem numérica de lajes alveolares comparando os resultados numéricos com os experimentais. Frente às considerações adotadas, Yang concluiu que a sua abordagem se mostra adequada. No entanto, Pajari (2005) ao analisar um banco de dados comparando o EC2 tradicional com o método de Yang concluiu que apesar uma melhora significativa em relação ao EC2, o modelo de Yang ainda é deficiente pelo menos para os dados analisados.

Girhammar e Pajari (2008) apresentam um estudo em lajes alveolares com capeamento. O objetivo foi avaliar a possibilidade de redução da altura da seção da laje e em contra partida aumentar a espessura da capa. Obviamente, essa opção só é possível quando a aderência entre capa e laje é adequada e confiavelmente quantificada. Para os modelos ensaiados, as rupturas foram por tração diagonal com aumento teórico 35% devido à seção composta. Esse aumento foi comprovado experimentalmente. Portanto, para as condições de aderência avaliadas, o funcionamento foi satisfatório viabilizando a solução investigada.

Hawkins e Ghosh (2006) alertaram sobre a ineficiência do modelo utilizado pelo ACI318: 2005 para o cálculo da tração diagonal em lajes alveolares com alturas superiores a 320 mm. O que ocorre na verdade, é que à medida que as lajes ficam mais altas, os alvéolos deixam de ser circulares por questões de método produtivo. Com alvéolos oblongos as resistências sofrem uma redução supostamente pela posição do ponto crítico da seção transversal. Esse assunto será melhor tratado no capítulo sobre tração diagonal.

Oh e Kim (2000) desenvolveram uma série de ensaios em vigas protendidas com pré-tração buscando avaliar o comprimento de transferência da protensão. Para tanto, os autores instrumentaram as cordoalhas para a medição das tensões após a liberação da protensão. O estudo mostrou para a série de dados analisados que o comprimento de transferência da protensão aumenta com a diminuição do cobrimento e com a diminuição do espaçamento entre cordoalhas (para duas cordoalhas). O comprimento aumenta pouco com a fluência (aumento de 5% em 90 dias) e da ordem de 15% quando comparado a extremidade da viga submetida ao corte (*cut end*) com aquela não cortada (*dead end*).

No âmbito nacional, e relativo à força cortante, Fernandes (2007) iniciou os estudos em lajes alveolares no NETPRE propondo procedimentos de ensaios baseados em recomendações europeias. Além disso, o autor analisou alguns experimentos validando os métodos sugeridos.

Catoia (2011) avaliou o comportamento de lajes alveolares de uso corrente no Brasil (alturas até 200 mm e alta protensão). Foram realizados 96 ensaios, sendo 31 de flexão e 65 de força cortante. Dos relativos à força cortante, alguns elementos foram ensaiados com preenchimento de alvéolos o que mostrou deficiência dessa técnica.

Antunes (2011) por sua vez, focou no desempenho de lajes alveolares com alvéolos preenchidos. As conclusões foram que as equações disponíveis atualmente superestimam a resistência à força cortante para o caso de alvéolos preenchidos.

3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

A seguir são apresentadas algumas recomendações normativas para o cálculo da resistência à força cortante em elementos estruturais sem armadura transversal. O *Eurocode 2* (EC2), o ACI 318 e a EN1168 (norma europeia para lajes alveolares) fazem distinção no cálculo da resistência à força cortante em regiões fissuradas e não fissuradas por flexão. No entanto, a norma brasileira de lajes alveolares, NBR 14861, apresenta única formulação para esta verificação. As descrições destas prescrições normativas introduzem os modelos de cálculo utilizados nas análises deste trabalho.

3.1 NBR 14861: 2011

A norma brasileira de lajes alveolares apresenta uma formulação para a verificação da resistência à força cortante não distinguindo entre regiões fissuras e não fissuradas por flexão. Esta formulação representa o mecanismo de ruptura por flexo-cortante, portanto relativa à regiões fissuradas por flexão, e é idêntica ao V_{Rd1} presente na NBR6118, norma brasileira de concreto estrutural. As expressões descritas a seguir limitam-se às situações de lajes alveolares sem capeamento estrutural e sem preenchimento de alvéolos.

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (3.1)$$

em que,

$$V_{c,1} = 0,25 f_{ctd} k (1,2 + 40 \rho_1) \sum b_{w,1} d \quad (3.2)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \sigma_{cp,1} \sum b_{w,1} d \quad (3.3)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1} d} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \alpha \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pl2}} \leq 1 \quad (3.6)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1, \text{ d em metros} \quad (3.7)$$

sendo,

f_{ctd} é o valor de cálculo da resistência à tração do concreto;

$\sum b_{w,1}$ é o somatório das larguras das nervuras;

A_s é a área da armadura longitudinal tracionada;

ρ_1 é a taxa de armadura longitudinal;

$\sigma_{cp,1}$ é a tensão de compressão no concreto devido à força de protensão;

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

A_c é a área da seção transversal da laje;

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

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

l_{pl2} é o comprimento de transferência da protensão, fixado em 85ϕ como valor de cálculo;

3.2 EUROCODE 2

Para a capacidade resistente ao cisalhamento em região fissurada por flexão, o Eurocode 2 (EC2) recomenda a seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,15\sigma_{cp} \right) b_w d \geq \left(0,035k^{2/3} + 0,15\sigma_{cp} \right) b_w d \quad (3.8)$$

em que,

f_{ck} é o valor da resistência à compressão do concreto (quantil de 5% na curva de distribuição normal);

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \text{ d em milímetros;}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

A_{sl} é a armadura tracionada;

b_w é a menor largura na seção transversal;

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd}$$

N_{Ed} é o esforço normal de cálculo na seção analisada ($N_{Ed} > 0$, compressão);

A_c é a área da seção transversal;

Algumas considerações importantes quanto à resistência à força cortante são apresentadas no EC2. O item 6.2.1 o código dispensa a verificação, pela Equação 3.8, de seções compreendidas até a seção localizada à d (altura útil do elemento) a partir da face interna do apoio, no caso de elementos sujeitos predominantemente a cargas distribuídas. Em termos de projeto, esta consideração conduz a verificação com uma cortante solicitante menor em relação àquela na seção imediatamente sobre o apoio, além de contar com uma contribuição maior da protensão, uma vez que o esforço normal de protensão N_{Ed} depende da seção analisada.

Para regiões não fissuradas por flexão e em elementos com único vão (sem continuidade), a falha por cisalhamento se caracteriza pela ruptura por tração diagonal do concreto. Essa tipologia de ruptura é verificada em elementos protendidos, sendo rara em elementos armados. A formulação apresentada pelo EC2 é a seguinte:

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (3.9)$$

em que,

I é o momento de inércia em relação ao centroide da seção;

b_w é a largura da seção transversal ao nível do centro de gravidade;

S é o momento estático da área acima do eixo que passa no centro de gravidade da seção;

$$\alpha_l = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1;$$

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

$$l_{pt2} = 1,2l_{pt};$$

l_{pt} é o comprimento de transferência da protensão;

σ_{cp} é a tensão de compressão no concreto devido à protensão: $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$; $N_{Ed} > 0$ para compressão;

Segundo o EC2, a verificação ao cisalhamento pela Equação 3.9 não é necessária para seções compreendidas até àquela localizada à $h/2$ (metade da altura total da seção) a partir da face interna do apoio.

3.3 EN1168: 2008

Segundo prescrição da norma europeia de lajes alveolares, para regiões fissuradas por flexão, a resistência à força cortante deve ser calculada segundo o EC2, exceção feita a lajes maiores que 45 cm em que se deve utilizar um coeficiente global de minoração da resistência de 0,9. Para laje simplesmente apoiada e em regiões não fissuradas por flexão (segundo o código, para tensão de tração menor do que $f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c$) a resistência à força cortante deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w(y)}{S_c(y)} \left(\sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp}(y) f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right) \quad (3.10)$$

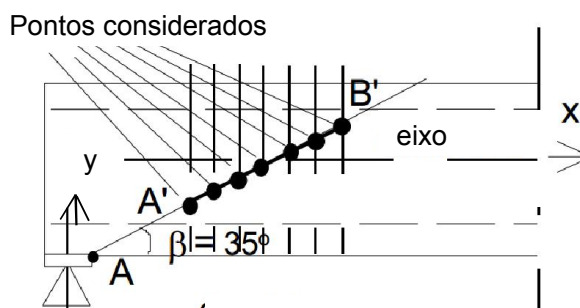
em que,

$$\sigma_{cp}(y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{A_i} + \frac{(Y_c - y)(Y_c - Y_{p_i})}{I} \right] P_i(I_x) \right\} - \frac{M_{Ed}}{I} \cdot (Y_c - y) \quad (3.11)$$

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{A_c(y)}{A_t} - \frac{S_c(y) \cdot (Y_c - Y_{p_t})}{I} + C_{p_t}(y) \right] \cdot \frac{dP_t(l_x)}{dx} \right\} \quad (3.12)$$

As expressões acima devem ser aplicadas nos pontos ao longo da reta (linha de falha) traçada a partir da face interna do apoio (ponto A na figura abaixo) segundo ângulo de 35° em relação à horizontal. O ponto crítico será o que fornecer o menor valor de $V_{Rd,c}$.

Figura 3.1: Pontos a serem considerados na busca pelo ponto crítico



Fonte: adaptado de Pajari, 2005)

A definição das variáveis é apresentada a seguir:

I é o momento de inércia da seção transversal;

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

Y_c é a altura do centro de gravidade da seção;

$S_c(y)$ é o momento estático da área acima da altura y em relação ao centro de gravidade da seção;

y é a altura do ponto analisado na linha de falha em relação ao inferior da laje;

l_x é a distância da seção considerada até o início do comprimento de transferência da protensão, calculado pelo EC2;

$\sigma_{cp}(y)$ é a tensão de compressão a y na vertical e l_x na horizontal;

n é o número de camadas de cordoalhas;

A_t é a área da seção transversal;

$P_t(l_x)$ é a força de protensão na camada t , considerando l_x ;

M_{Ed} é o momento fletor devido às cargas; para esta expressão pode ser considerado nulo;

$\tau_{cp}(y)$ é a tensão de cisalhamento no concreto a y na vertical e l_x na horizontal;

$A_c(y)$ é a área acima da altura y ;

$C_{pt}(y)$ é o fator que leva em consideração o posicionamento da camada de cordoalha:

$$C_{pt} = -1 \text{ se } y \leq y_{pt}$$

$$C_{pt} = 0 \text{ se } y > y_{pt}$$

y_{pt} é a posição da camada de cordoalhas na vertical em relação ao inferior da laje;

Apesar da grande complexidade desta formulação, podendo ser até considerada incompatível com um código normativo, ela foi incorporada em 2008 por meio da revisão normativa A1. Essa revisão ocorreu devido a resultados experimentais contra a segurança em lajes com alvéolos oblongos. Como alternativa às expressões acima, a EN1168: 2008 modifica a formulação do EC2 (ou EN1168: 2005) por coeficientes redutores de resistência:

$$V_{Rd,c} = \varphi \frac{Ib_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \beta \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (3.13)$$

em que,

$\varphi = 0,8$ é o fator redutor global;

$\beta = 0,9$ é o fator redutor da contribuição da protensão;

Esta norma prescreve ainda que para elementos maiores que 450 mm, a resistência à força cortante, seja em regiões fissuradas ou não por flexão, seja reduzida por 0,9. As seções entre a face interna do apoio e $h/2$ não precisam ser checadas à tração diagonal.

3.4 ACI 318-11

Segundo a norma americana, o cálculo de seções transversais submetidas à força cortante deve obedecer à seguinte expressão:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (3.14)$$

em que, V_u é a força cortante majorada e V_n é a resistência à força cortante nominal. O coeficiente ϕ é o coeficiente de minoração da resistência. Diferentemente das normas europeias e brasileiras, que minoram a resistência por coeficientes parciais, por exemplo, γ_c para o concreto e γ_s para o aço, o ACI utiliza uma minoração global da resistência. Para o cisalhamento, o valor deste coeficiente global é de 0,75. Para flexão, o valor varia de 0,9 (seções controladas por tração, portanto com ruptura dúctil) a 0,65 (seções controladas por compressão, ruptura frágil). Em geral, para vigas, impõe-se no cálculo da flexão uma deformação no aço maior que 0,5% que é o limite mínimo de alongamento do aço para configurar o caso de seção controlada por tração.

A resistência à força cortante V_n é dada pelo princípio da adição:

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.15)$$

em que, V_c corresponde a parcela resistida pelo concreto e V_s , a parcela resistida pela armadura transversal.

Para elementos protendidos e sem armadura transversal, a equação acima resume-se a V_c , que pode ser calculado como o menor valor das expressões que seguem abaixo, já convertidas do sistema imperial americano para o Sistema Internacional de Unidades (SI) com tensões em MPa:

$$V_{ci} = \left(0,05\sqrt{f'_c}b_w d_p + \frac{V_u M_{ct}}{M_u} \right) \geq 0,14\sqrt{f'_c}b_w d_p \quad (3.16)$$

$$V_{cw} = \left(0,29\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc} \right) b_w d_p + V_p \quad (3.17)$$

em que,

$$M_{ct} = \left(\frac{I}{y_t} \right) \left(0,5\lambda\sqrt{f'_c} + f_{pe} \right) \quad (3.18)$$

V_{ci} é a resistência à flexo-cortante;

V_{cw} é a resistência à tração diagonal;

f'_c é a resistência à compressão do concreto (quantil de 1% na curva e distribuição normal) limitado a 70MPa;

I é o momento de inércia da seção transversal;

b_w é a largura da seção transversal;

d_p é a altura útil da seção;

V_u é o esforço cortante majorado;

M_u é o momento fletor majorado, concomitante à V_u ;

M_{ct} é o momento de fissuração da seção impondo a resistência à tração à flexão igual a $0,5\lambda\sqrt{f'_c}$;

λ é o fator redutor de resistências para concretos com agregados leves;

f_{pc} é a tensão de compressão no centro de gravidade da seção;

f_{pe} é a tensão devido à normal e momento de protensão na fibra mais externa submetida a tração devido a carregamentos externos;

V_p é a componente vertical da protensão (no caso de cordoalhas retas essa parcela é nula);

Para elementos com seção composta, algumas variações nas Equações 3.16 a 3.18 ocorrem devido à consideração do peso próprio agindo na seção simples. Essas variações são detalhadas no código normativo.

O ACI318: 2011 exige a utilização de armaduras transversais em todos os elementos (protendidos ou não) em que a força cortante solicitante majorada exceda 50% da resistência minorada. Como exceção a esta regra, e dentre outros casos, estão vigas com até 250 mm de altura, sapatas, lajes maciças e lajes alveolares com alturas (sem considerar a capa) não maiores que 320 mm. Desta forma, no caso da laje alveolar, um elemento com 400 mm de altura, por exemplo, precisa ser calculada com no mínimo 50% de margem de segurança de modelo de cálculo (além daquela existente devido à adoção de valores característicos, majoração das ações e minoração das resistências) para isentar a utilização de estribos. Ressalta-se que a utilização de armadura transversal em lajes alveolares é dificultada e,

portanto indesejável do ponto de vista do processo produtivo. Será dada maior atenção sobre a abordagem do ACI318 no capítulo sobre tração diagonal.

3.5 EXEMPLO DE CÁLCULO

A seguir apresenta-se um exemplo do cálculo de uma laje alveolar bi-apoiada de 26 cm de altura e não considerando o capeamento. Neste exemplo a comparação é feita de forma gráfica, em que as resistências são apresentadas no eixo vertical e o posicionamento das seções, no eixo horizontal. A seguir, apresentam-se as considerações para os cálculos:

- Todas as curvas de resistência apresentadas possuem valores de projeto, ou seja, já estão minorados com os respectivos coeficientes (EC2 $\gamma_c = 1,5$; NBR $\gamma_c = 1,4$ e ACI $\phi = 0,75$);
- A variação da resistência em função da introdução da protensão é computada linearmente (região crescente no início das curvas);
- Os valores dos comprimentos necessários para transferir toda a protensão ao concreto são calculados pelas fórmulas presentes no Apêndice F.
- No caso do ACI, e como se trata de valores já com segurança, a resistência à compressão do concreto foi corrigida para o valor representante do quantil de 1% na curva de distribuição normal, considerando um coeficiente de variação de 10% ($f_{ck} = 40$ MPa; $f_{cm} = 47,88$ MPa; $f_c' = 36,74$ MPa);

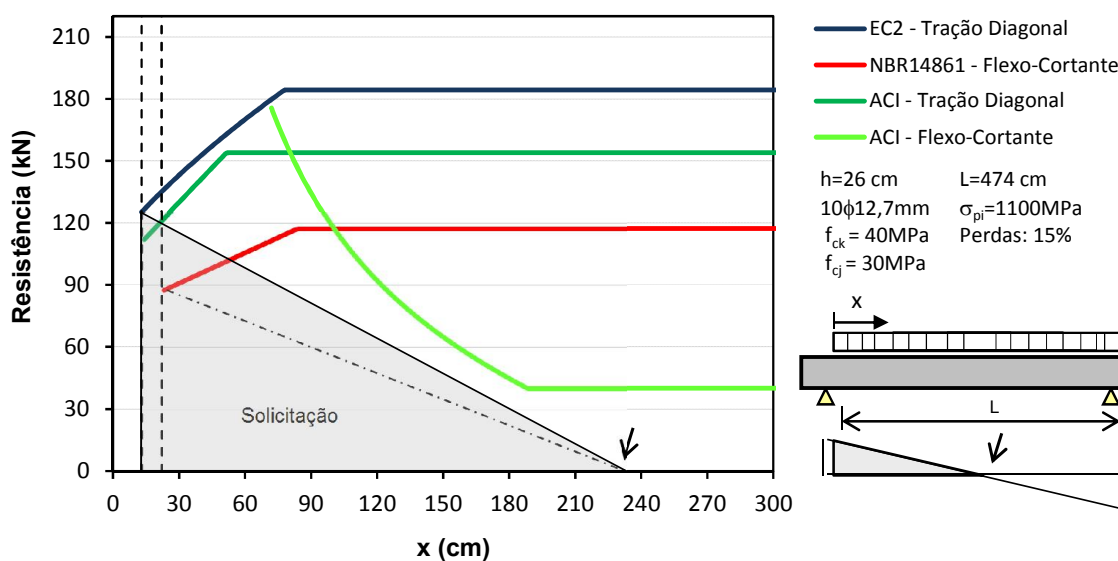
A curva da EN1168 para tração diagonal (alternativa) não é apresentada por ser semelhante à curva do EC2, sendo apenas mais conservadora devido aos coeficientes adicionais de minoração de resistência. A curva de flexo-cortante do EC2 também não é apresentada, pois é semelhante à curva da NBR14861 sendo ligeiramente mais conservadora.

No EC2, a determinação de qual curva utilizar no cálculo da força cortante é feita contrapondo o momento solicitante último com o momento de fissuração do elemento considerando o f_{ctd} como limite para não haver fissuras. Nas regiões não fissuradas por flexão utiliza-se a tração diagonal e nas regiões fissuradas, a flexo-cortante, sem uma ligação entre as curvas. Já o ACI318, adota um comportamento variável da resistência para a flexo-cortante, onde o momento de fissuração é considerado diretamente no cálculo. Para o ACI, a resistência à força cortante é o menor valor entre as suas duas curvas analisando-se seção por seção.

Na Figura 3.2 apresentam-se as características do exemplo. Considera-se um carregamento uniformemente distribuído atuando na laje. O comprimento de apoio é de 13 cm ($h/2$) de cada lado conduzindo a um vão livre (L) de 474 cm. Para os mecanismos de tração diagonal, as seções começam a ser analisadas na seção distando $h/2$ da face interna do apoio (primeira linha tracejada vertical). No caso da flexo-cortante, esse valor corresponde à altura útil do elemento (segunda linha tracejada vertical). Observa-se que esse critério da flexo-cortante vem da análise de elementos de concreto armado. Como as lajes alveolares possuem excentricidade de protensão constante de extremidade a extremidade, nas proximidades dos apoios as fissuras de flexão são improváveis remetendo-se ao mecanismo de tração diagonal por se tratar de uma região previamente não fissurada por flexão. Se porventura uma fissura surgir nessa região, o equilíbrio previamente estabelecido entre o aço e o concreto, quando da liberação da protensão, é perturbado irreversivelmente, culminando na perda de ancoragem (mais detalhes em Walraven, 1983 e Araújo et al, 2011).

O diagrama solicitante de força cortante é traçado a partir da seção a meio vão (indicada pela seta). Nota-se que a curva da NBR14861 é a que fornece a menor capacidade resistente dentre as normas apresentadas, 87 kN, pois considera a flexo-cortante. A ruptura pelas prescrições do ACI é a tração diagonal na seção $h/2$, com 112 kN. A tração diagonal do EC2, também na seção $h/2$, fornece um valor de resistência maior que a flexo-cortante da NBR14861, 125 kN.

Figura 3.2: Curvas de resistência à força cortante e solicitação



4. FLEXO-CORTANTE

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. Neste capítulo, apresentam-se as principais variáveis que influenciam a capacidade resistente à flexo-cortante dos elementos sem armadura transversal. Especial atenção é dada para a resistência a tração do concreto e para a influência do esforço axial, ou seja, a protensão.

4.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A FLEXO-CORTANTE

A seguir elencam-se os fatores geralmente aceitos como os principais:

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

Os quatro primeiros estão presentes nas formulações do EC2 e nas normas NBR6118 e NBR14861. Exemplificando pela equação brasileira tem-se:

Figura 4.1: Identificação dos fatores na equação brasileira para flexo-cortante

$$V_{Rd1} = \underbrace{0,25}_{\text{Resistência à tração}} \underbrace{f_{ctd}}_{\text{Resistência à tração}} \underbrace{(1,6 - d)}_{\text{Fator escala}} \underbrace{(1,2 + 40\rho)}_{\text{Taxa de armadura longitudinal}} bd + \underbrace{0,15}_{\text{Influência do esforço axial}} \underbrace{\sigma_{cp}}_{\text{Influência do esforço axial}} bd$$

(Fonte: próprio autor)

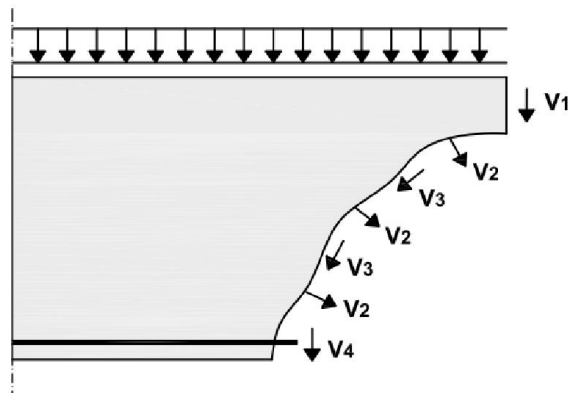
A Figura 4.2 apresenta os mecanismos básicos para a transferência de esforço cortante ao longo de sua fissura crítica e da região não fissurada em elementos sem armadura transversal.

V_1 representa a parcela transmitida pelo banzo comprimido pela flexão. V_2 representa a parcela correspondente às tensões residuais de tração devido às “pontes de concreto” ao longo da fissura. Segundo Walraven (2010), fissuras com aberturas de até 0,15 mm podem transmitir força cortante pelas tensões residuais.

Já V_3 representa a rugosidade local existente ao longo das fissuras sendo maior, quanto maior forem os agregados. Para concretos com resistência à compressão de até 70 MPa, as fissuras ocorrem na matriz cimentícia e portanto, contornam os agregados. Assim, uma rugosidade significativa devido aos agregados contribui para impedir o escorregamento das faces da fissura, transmitindo assim esforço cortante. No caso de concretos com resistência acima de 70 MPa, as fissuras atravessam os agregados perdendo o efeito do seu engrenamento.

Por fim, V_4 refere-se à armadura longitudinal que contribui para resistência à força cortante devido ao efeito pino, além de combater maiores aberturas de fissuras contribuindo com os outros mecanismos de transferência de esforço.

Figura 4.2: Mecanismos básicos de transferência de força cortante



(Fonte: próprio autor)

Em elementos maiores, as larguras das fissuras críticas tendem a ser maiores e, portanto, possuem menor contribuição da tensão residual de tração e principalmente, menor contribuição do engrenamento dos agregados. Taylor (1970 apud Albajar, 2008) verificou por experimentos que a contribuição do engrenamento dos agregados é significativa e varia de 35 a 50% da capacidade resistente total enquanto que 15 a 25% correspondem ao efeito pino,

e 20 a 40%, à parcela transmitida pela região não fissurada. Desta forma, faz-se necessário a existência de um fator escala nas formulações para força cortante. Segundo MacGregor (2012), em elementos com pelo menos um mínimo de armadura transversal, esta armadura tende a manter as faces da fissura juntas de forma a não haver perda significativa de eficiência do engrenamento dos agregados, mesmo para elementos maiores. Bazant (2011), no entanto, defende que a armadura transversal não suprime o efeito escala, principalmente em vigas com alturas maiores que 1 m.

Quanto à influência do esforço axial, se for de compressão, existe um favorecimento aos mecanismos de transferência de força cortante pela região não fissurada e pelas tensões residuais de tração e engrenamento dos agregados. Se de tração, as fissuras tenderão a ter larguras maiores, prejudicando os mecanismos resistentes complementares, além de profundidades maiores, implicando no “estrangulamento” do banzo comprimido e consequente ruptura por esmagamento do concreto nesta região.

A seguir, discute-se a resistência à tração do concreto na flexo-cortante no âmbito experimental com ênfase em concretos de alta resistência e na sequência, a influência do esforço axial.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO NA FLEXO-CORTANTE

As formulações brasileiras (NBR6118 e NBR14861) consideram a contribuição da resistência à tração do concreto na resistência à força cortante pela variável τ_{Rd} , como descrito no capítulo 3. A formulação do V_{Rd1} nas normas brasileiras é a mesma utilizada pela versão anterior do EC2. A alteração na formulação do EC2 foi defendida frente a elevados desvios padrão em elementos com concretos de alta resistência (EC2 *Commentary*, 2008).

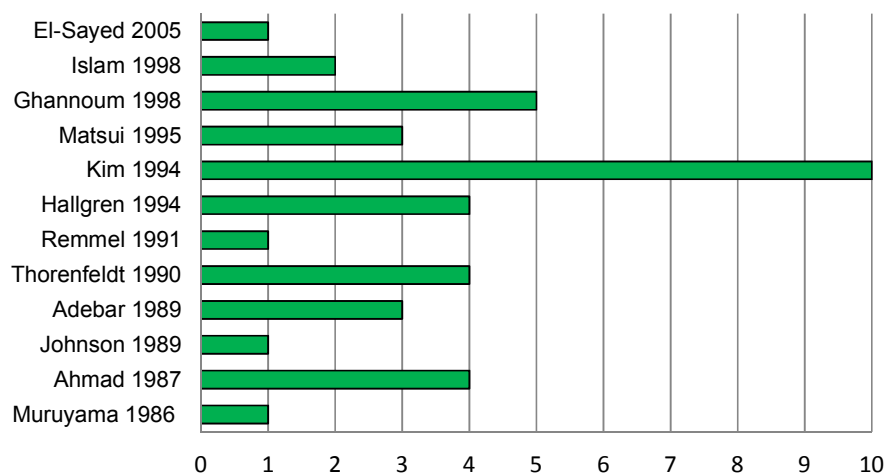
De fato, isto pode ser verificado no trabalho de König e Fischer (1995) em que 176 experimentos foram analisados, na maioria vigas, sendo algumas faixas de lajes. As resistências variam de 20 a 111 MPa. No entanto, estes pesquisadores utilizaram para a formulação do EC2 (versão anterior o EC2 e atuais NBR6118 e NBR14861) τ_R em função de $f_{ct,inf} = 0,21f_c^{2/3}$ para todos os casos. Seria razoável distinguir resistências até 50MPa das maiores que este valor. Um resultado melhor seria obtido, porém não satisfatório como se mostrará na análise a seguir.

Para esta análise, foram coletados 39 dados de faixas de lajes e vigas baixas ($h/b < 2$; h altura; b largura) dentre os mais de 1800 dados reunidos e apresentados por Collins (2008).

As vigas baixas foram selecionadas devido ao pequeno número de faixas de lajes. Assume-se, portanto, que à medida que as vigas ficam esbeltas, menor representatividade existe com relação ao real funcionamento das lajes, sendo estas o foco deste estudo por se tratar de elementos sem armadura transversal.

Além dos critérios de seleção de resultados experimentais já citados, considerou-se a resistência do concreto de 50 a 90 MPa, a distância da carga ao centro do apoio sobre a altura útil (a/d) não menor que 2,5 e não maior que 6 (segundo a envoltória resistente proposta por Kani (1964), ver Figura 4.9) e taxa de armadura longitudinal (ρ) não maior que 3%. A Figura 4.3 apresenta o autor e a data da publicação original dos dados e o número de experimentos por pesquisador. Na Tabela 4.2 encontra-se o resumo das características desses experimentos. Para maiores detalhes dos experimentos, ver Apêndice B.

Figura 4.3: Distribuição por autores dos 39 experimentos coletados



(Fonte: próprio autor)

Tabela 4.1: Resumo das características dos experimentos coletados

50,8	$\leq f_c \leq$	86,2	[MPa]	Resistência à compressão do concreto
170	$\leq h \leq$	620	[mm]	Altura
142	$\leq d \leq$	550	[mm]	Altura útil
2,50	$\leq a/d \leq$	4,50		Distância da carga ao centro do apoio, a , sobre d
0,99	$\leq \rho \leq$	3,04	[%]	Taxa de armadura longitudinal

(Fonte: próprio autor)

Optou-se por não analisar os 176 dados do trabalho de König e Fischer (1995), pois considerando os critérios de seleção apresentados, apenas 24 dados seriam aceitos. 18 destes 24 dados estão presentes em Collins (2008) e, portanto compõem os 39 analisados. Um comentário importante com relação aos dados de König e Fischer (1995) precisa ser feito. Nos elementos baixos e com resistência alta, a maioria das taxas de armaduras longitudinais é elevada. Provavelmente como forma de evitar rupturas por flexão nos ensaios em que se buscaram rupturas por força cortante. Como ρ longitudinal é limitada em 2% nos modelos de cálculo, ou seja, assume-se que a partir deste valor o aumento na resistência é menos significativo (Fusco 2008), um experimento com $\rho = 4\%$, por exemplo, é calculado com $\rho = 2\%$. Em geral, isso produz valores de cortante última experimental maiores que as calculadas. Nos referidos 176 dados, a taxa de armadura longitudinal varia de 0,42 a 6,64%. Considerando os critérios estabelecidos para seleção nesta análise, como já dito, 24 dados seriam selecionados. Se apenas o critério de $\rho < 3\%$ fosse desconsiderado, este número subiria para 64 experimentos. Assim, a média dos valores V_{exp}/V_{calc} seria fortemente influenciada por experimentos com $\rho > 3\%$ o que mitigaria os valores contra a segurança dos experimentos com ρ menores.

Os modelos de cálculo analisados sem coeficientes de segurança são apresentados a seguir:

$$NBR0,25f_{ct,inf} : 0,25f_{ct,inf}(1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd \quad (4.1)$$

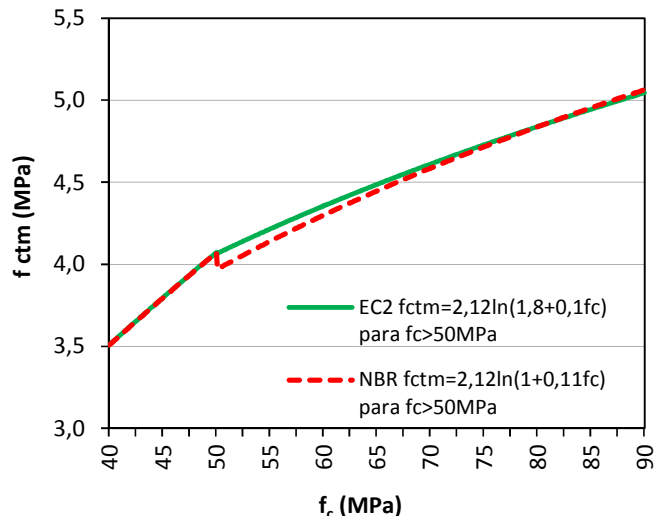
$$EC2 : 0,18(1 + \sqrt{\frac{200}{d}})(100\rho f_c)^{1/3}bd \quad (4.2)$$

Para o modelo das normas brasileiras, $f_{ct,inf}$ foi considerado como segue:

$$f_{ct,inf} = 0,7.2,12 \ln(1,8 + 0,1f_c) \text{ para } 50 < f_c \leq 90 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

A equação de $f_{ct,inf}(0,7f_{ctm})$ é a equação do EC2, apenas escrita de uma forma diferente. Apesar da versão NBR6118: 2014 apresentar uma equação relacionando resistência à tração com resistência à compressão para concreto com resistência de 50 a 90 MPa, recomenda-se a utilização da equação acima para análises de experimentos. A justificativa é que existe uma pequena descontinuidade nas equações da NBR6118: 2014 para concretos com resistências próximas de 50MPa.

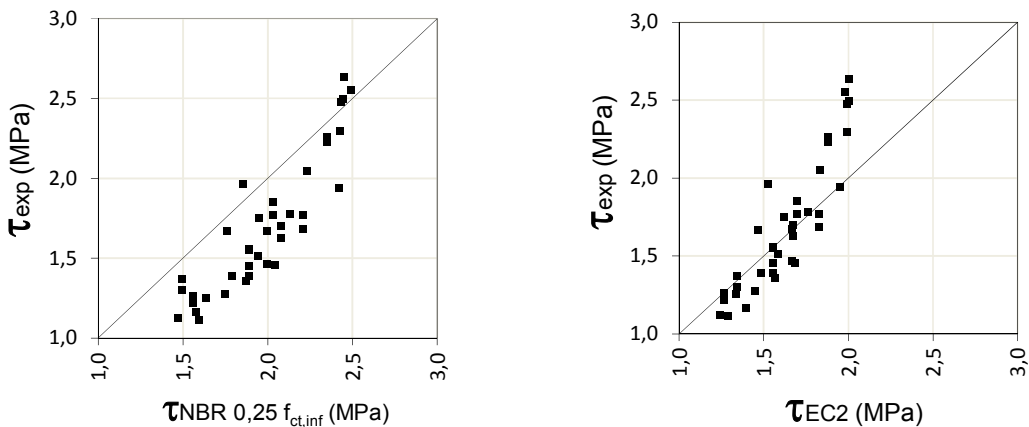
Figura 4.4: Comparação de f_{ctm} entre EC2 e NBR6118: 2014



(Fonte: próprio autor)

A análise é feita considerando a relação entre o valor da força cortante obtida no experimento e o obtido pelo modelo de cálculo, logo valores desta relação maiores que 1 são desejáveis. Os gráficos são construídos em termos de tensões de cisalhamento.

Figura 4.5: Gráficos comparativos entre tensões experimental e calculada



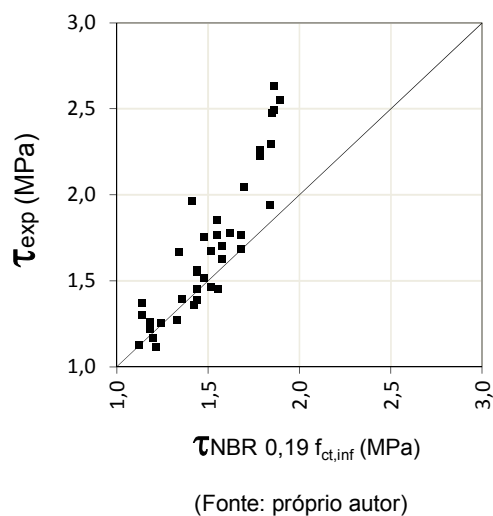
(Fonte: próprio autor)

Para esta amostra de dados, a média da relação V_{exp}/V_{calc} para o modelo de cálculo $NBR0,25f_{ct,inf}$ é de 0,84 com coeficiente de variação de 12%. Já o EC2 apresenta média de 1,02 e coeficiente de variação de 13%. Uma melhora existe no modelo do EC2 em relação ao $NBR 0,25f_{ct,inf}$, no entanto, não o suficiente. Uma média de 1,02 seria bem aceita no caso de rupturas por flexão em que o coeficiente de variação é baixo (da ordem de 5%) e, principalmente, se trata de um mecanismo de ruptura com alta ductilidade, que não é o caso

do estado limite último por força cortante. Para esta amostra, mesmo o modelo do EC2 apresenta deficiência.

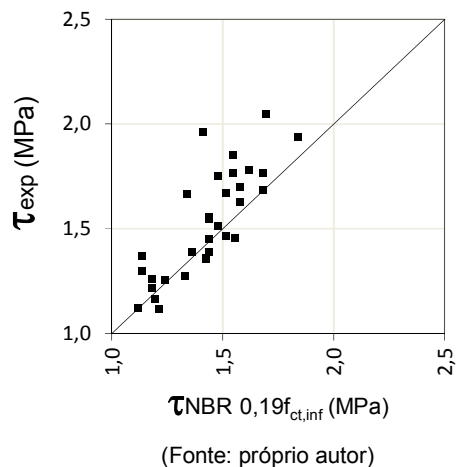
Posto isto, apenas a alteração da resistência à tração ($f_{ct,inf}$) de concretos com resistências altas não se mostrou suficiente para o cálculo da força cortante pela norma brasileira. Propõe-se uma alteração no valor de $\tau_R = 0,25f_{ct,inf}$ para $\tau_R = 0,19f_{ct,inf}$. Considerando esta proposta obtém-se uma média V_{exp}/V_{calc} de 1,11 com coeficiente de variação de 12%. Os resultados da proposta são apresentados no gráfico a seguir.

Figura 4.6: Gráfico comparativo entre tensões experimental e calculada



Retirando os dados com $2\% < \rho < 3\%$ que são os que resultam $\tau_{exp} > 2$ MPa (ver gráfico acima) a média V_{exp}/V_{calc} reduz para 1,07 e o coeficiente de variação para 10%.

Figura 4.7: Gráfico comparativo entre tensões experimental e calculada ($\rho < 2\%$)



Mais dados são desejáveis para a validação plena do ajuste proposto.

Ressalta-se que o cálculo da flexo-cortante em lajes alveolares advém de formulações utilizadas em vigas e lajes sem estribos. Assume-se, portanto, que a proposta de $\tau_R = 0,19f_{ct,inf}$ para concretos com resistências acima de 50 MPa seja aplicável também para lajes alveolares. Assim, a constante poderia ser reduzida de 0,25 para 0,19 somente para $f_{ck} \geq 55$ MPa, e interpolando linearmente entre esses dois valores para $50 < f_{ck} < 55$ MPa, evitando uma descontinuidade na transição.

4.3 INFLUÊNCIA DO ESFORÇO AXIAL NA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE

Forças de tração no elemento tendem a diminuir a resistência à força cortante uma vez que favorecem a formação de fissuras assim como aberturas maiores das já existentes. O oposto ocorre com forças de compressão que retardam o aparecimento de fissuras além de contribuir para o “fechamento” destas favorecendo a transferência de esforços.

Tanto na expressão do EC2 como das NBRs, a influência do esforço axial é computada pela parcela $0,15\sigma_{cp}bd$, positiva para compressão e negativa para tração. A seguir, apresenta-se a origem do valor $0,15\sigma_{cp}bd$. Uma dedução simplificada em relação à apresentada aqui, encontra-se na seção 6.2 do *Eurocode 2 Commentary*. Ressalta-se que esta parcela provém originalmente da contribuição da protensão e é extrapolada pelas prescrições normativas à contribuição de qualquer esforço axial na resistência à força cortante.

4.3.1 ORIGEM DA PARCELA $0,15\sigma_{cp}bd$

A parcela $0,15\sigma_{cp}bd$, chamada neste trabalho de V_p , é somada a outra parcela, V_c , com a finalidade de quantificar a resistência à força cortante de elementos sem armadura transversal. Exemplificando pela equação das NBRs, tem-se:

$$V_{Rd} = V_c + V_p \quad (4.4)$$

$$V_{Rd} = \underbrace{0,25 f_{ctd} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd}_{V_c} + \underbrace{0,15\sigma_{cp}bd}_{V_p} \quad (4.5)$$

Apesar dos modelos de cálculo serem empíricos, a parcela V_p é proposta a partir de uma dedução analítica. Esta dedução toma por base uma seção retangular de uma viga e o princípio proposto por Hedman e Losberg (1978). Este princípio diz que a resistência à força cortante de um elemento em concreto protendido é a soma da resistência do elemento em concreto armado com a parcela da força cortante gerada pelo carregamento que provoca a descompressão na seção analisada. Em outras palavras, após o momento de descompressão ser alcançado, um elemento de concreto protendido pode ser considerado como um de concreto armado.

V_p pode ser então formulado como segue:

$$V_p = M_0 \left| \frac{V_x}{M_x} \right| \quad (4.6)$$

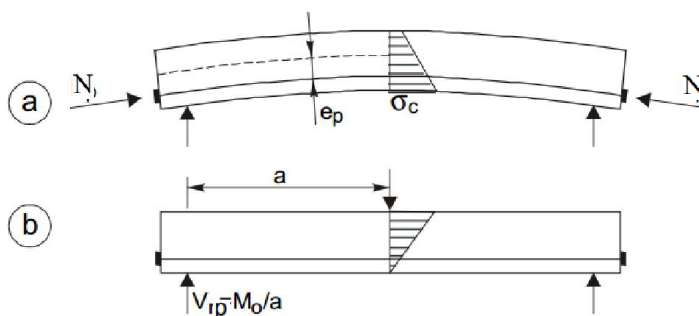
em que M_x é o momento fletor, V_x , o esforço cortante e M_0 , o momento de descompressão, todos na seção analisada. Pela equação acima, quando M_x for igual a M_0 , ou seja, quando o momento de descompressão for atingido, V_p é igual à V_x .

Considerando o ensaio típico para a verificação da resistência ao cisalhamento devido à força cortante, realizado nos laboratórios (ver Figura 4.8b), a influência da protensão pode ser calculada como segue:

$$V_p = M_0 \left| \frac{V_x}{M_x} \right| = M_0 \frac{1}{a} \quad (4.7)$$

em que a é a distância da aplicação da carga até o centro do apoio.

Figura 4.8: a) Efeito da protensão; b) Esquema de ensaios típicos de resistência à força cortante



(Fonte: adaptado de Walraven, 2010)

O momento de descompressão pode ser calculado isolando-se a variável M_0 na equação a seguir. Esta equação descreve a situação em que as tensões nas fibras inferiores são nulas.

$$\frac{N_p e_p}{W} + \frac{N_p}{A_c} - \frac{M_0}{W} = 0 \quad (4.8)$$

Isolando-se M_0 ,

$$M_0 = N_p e_p + \frac{N_p}{A_c} W \quad (4.9)$$

sendo W o módulo resistente da seção, N_p a força normal de compressão devido à protensão na seção analisada, A_c a área da seção e e_p a excentricidade de protensão.

Para uma viga retangular com b de largura e h de altura, tem-se:

$$M_0 = N_p \left(e_p + \frac{h}{6} \right) \quad (4.10)$$

com h em evidência,

$$M_0 = N_p h \left(\frac{e_p}{h} + \frac{1}{6} \right) \quad (4.11)$$

Considerando e_p/h igual a 0,35 conforme sugerido no *EC2 Commentary*, a equação acima passa a:

$$M_0 = 0,517 N_p h \quad (4.12)$$

assim,

$$V_p = M_0 \left| \frac{V_x}{M_x} \right| = M_0 \frac{1}{a} = 0,517 N_p \frac{h}{a} \quad (4.13)$$

Assumindo a altura útil da seção igual a $0,85h$ (*EC2 Commentary*):

$$V_p = 0,608 \frac{N_p}{a/d} \quad (4.14)$$

Com a distância de aplicação da carga até ao centro do apoio (ver Figura 4.8b) variando de $2,5d$ a $4d$, como na maioria dos ensaios, e fazendo $N_p = \sigma_{cp} bd$ tem-se:

$$0,15 \sigma_{cp} bd \leq V_p \leq 0,24 \sigma_{cp} bd \quad (4.15)$$

Desta forma, a parcela $0,15\sigma_{cp}bd$ corresponde a $a/d = 4$, sendo o menor valor de V_p para o domínio de a/d estabelecido.

A seguir discutem-se alguns pontos considerados relevantes:

- Ao fixar a contribuição da protensão em $0,15\sigma_{cp}bd$, ao que tudo indica, buscou-se uma solução simples e prática uma vez que, desta forma, a influência da protensão na resistência à força cortante não varia com o tipo de carregamento, nem de seção a seção, sendo a única variação, aquela causada pela proporção de protensão introduzida na seção analisada (computada na variável σ_{cp}).
- Como descrito anteriormente, o domínio estabelecido de variação de a/d é de 2,5 até 4. Nota-se que quanto menor for esta relação, maior será a parcela V_p e, portanto, maior a resistência à força cortante. Isso significa, pelas premissas assumidas, que quanto mais difícil for descomprimir a seção pelo momento fletor atuante (e isso ocorre quando a distância de aplicação da carga diminui em relação ao apoio mais próximo), maior a sua resistência à força cortante.
- Apesar de esta discussão ter como foco a influência da protensão na resistência à força cortante, é preciso trazer para este contexto a influência do posicionamento de uma carga concentrada em elementos de concreto armado, uma vez que o princípio que rege essa discussão é o proposto por Ledman e Losberg, que como já descrito, considera dois estágios para um elemento protendido: antes (V_p) e após (V_c , relativo ao elemento de concreto armado) a descompressão da seção analisada.

A envoltória resistente proposta por Kani (1964) para elementos armados, fundamentada em experimentos, relaciona casos de rupturas com a relação a/d . Observa-se que no eixo das ordenadas é expressa a relação entre o momento fletor correspondente a ruptura ($M_{exp.}$, não sendo a ruptura necessariamente por flexão), e o momento fletor último resistente ($M_{u,fl.}$). Na Figura 4.9, para valores maiores que $a/d = 5,6$ a envoltória fica constante caracterizando rupturas por flexão. Diminuindo os valores de a/d (a partir de 5,6) nota-se que as rupturas ocorrem com relações $M_{exp.}/M_{u,fl.}$ menores que 1, ou seja, as rupturas, neste caso, são por flexo-cortante.

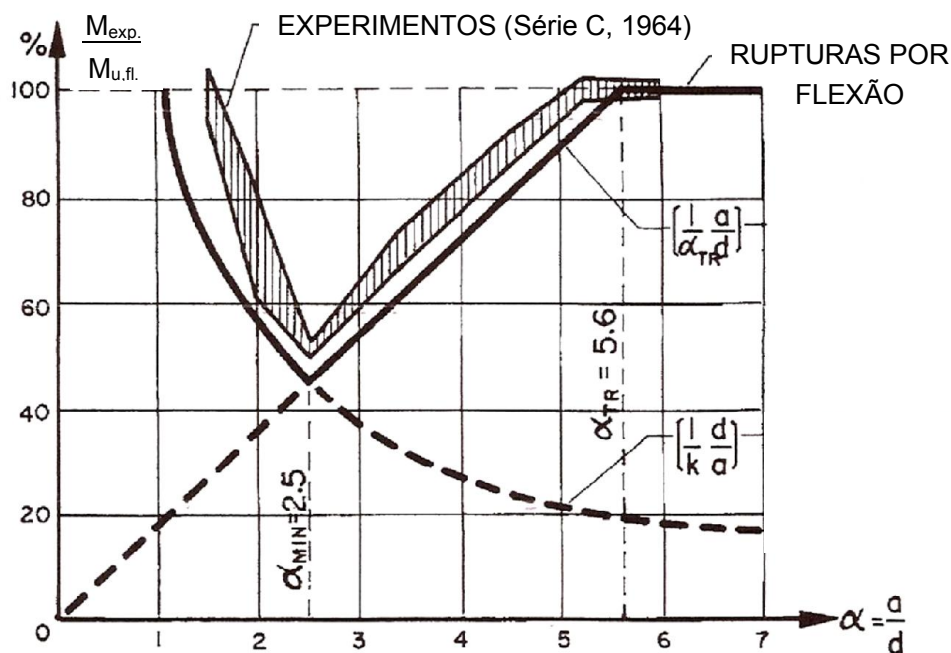
O menor valor de $M_{exp.}/M_{u,fl.}$ corresponde a $a/d = 2,5$. A partir deste e diminuindo a relação a/d , as relações de momentos aumentam. Obviamente, não se trata de mecanismos de ruptura com maior influência da flexão e sim, a influência do efeito arco, ou seja, parcelas cada vez mais significativas de cargas são equilibradas diretamente

com a reação de apoio, até o ponto em que rupturas passam a ser por esmagamento do concreto da biela de compressão.

É importante ressaltar que o diagrama apresentado na Figura 4.9 foi construído para a série C dos experimentos conduzidos em Toronto pelo professor Kani. Dependendo das características dos elementos (altura, taxa de armadura longitudinal, resistência do concreto) os valores de referência da envoltória resistente (α_{\min} e α_{TR}) tendem a mudar, mantendo, no entanto, um formato semelhante da curva analisada.

O valor α_{\min} pode ser entendido como o valor de a/d com menor influência da flexão e do efeito arco, concomitantemente. Este valor serve de referência para padronização de ensaios laboratoriais. Como exemplo, cita-se a norma europeia EN1168 que padroniza ensaios em lajes alveolares com $a = 2,5h$.

Figura 4.9: Envoltória resistente sugerida por Kani



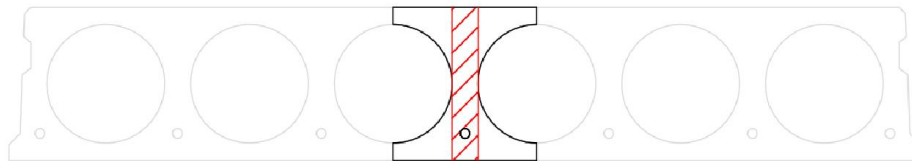
(Fonte: adaptado de Kani, 1964)

Assim, a variação da resistência à força cortante se dá não somente pela influência da protensão, mas também pela interação momento-cortante. Quanto maior o momento na seção analisada, maior o alongamento da armadura longitudinal. Este efeito interfere diretamente na eficácia da transferência do esforço cortante pelo engrenamento dos agregados uma vez que faces internas da mesma fissura ficam mais distantes. No entanto, na grande maioria dos casos, o esforço cortante é crítico nas proximidades dos

apoios, regiões onde os momentos fletores são baixos. Adicionalmente, embora a resistência à força cortante diminua à medida que um carregamento concentrado (ver Figura 4.8b) se distancia do apoio mais próximo, a distribuição de esforços para os apoios muda, ou seja, a sollicitação por cortante diminui compensando a diminuição de resistência. Como exceção, em situações com cargas concentradas simétricas (ensaio de 4 pontos, por exemplo) não existe essa compensação e cuidados especiais precisam ser tomados se uma situação prática conter esta situação.

- Outro ponto a se observar é o coeficiente de segurança da parcela V_p que é implícito, podendo nem se quer existir, pois depende do carregamento. Quando valores de experimentos são comparados com modelos de cálculo, os coeficientes de segurança precisam ser retirados e isso só é possível quando estão explícitos.
- Como já mencionado, a parcela V_p foi deduzida a partir de uma seção retangular. Quando estendido para lajes alveolares, duas considerações a favor da segurança aparecem: 1) na equação 4.10, a relação W/A_c só é igual a $h/6$ em seções retangulares. Para as lajes alveolares esta relação será sempre maior. 2) na equação 4.14, $N_p = \sigma_{cp}bd$ é considerado. Em seções retangulares $A_c \approx bd$. No entanto, em lajes alveolares A_c é significativamente maior que bd , como mostra a figura abaixo.

Figura 4.10: Área hachurada correspondente a bd e comparação com A_c para uma nervura



(Fonte: próprio autor)

Levando-se em conta o que foi exposto, propõe-se a seguir a consideração da influência da protensão na flexo-cortante de três formas. A primeira é pela parcela $V_p = 0,15\sigma_{cp}bd$, portanto já existente, mas com a denominação de Modelo Simplificado. A segunda, como modelo intermediário e denominada de Modelo Simplificado com Resistência Variável (MSRV) e por fim, a terceira, como Modelo Generalizado. Ressalta-se ainda que as considerações são feitas para o caso bi-apoiado, como na dedução de $V_p = 0,15\sigma_{cp}bd$. A

extrapolação para a situação de elementos contínuos e suas considerações não são apresentadas neste trabalho.

Tanto o Modelo Simplificado com Resistência Variável quanto o Modelo Generalizado consideram a influência da protensão seção por seção com semelhança ao que o ACI318 prescreve para o cálculo da flexo-cortante.

4.3.2 MODELO SIMPLIFICADO COM RESISTÊNCIA VARIÁVEL (MSRV)

Este modelo substitui $\frac{1}{a}$ por $\left| \frac{V_x}{M_x} \right|$ na Equação 4.14 presente na dedução da parcela $0,15\sigma_{cp}bd$. Além disso, o coeficiente de segurança ($\gamma_p < 1$) é explicitado na equação e mantém-se a consideração de $N_p = \sigma_{cp}bd$, resultando na equação a seguir:

$$V_p = \gamma_p 0,60\sigma_{cp} \frac{V_x}{M_x} b_w d^2 \quad (4.16)$$

em que,

- $\sigma_{cp} = N_p/A_c$ é tensão de compressão no concreto introduzida na seção analisada devido as cordoalhas inferiores;
- M_x é momento fletor devido às cargas transversais correspondente ao valor da força cortante V_x na seção analisada;

Desta forma a consideração da contribuição da protensão é variável pela parcela V_x/M_x , no entanto, fica simplificada devido à consideração de um elemento retangular. A equação para a flexo-cortante, exemplificada pelas normas brasileiras fica:

$$V_{Rd,1} = \tau_{Rd} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + \gamma_p 0,60\sigma_{cp} \frac{V_x}{M_x} bd^2 \quad (4.17)$$

Para elementos com fios ou cordoalhas superiores e seção simples, V_p fica:

$$V_p = (\gamma_p 0,60\sigma_{cp} - 0,22\sigma'_{cp}) \frac{V_x}{M_x} b_w d^2 \quad (4.18)$$

em que,

- $\sigma'_{cp} = N'_p/A_c$ é a tensão de compressão no concreto introduzida na seção analisada devido às cordoalhas superiores;

Nota-se que a protensão na parte superior do elemento favorece a descompressão das fibras inferiores devido a sua excentricidade e , portanto, o elemento protendido será considerado como de concreto armado mais cedo. A dedução da equação 4.18 é apresentada no Apêndice A.

4.3.3 MODELO GENERALIZADO

Walraven (1982; 1983) considerou em suas análises de lajes alveolares submetidas à flexo-cortante o que se convencionou chamar neste trabalho de Modelo Generalizado.

A formulação deste modelo retoma a Equação 4.6. Assim, a expressão para a flexo-cortante, exemplificada pelas normas brasileiras, e considerando o coeficiente de segurança γ_p , fica:

$$V_{Rd,1} = \tau_{Rd} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + \gamma_p M_0 \frac{V_x}{M_x} \quad (4.19)$$

em que,

- M_0 é o momento de descompressão das fibras inferiores na seção analisada, dado por:

$$M_0 = N_p e_p + \frac{N_p + N'_p}{A_c} W - N'_p e'_p \quad (4.20)$$

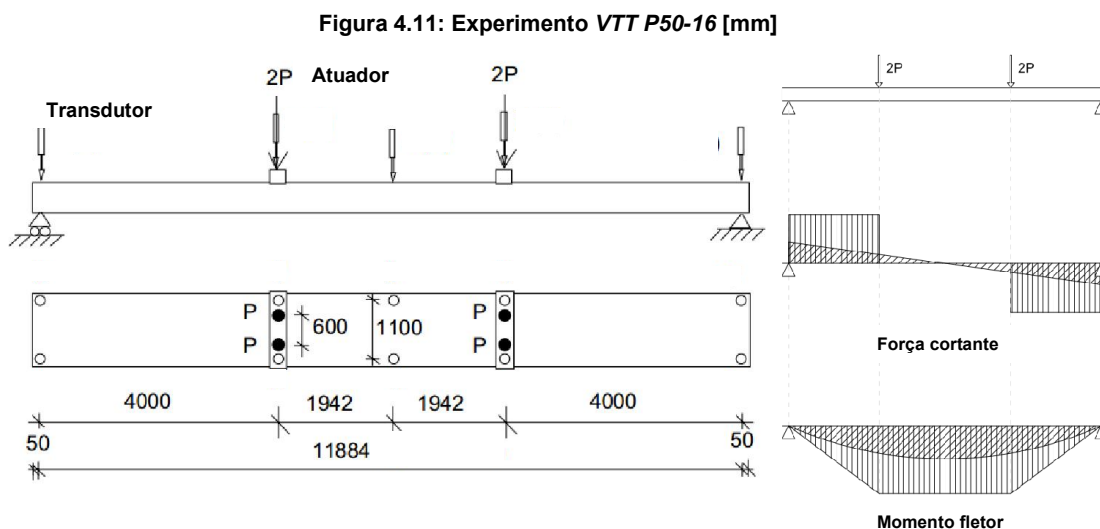
As variáveis acima já foram definidas neste capítulo. O momento de descompressão é constante com exceção nas seções das extremidades onde a protensão ainda não foi totalmente introduzida no concreto. A correção é feita nas normais de protensão, geralmente assumindo uma variação linear da extremidade da laje até a seção correspondente ao comprimento de transferência da protensão.

A seguir analisam-se alguns experimentos em lajes alveolares com os três modelos de consideração da protensão na resistência à força cortante.

4.3.4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS PARA CÁLCULO DE V_p EM LAJES ALVEOLARES

A maioria dos dados de ensaios em lajes alveolares existentes na literatura internacional apresentam rupturas por tração diagonal. No âmbito nacional, todos os resultados publicados (Fernandes 2007, Catoia 2011, Antunes 2011, França 2012) são analisados pelas equações brasileiras, ou seja, considerando rupturas por flexo-cortante, sendo a grande maioria dos ensaios com $\frac{a}{h} = 2,5$.

Apenas oito resultados de experimentos com lajes alveolares com rupturas por flexo-cortante foram coletados considerando a/h variando de 2,4 a 8. Sete destes experimentos tiveram a tipologia de carregamento mostrada na Figura 4.8b. O último experimento apresentado nesta tabela foi ensaiado com duas linhas transversais de carregamento (ver Figura 4.11).



(Fonte: adaptado de Pajari, 2004)

A seguir apresentam-se quatro tabelas. A primeira contém as informações dos dados coletados. As três seguintes apresentam os cálculos feitos pelo Modelo Simplificado, pelo Modelo Simplificado com Resistência Variável e pelo Modelo Generalizado.

No cálculo pelo Modelo Simplificado, para os elementos com protensão também superior, considerou-se apenas σ_{cp} desprezando o efeito de σ'_{cp} . A parcela da normal de compressão devido à protensão superior, além de pequena em relação a inferior, tende a neutralizar, nas fibras inferiores, a tensão de tração gerada pelo respectivo momento de protensão.

O cálculo pelos outros dois modelos é iterativo, uma vez que a resistência depende da solicitação, ou seja, V_{calc} é função de V_x . Na Tabela 4.4, por exemplo, nota-se que as variáveis V_{calc} e V_x são iguais no último experimento, ou seja, o cálculo converge quando esta condição for alcançada. Nos outros experimentos, por falta de informações desprezou-se o peso próprio no cálculo e, portanto, $V_x/M_x = 1/a$, não necessitando de iterações nos cálculos. Ressalta-se que o processo iterativo não é necessário quando da verificação de uma solicitação conhecida.

As equações utilizadas, sem os coeficientes de segurança, são mostradas a seguir.

- Modelo Simplificado da consideração de V_p

$$V_{calc} = \eta \cdot f_{ct,inf} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + 0,15\sigma_{cp}bd \quad (4.21)$$

- Modelo Simplificado com Resistência Variável (MSRV)

$$V_{calc} = \eta \cdot f_{ct,inf} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + (0,60\sigma_{cp} - 0,22\sigma'_{cp}) \frac{V_x}{M_x} bd^2 \quad (4.22)$$

- Modelo Generalizado

$$V_{calc} = \eta \cdot f_{ct,inf} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + M_0 \frac{V_x}{M_x} \quad (4.23)$$

em que,

$$\text{para } f_c \leq 50 \text{ MPa: } \eta = 0,25 \text{ e } f_{ct,inf} = 0,7 \cdot 0,3 f_c^{2/3}$$

$$\text{para } 50 < f_c \leq 90 \text{ MPa: } \eta = 0,19 \text{ e } f_{ct,inf} = 0,7 \cdot 2,12 \ln(1,8 + 0,1 f_c)$$

O valor de η para concretos com resistência à compressão superior a 50MPa foi sugerido no item 4.2.

Tabela 4.2: Características dos experimentos coletados

Inst.	Exp. nº	h (mm)	e (mm)	b _w (mm)	d (mm)	A _c (mm ² x10 ³)	I (mm ⁴ x10 ⁶)	W (mm ³ x10 ⁶)	A _{sp} (mm ²)	A _{sp} ' (mm ²)	σ _{pi} (MPa)	σ _{cp} (MPa)	σ _{cp} ' (MPa)	f _c (MPa)	L (cm)	a/h	s (mm)	V _{exp} (kN)
Rich.	1C	203	55,7	279	158	133,3	678,6	6,69	463,8	-	1300	3,84	-	63,2	*	7,28	100	127,8
Lees	8B	152	31	372	107	115,4	305,7	4,02	486	-	1300	4,65	-	63,2	*	4,57	100	122,4
	9A	152	31,3	372	107	115,4	304,9	4,01	248,2	-	1300	2,38	-	63,2	*	2,4	100	116
	9C	152	31,3	372	107	115,4	304,9	4,01	248,2	-	1300	2,38	-	63,2	*	5,36	100	81,2
TUE	21	200	63,7	351	165	145,2	692	6,92	744	104	1300	5,66	0,79	61,52	*	6	100	147
	22	200	63,7	351	165	145,2	692	6,92	744	104	1300	5,66	0,79	61,52	*	6	100	156,3
	38	305	115	242	270	192	2261	14,83	837	104	1300	4,82	0,60	69,36	*	5,34	100	183,2
VTT	P50-16	500	251	333	457	287,6	8868	35,47	1488	-	1000	4,40	-	62,8	1184	8	50	242,6

(Fonte: próprio autor)

LEGENDA:

Inst. – Instituição;
 Exp. – Experimento;
 f_c – Resistência à compressão do concreto;
 s – Comprimento de apoio;
 * – Informação não fornecida;
 L – Vão;

a/h – distância de aplicação da carga sobre altura do elemento;
 A_{sp}' – Área de aço na borda superior;
 σ_{pi} – Tensão no aço sem perdas de protensão;
 σ'_{cp} = N'_p/A_c – Tensão de compressão devido a protensão das cordoalhas superiores;
 V_{exp} – Força cortante última do ensaio;

NOTAS:

As perdas de protensão foram adotadas como 15%;
 Todas as rupturas foram por flexo-cortante;

Tabela 4.3: Modelo Simplificado para consideração de V_p

Inst.	Exp.	k	ρ	V_c (kN)	σ_{cp} (MPa)	σ_{cp}' (MPa)	V_p (kN)	V_{calc} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{calc}
Rich.	1C	1,44	0,011	60,84	3,84	-	25,42	86,26	127,8	1,48
Lees	8B	1,49	0,012	59,25	4,65	-	27,79	87,04	122,4	1,41
	9A	1,49	0,006	50,86	2,38	-	14,19	65,05	116	1,78
	9C	1,49	0,006	50,86	2,38	-	14,19	65,05	81,2	1,25
TUE	21	1,44	0,013	83,27	5,66	0,79	56,06	139,33	147	1,06
	22	1,44	0,013	83,27	5,66	0,79	56,06	139,33	156,3	1,12
	38	1,33	0,013	90,94	4,82	0,60	53,08	144,02	183,2	1,27
VTT	P50-16	1,14	0,010	163,05	4,40	-	100,39	263,44	242,6	0,92

(Fonte: próprio autor)

μ 1,29
COV 0,21

Tabela 4.4: Modelo Simplificado com Resistência Variável (MSRV) para consideração de V_p

Inst.	Exp.	k	ρ	V_c (kN)	L (cm)	g (kN/m)	x (m) ¹	M_g (kNm)	V_g (kN)	M_x (kNm)	V_x (kN)	V_p (kN)	V_{calc} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{calc}
Rich.	1C	1,44	0,011	60,84	*	*	1,32	-	-	-	-	13,97	74,81	127,8	1,71
Lees	8B	1,49	0,012	59,25	*	*	0,59	-	-	-	-	24,32	83,57	122,4	1,46
	9A	1,49	0,006	50,86	*	*	0,26	-	-	-	-	23,65	74,51	116,0	1,56
	9C	1,49	0,006	50,86	*	*	0,71	-	-	-	-	10,59	61,45	81,2	1,32
TUE	21	1,44	0,013	83,27	*	*	1,04	-	-	-	-	31,11	114,38	147,0	1,29
	22	1,44	0,013	83,27	*	*	1,04	-	-	-	-	31,11	114,38	156,3	1,37
	38	1,33	0,013	90,94	*	*	1,36	-	-	-	-	33,75	124,70	183,2	1,47
VTT	P50-16	1,14	0,010	163,05	1184	6,69	3,55	98,44	15,86	794,75	212,00	48,95	212,00	242,6	1,14

¹ x(m) = distância da extremidade da laje até a seção analisada (seção a d da aplicação da carga)

(Fonte: próprio autor)

μ 1,41
COV 0,12

Tabela 4.5: Modelo Generalizado para consideração de V_p

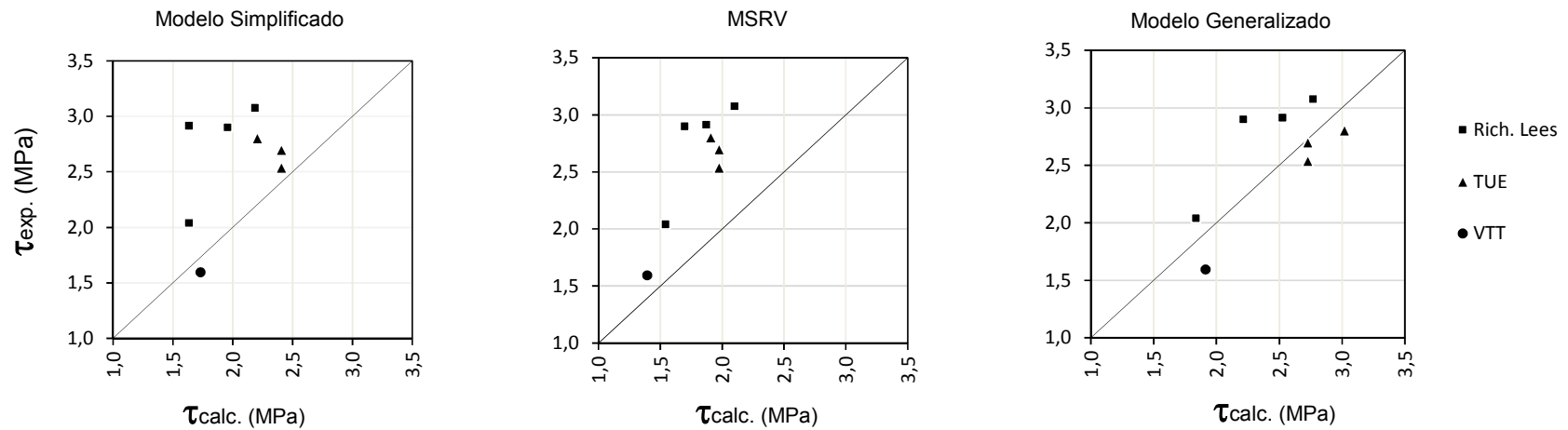
Inst.	Exp.	k	ρ	V_c (kN)	L (cm)	g (kN/m)	x (m) ¹	M_g (kNm)	V_g (kN)	M_0 (kNm)	M_x (kNm)	V_x (kN)	V_p (kN)	V_{calc} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{calc}
Rich.	1C	1,44	0,011	60,84	*	*	1,32	-	-	54,25	-	-	36,71	97,55	127,8	1,31
Lees	8B	1,49	0,012	59,25	*	*	0,59	-	-	35,37	-	-	50,91	110,16	122,4	1,11
	9A	1,49	0,006	50,86	*	*	0,26	-	-	18,12	-	-	49,67	100,53	116,0	1,15
	9C	1,49	0,006	50,86	*	*	0,71	-	-	18,12	-	-	22,24	73,10	81,2	1,11
TUE	21	1,44	0,013	83,27	*	*	1,04	-	-	89,56	-	-	74,63	157,90	147,0	0,93
	22	1,44	0,013	83,27	*	*	1,04	-	-	89,56	-	-	74,63	157,90	156,3	0,99
	38	1,33	0,013	90,94	*	*	1,36	-	-	173,15	-	-	106,31	197,26	183,2	0,93
VTT	P50-16	1,14	0,010	163,05	1184	6,69	3,55	98,44	15,86	473,08	1075,52	291,09	128,04	291,09	242,6	0,83

¹ x(m) = distância da extremidade da laje até a seção analisada (seção a *d* da aplicação da carga)

(Fonte: próprio autor)

μ 1,05
COV 0,15

Figura 4.12: Gráfico comparativo entre tensões experimental e calculada



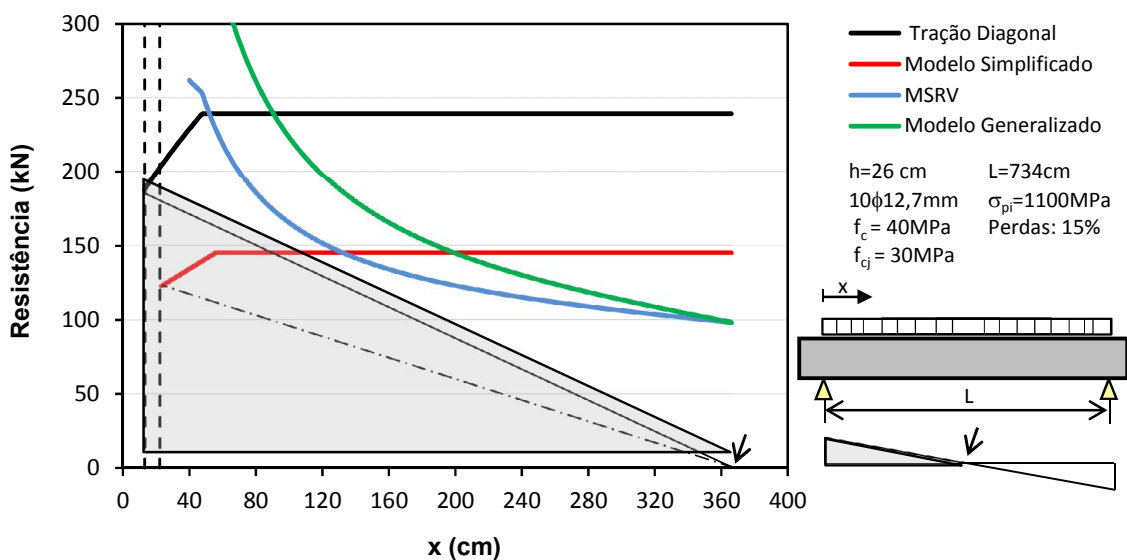
(Fonte: próprio autor)

A média e o coeficiente de variação (COV) do modelo simplificado são de 1,29 e 21%, respectivamente. Para o modelo simplificado com resistência variável esses parâmetros estatísticos são 1,41 e 12%. Já o generalizado possui média de 1,05 e COV de 15%.

Devido à quantidade de dados, os resultados não são plenamente confiáveis. No entanto, algumas conclusões podem ser esboçadas. Um ponto evidente é que a consideração de V_x/M_x nos modelos conduz a uma menor dispersão (menor COV) para esse pequeno conjunto de dados. Isso é esperado uma vez que a amplitude de variação de a/h nos ensaios é alta e V_x/M_x consegue responder a essa variação. Outra questão notável é que o modelo simplificado com resistência variável é o mais conservador dentre os três analisados, em termos de média. A justificativa para isso é a consideração conservadora de uma seção retangular equivalente para o cálculo de lajes alveolares. Já o modelo simplificado não responde bem as variações de a/h (visto que foi deduzido para a situação de $a/h \approx 4$), apresentando valores demasiadamente seguros, para experimentos com relação a/h baixa, como o experimento 9A ($a/h = 2,4$) com V_{exp}/V_{calc} igual a 1,78.

A seguir apresenta-se um exemplo semelhante ao do capítulo 3. As curvas dos três modelos para a flexo cortante são apresentadas, juntamente com a curva da tração diagonal, sendo esta, o limitante superior da resistência nas seções analisadas.

Figura 4.13: Gráfico comparativo das resistências pelos três modelos e a tração diagonal



(Fonte: próprio autor)

Neste exemplo as curvas resistentes não possuem coeficientes de segurança. Partindo do meio do vão com uma reta indicando o diagrama de força cortante devido ao carregamento uniformemente distribuído, pode-se afirmar que o modelo de cálculo condicionante é o Modelo Simplificado. Se for considerada a contribuição da protensão de maneira variável, seção a seção, ou seja, considerando os modelos MSRV e o Generalizado, nota-se pela linha diagonal cheia, partindo do centro do elemento, que o modelo condicionante passa a ser a tração diagonal com significativo aumento de resistência em relação ao Modelo Simplificado. Assim, o Modelo Simplificado mostra-se bastante conservador nas regiões próximas aos apoios.

5. TRAÇÃO DIAGONAL

O mecanismo tração diagonal ocorre em regiões de lajes alveolares não previamente fissuradas por flexão. Os modelos de cálculo assumem que a máxima tensão principal na nervura do elemento atinge a resistência última de tração do concreto. Isto configura a ruptura em elementos sem armadura transversal. Neste capítulo são apresentadas as deduções pertinentes deste modelo de cálculo enfatizando a existência de tensões adicionais de cisalhamento devido à introdução da protensão, o que demanda correções nos modelos de cálculo atuais.

5.1 MODELO TRADICIONAL PARA TRAÇÃO DIAGONAL

A ruptura por tração diagonal em experimentos ocorre nas proximidades dos apoios. Nesta região em um elemento bi-apoiado, os momentos solicitantes são baixos e a tensão resultante nas fibras inferiores será de compressão. Desta forma, fissuras de flexão raramente ocorrem nesta região e a teoria elementar de vigas pode ser utilizada para representar a resistência à força cortante do elemento. Assim, as tensões normal (σ_x) e de cisalhamento (τ) são calculadas como segue:

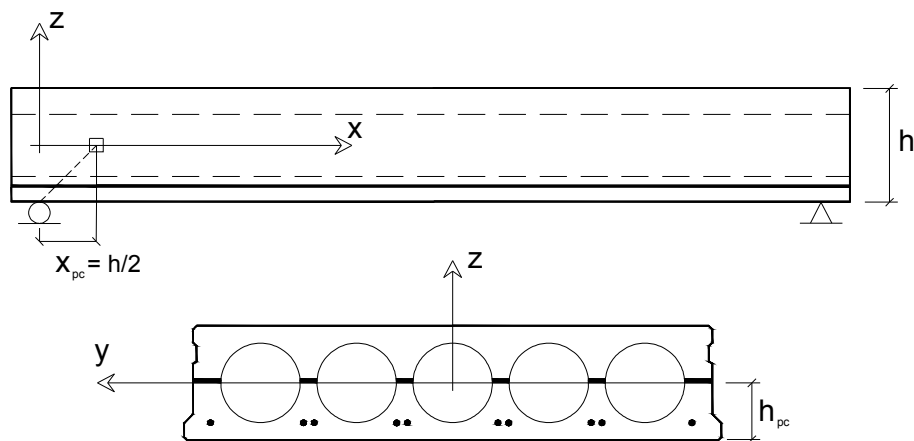
$$\sigma_x = -\frac{P(x)}{A} \quad (5.1)$$

$$\tau = \frac{S_y(z)}{b(z)I_y} V \quad (5.2)$$

em que 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 , o esforço cortante.

Para este modelo de cálculo, algumas hipóteses são adotadas como tensões verticais nulas, altura do ponto crítico (h_{pc}) situada no centro de gravidade da seção transversal e distância horizontal do centro do apoio ao ponto crítico (x_{pc}) igual a $h/2$.

Figura 5.1: Posição do ponto crítico pelo modelo tradicional de cálculo da tração diagonal



(Fonte: Próprio autor)

Assume-se que a ruptura por tração diagonal ocorre quando a máxima tensão principal (σ_1) na alma ou nervura do elemento atinge a resistência última de tração do concreto, assim:

$$f_{ct} = \sigma_1 = -\frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(-\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (-\tau)^2} \quad (5.3)$$

Substituindo 5.1 e 5.2 em 5.3, considerando $z = 0$ (centro de gravidade) e isolando V , tem-se:

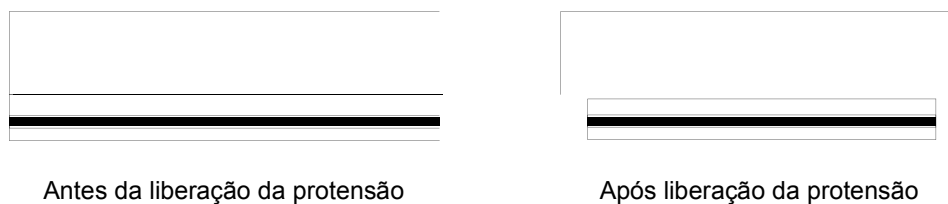
$$V = \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct}^2 + \frac{P(x)}{A} f_{ct}} \quad (5.4)$$

A equação acima é a encontrada no EC2 para tração diagonal. Já o ACI318 adota algumas simplificações como a linearização do termo com a raiz quadrada e a consideração de $\frac{I_y}{S_y} = d$. Desta forma a equação 5.4 passa a ser:

$$V = bd \left(f_{ct} + 0,3 \frac{P(x)}{A} \right) \quad (5.5)$$

Ambas as equações não levam em consideração as tensões adicionais de cisalhamento devido à transferência da protensão. Para ilustrar este efeito, Pajari (2005) apresenta a seguinte figura.

Figura 5.2: Ilustração do que ocorreria sem as tensões cisalhantes na transferência da protensão

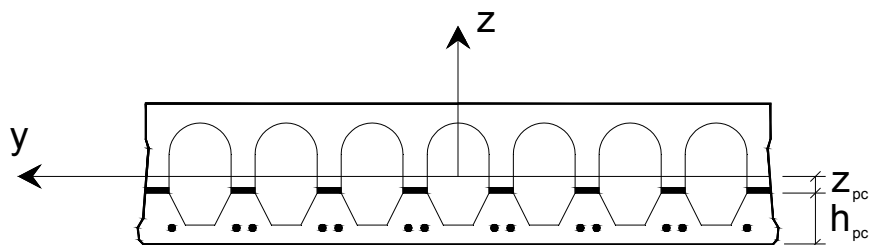


(Fonte: Pajari, 2005)

Como mostrado na figura acima, as duas partes não ficariam juntas se não houvesse tensões de cisalhamento na introdução da protensão. A Figura 5.2 também ilustra a ruptura por fendilhamento que ocorre no momento da liberação da protensão (corte das lajes na pista de protensão, por exemplo) quando a aderência é alta (f_{cj} elevado) e a protensão é elevada.

O modelo de cálculo proposto por Yang (1994) busca contemplar o efeito das tensões adicionais devido à introdução da protensão. Yang propõe que a localização do ponto crítico (x_{pc} , h_{pc}) não necessariamente coincide com o centro de gravidade do elemento, especialmente naqueles com alvéolos oblongos (ou não circulares), ver Figura 5.3. As diferenças entre os valores obtidos pela Equação 5.4 e os resultados das modelagens por elementos finitos feitas por Yang chegam a mais de 40% dependendo das características da laje alveolar. Experimentos internacionais confirmam essa diferença (Pajari, 2005; Ghosh, 2006).

Figura 5.3: Posição do ponto crítico em lajes com alvéolos oblongos

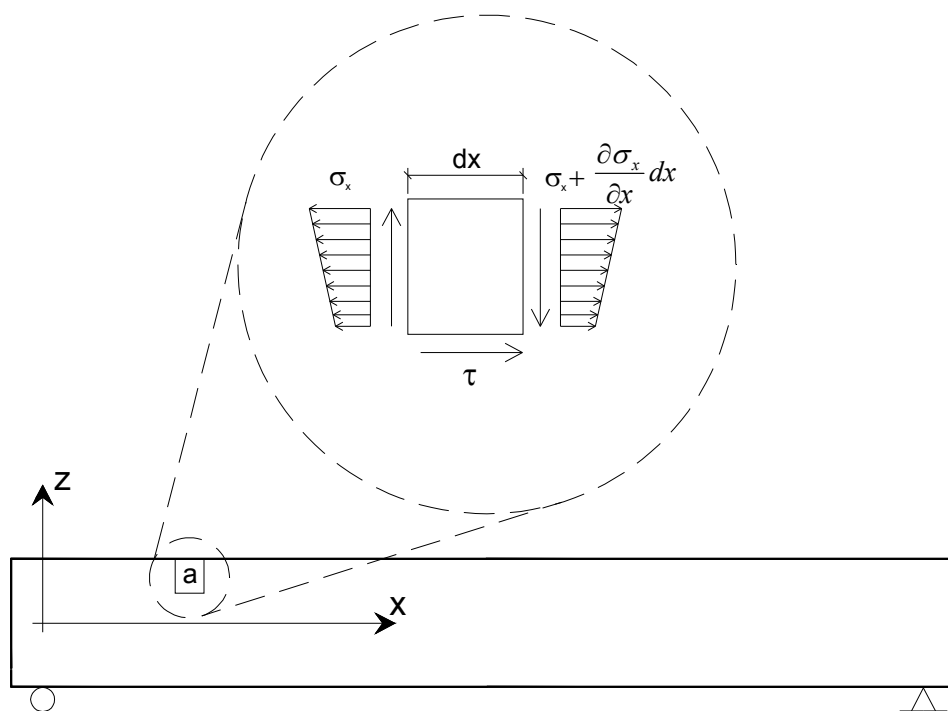


(Fonte: Próprio autor)

5.2 MODELO DE YANG

Considera-se o elemento bi-apoiado e o diagrama de corpo livre de um elemento “a” com comprimento dx , mostrado na Figura 5.4.

Figura 5.4: Diagrama de tensões no elemento “a”



(Fonte: Próprio autor)

Do equilíbrio horizontal do elemento “a” tem-se:

$$-\int_{z_0}^{z_i} \sigma_x b(z) dz + \tau b(z) dx + \int_{z_0}^{z_i} \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) b(z) dz = 0 \quad (5.6)$$

sendo os limites de integração a base do elemento “a” (z_0) e seu topo (z_i). Simplificando a Equação 5.6, vem:

$$\tau = -\frac{1}{b(z)} \int_{z_0}^{z_i} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dA \quad (5.7)$$

em que $b(z)dz = dA$ e $b(z)$ é a largura do elemento na altura z . Generalizando a Equação 5.1 tem-se:

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} + Pe \frac{z}{I_y} - M \frac{z}{I_y} \quad (5.8)$$

onde e é a excentricidade de protensão e M o momento fletor atuante. Derivando a Equação 5.8 em função de x :

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{ez}{I_y} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{z}{I_y} \frac{\partial M}{\partial x} \quad (5.9)$$

reescrevendo,

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \left(-\frac{1}{A} + \frac{ez}{I_y} \right) \frac{\partial P}{\partial x} - V \frac{z}{I_y} \quad (5.10)$$

Inserindo a Equação 5.10 na Equação 5.7, tem-se

$$\tau = -\frac{1}{b(z)} \left[\frac{\partial P}{\partial x} \left(-\frac{1}{A} \int_{z_0}^{z_i} dA + \frac{e}{I_y} \int_{z_0}^{z_i} z dA \right) - \frac{V}{I_y} \int_{z_0}^{z_i} z dA \right] \quad (5.11)$$

Com $\int_{z_0}^{z_i} dA = A_0$, $\int_{z_0}^{z_i} z dA = S_0$ e $b(z) = b_0$, a Equação 5.11 fica:

$$\tau = \frac{1}{b_0} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_0}{A} - \frac{eS_0}{I_y} \right) + \frac{VS_0}{b_0 I_y} \quad (5.12)$$

em que A_0 é a área acima do ponto no qual a tensão de cisalhamento é calculada, S_0 é o momento estático em relação a este ponto e b_0 é a largura da seção transversal na altura

analisada. Na Equação 5.12 é possível perceber que existe um acréscimo de tensão de cisalhamento devido à protensão. As duas equações a seguir correspondem as duas parcelas da tensão de cisalhamento: τ_p relativo à introdução da protensão e τ_c relativo ao carregamento.

$$\tau_p = \frac{1}{b_0} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_0}{A} - \frac{eS_0}{I_y} \right) \quad (5.13)$$

$$\tau_c = \frac{VS_0}{b_0 I_y} \quad (5.14)$$

Fazendo $M = R_1 x_{pc} \approx V \cdot x_{pc}$, na Equação 5.8, sendo R_1 a reação do apoio mais próximo e colocando as Equações 5.8 e 5.12 em função do ponto crítico (índice “pc”), tem-se:

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} + Pe \frac{z_{pc}}{I_y} - V x_{pc} \frac{z_{pc}}{I_y} \quad (5.15)$$

$$\tau = \frac{1}{b_{pc}} \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) + \frac{VS_{pc}}{b_{pc} I_y} \quad (5.16)$$

Substituindo as Equações 5.15 e 5.16 na Equação 5.3, vem:

$$\left(\frac{S_{pc}}{b_{pc} I_y} \right)^2 V^2 + \left[2 \frac{S_{pc}}{b_{pc}^2 I_y} \left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f_{ct}}{I_y} x_{pc} z_{pc} \right] V + \left\{ \left[\left(\frac{A_{pc}}{A} - \frac{eS_{pc}}{I_y} \right) \frac{1}{b_{pc}} \frac{\partial P}{\partial x} \right]^2 - \frac{f_{ct} P}{A} + \frac{f_{ct} P}{I_y} z_{pc} e - f_{ct}^2 \right\} = 0 \quad (5.17)$$

Resolvendo a equação de segundo grau em função de V :

$$V = \frac{b_{pc} I_y}{S_{pc}} \left[\frac{b_{pc}}{2S_{pc}} f_{ct} x_{pc} z_{pc} + \frac{S_{pc}}{b_{pc}} \left(\frac{e}{I_y} - \frac{A_{pc}}{AS_{pc}} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{b_{pc} I_y}{S_{pc}} \left[\left(\frac{b_{pc}}{2S_{pc}} f_{ct} x_{pc} z_{pc} \right)^2 + \left(\frac{e}{I_y} - \frac{A_{pc}}{AS_{pc}} \right) f_{ct} x_{pc} z_{pc} + \left(\frac{1}{A} - \frac{e z_{pc}}{I_y} \right) P f_{ct} + f_{ct}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.18)$$

Na equação acima, considerando o ponto crítico no centro de gravidade da seção, z_{pc} igual a zero, e desconsiderando o gradiente de protensão, $\partial P/\partial x$, teremos:

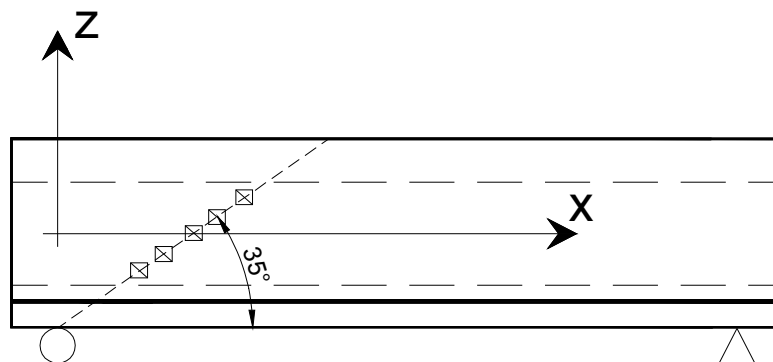
$$V = \frac{b I_y}{S} \left[\left(\frac{1}{A} \right) P f_{ct} + f_{ct}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.19)$$

que é a mesma formulação apresentada no modelo de cálculo tradicional (Equação 5.4).

Yang (1994) sugere a posição do ponto crítico (x_{pc} e h_{pc}), baseado em suas modelagens numéricas, como sendo a interseção da menor largura das nervuras da laje com a linha partindo do centro do apoio e ângulo de $\beta = 35^\circ$ em relação à superfície inferior da laje. Assim,

$$x_{pc} = \frac{h_{pc}}{\tan \beta} \approx \frac{h_{pc}}{0,7} \quad (5.20)$$

Figura 5.5: Localização do ponto crítico



□ pontos a serem considerados

(Fonte: Próprio autor)

5.3 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Os resultados contra a segurança em lajes alveolares com alvéolos oblongos, levaram a alterações significativas em códigos normativos a partir de 2008. A revisão normativa A1: 2008 foi aplicada à norma europeia de lajes alveolares, EN1168: 2005, e suas alterações principais remetem a equação do mecanismo tração diagonal. Nesta revisão, o modelo proposto por Yang foi introduzido como forma principal de cálculo e uma alternativa a este modelo foi apresentada (ver item 3.3). Esta alternativa modifica a formulação do EC2 por fatores redutores, sendo um global e outro específico para a protensão.

Nos Estados Unidos, experimentos conduzidos com lajes norte americanas mostraram bons resultados para elementos com alturas de 320 mm e menores. No entanto, para lajes com alturas maiores que esta, verificaram-se casos de rupturas por tração diagonal com 60%, ou menos, do valor obtido pelo modelo de cálculo do ACI318: 2005 (Hawkins e Ghosh, 2006). Como consequência, a partir da versão de 2008, o ACI318 exige armadura transversal em lajes alveolares com alturas maiores que 320 mm se a solicitação majorada exceder 50% da resistência minorada. A inconveniência da utilização de estribos em lajes alveolares devido ao processo produtivo implica na consideração de 50% da capacidade calculada nestas lajes. Isso gera inconsistências no projeto como lajes de 400 mm serem menos resistentes à força cortante do que lajes de 320 mm (ambas sem estribos).

Voltando para o contexto europeu, em 2005, Pajari publicou análises que buscaram checar a validade da formulação do EC2 (ou da norma EN1168: 2005), assim como o modelo proposto por Yang. Para tanto, 49 ensaios com ruptura por tração diagonal em lajes alveolares bi-apoiadas, carregadas em linha transversal e alturas variando de 200 a 500 mm foram selecionadas. Todos os experimentos foram conduzidos no laboratório VTT na Finlândia, a partir de 1990.

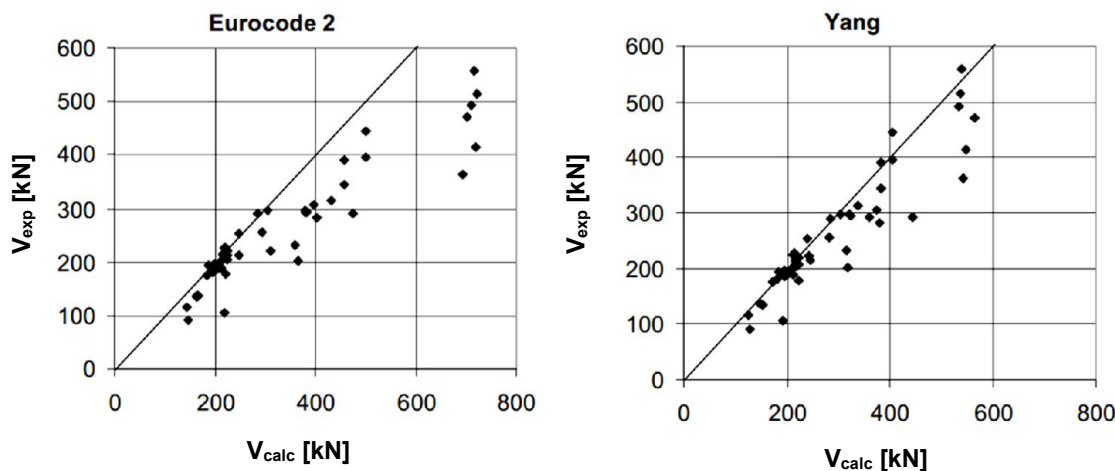
As perdas de protensão foram estimadas em 5 e 15%. Todos os cálculos foram feitos para estes dois valores de perdas como forma de verificar a sensibilidade desta variável na resistência à força cortante por tração diagonal. Pajari concluiu que a resistência é pouco influenciada por esta variação das perdas de protensão.

A resistência à tração do concreto na liberação da protensão foi estimada em 70% daquela obtida pela correlação com a resistência à compressão na data do experimento. Para o cálculo da cortante resistente, Pajari utilizou tanto a resistência média à tração do concreto (f_{ctm}) quanto a resistência inferior ($f_{ct,inf}$) devido à dificuldade de prever essa grandeza,

principalmente no âmbito das lajes alveolares em que o concreto possui uma compactação diferenciada oriunda do processo produtivo por extrusão (vibração da máquina).

Na figura abaixo é apresentada a comparação feita por Pajari entre o EC2 e o modelo de Yang para os 49 experimentos. Nesta comparação foi utilizado o f_{ctm} .

Figura 5.6: Comparação entre EC2 e Yang



(Fonte: Pajari, 2005)

Observa-se que ambos os modelos são deficientes. Mesmo considerando a resistência à tração inferior ($f_{ct,inf}$), as médias das relações V_{exp}/V_{calc} são de 0,79 para o EC2 e 0,96 para Yang.

O modelo de Yang, sem dúvida, é melhor do ponto de vista conceitual, no entanto, mostra-se inseguro (Pajari, 2005) e sua deficiência é potencializada devido ao caráter súbito e frágil da ruptura por tração diagonal o que demanda maior margem de segurança.

Quanto à prática de projetos, o modelo de Yang se mostra mais complexo em relação aos modelos tradicionais. O modelo alternativo de cálculo da resistência à tração diagonal proposto na EN1168: 2008 é mais coerente do ponto de vista de modelos normativos.

Uma quantidade maior de ensaios se faz necessário, principalmente de lajes com alvéolos oblongos. É necessário, além disso, a busca por um modelo simplificado, não simplista, nem sofisticado, para uma melhor representatividade dos resultados experimentais.

A seguir é apresentada uma proposta de melhoria para o cálculo do mecanismo de tração diagonal.

5.4 PROPOSTA DE MELHORIA PARA O CÁLCULO DA TRAÇÃO DIAGONAL

Partindo da conceituação proposta por Yang (1994) sobre a localização do ponto crítico e sobretudo de resultados melhores obtidos em experimentos em lajes com alvéolos circulares em relação as com alvéolos oblongos, propõe-se um coeficiente válido para qualquer tipo de laje, como forma de considerar indiretamente a influência das tensões cisalhantes devido à introdução da protensão. Este coeficiente, denominado de coeficiente β é dado por:

$$\beta = \varphi + \frac{h_{pc} - d'}{h} \leq 1 \quad (5.21)$$

em que,

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;

h_{pc} é a altura do ponto crítico definida para esta proposta como a menor distância da borda inferior até a menor largura da nervura (igual a definição de Yang (1994), ver Figura 5.7);

d' é a distância da borda inferior da laje até o centroide das armaduras inferiores;

h é altura da seção da laje sem capa;

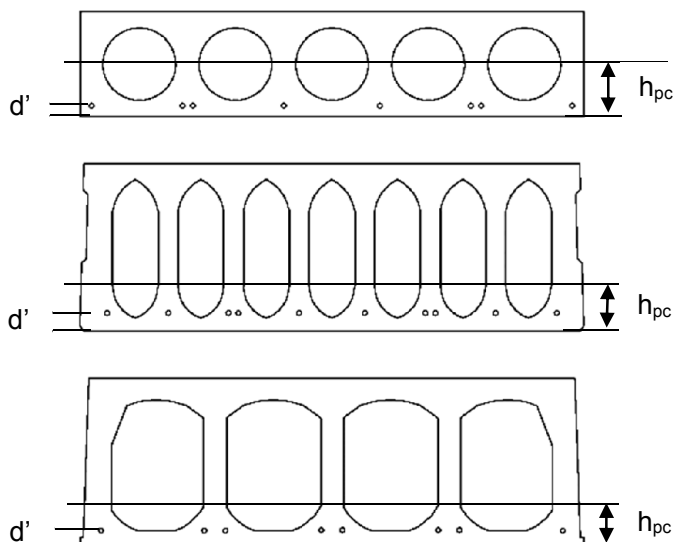
O coeficiente β é aplicado na verificação de seções em que $\alpha < 1$, ou seja, onde a protensão não foi completamente introduzida no concreto, que representa a grande maioria dos casos.

Considerando uma laje com alvéolos circulares em que $h_{pc} = h/2$, assumindo $\varphi = 0,5$ e desprezando d' , tem-se $\beta = 1$. De fato, para lajes com alvéolos circulares os modelos de cálculo tradicionais da tração diagonal possuem boa adequação aos experimentos não necessitando, em primeira instância, de alterações. Considerando agora uma laje com alvéolos oblongos cujas resistências previstas pelos modelos de cálculo tradicionais são superestimadas, onde $h_{pc} = h/5$, assumindo $\varphi = 0,5$ e desprezando d' , tem-se $\beta = 0,7$, indo ao encontro da necessidade de se prever resistências menores.

A introdução de d' no fator β busca penalizar ainda mais a resistência sob a premissa de que à medida que d' é aumentado (necessidade de cobrimentos maiores, por exemplo) as tensões de cisalhamento devido à introdução da protensão também aumentam no ponto

crítico (considerando h_{pc} fixa) e, portanto, resta menor capacidade resistente para as tensões geradas pelos carregamentos externos.

Figura 5.7: Definição da altura do ponto crítico h_{pc}



(Fonte: Próprio autor)

Além da localização do ponto crítico na vertical, faz-se necessário um critério também para a posição longitudinal. Tradicionalmente, as seções analisadas à tração diagonal distam $0,5h$ da face interna do apoio (EC2, ACI318). Yang (1994) propõe a posição do ponto crítico na longitudinal como $h_{pc}/0,7$. Para o caso exemplificado acima em que $h_{pc} = h/5$, pela proposta de Yang, tem-se a seção analisada distando aproximadamente $0,3h$ da face interna do apoio, contrariando o critério tradicional que assume que nesta região as tensões verticais contribuem para a resistência e, portanto, essas seções não precisam ser verificadas. Assim, propõe-se que a seção analisada seja aquela que dista βh da face interna do apoio, sendo β , o mesmo coeficiente apresentado anteriormente e definido na Equação 5.21. A seguir a melhoria proposta é validada com experimentos.

5.5 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

Os mesmos 49 dados presentes em Pajari (2005) são analisados. Detalhes sobre esses experimentos são apresentados no Apêndice C. Como metodologia para a validação da proposta, comparam-se os modelos de tração diagonal presentes nos códigos EC2,

EN1168: 2008 (modelo simplificado) e ACI318: 2011 com a proposta de melhoria aplicada aos modelos tradicionais do EC2 e ACI318.

O modelo de cálculo (sem coeficiente de segurança) do EC2 é apresentado a seguir. Nota-se que, da mesma forma que na flexo-cortante, a variável utilizada para a resistência à tração é o $f_{ct,inf}$, ou seja, $0,7f_{ctm}$. O valor de $f_{ct,inf}$ vem da relação com a resistência à compressão dos corpos de prova apresentados em Pajari (2005). Adota-se, portanto, o critério de que a segurança aplicada ao modelo resistente de projeto é dada pela adoção de valores característicos e do coeficiente γ_c . Qualquer outro fator existente é incorporado ao modelo como fator de ajuste. Assim, além do $f_{ct,inf}$, o valor do comprimento de transferência da protensão é dado por $L_{pt2} = 1,2L_{pt}$, como prescreve o EC2. A quantificação da protensão na seção analisada é feita assumindo uma introdução linear. Assim,

$$V_{calc} = \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct,inf}^2 + \alpha \sigma_{cp} f_{ct,inf}} \quad (5.22)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{L_{pt2}}, \text{ com } L_{pt2} = 1,2L_{pt} \quad (5.23)$$

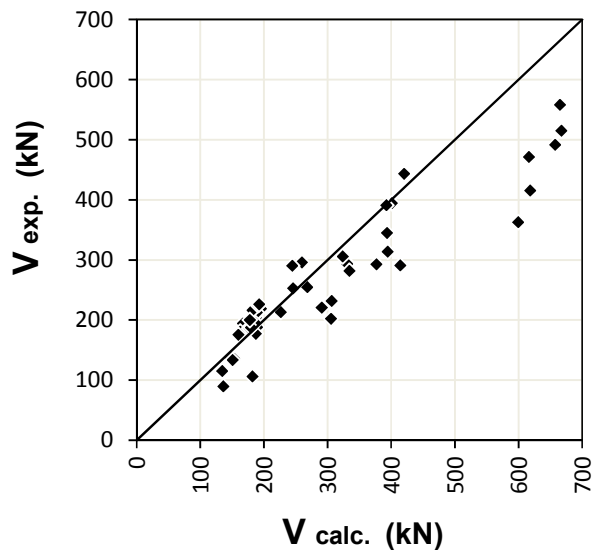
As demais variáveis da equação já foram apresentadas anteriormente. Para o cálculo do L_{pt} , ver Apêndice F. Ressalta-se apenas que a consideração da liberação da protensão é de não gradual. Assim, o valor de L_{pt} é aumentado em 25%.

Para o modelo do EC2 tradicional, a seção analisada foi àquela distando $0,5h$ da face interna do apoio, e na proposta, βh . Todas as outras variáveis foram consideradas iguais. Considerando $\varphi = 0,5$ no cálculo de β (os valores de β podem ser encontrados no Apêndice C), tem-se:

$$V_{calc} = \beta \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct,inf}^2 + \alpha \sigma_{cp} f_{ct,inf}} \quad (5.24)$$

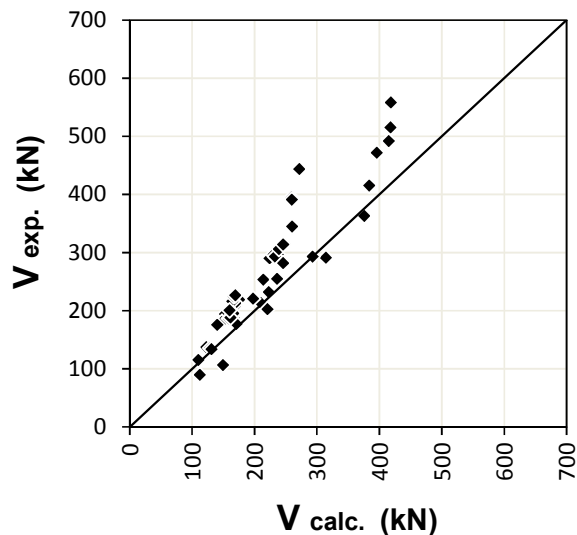
$$\beta = \left(0,5 + \frac{h_{pc} - d'}{h} \right) \leq 1 \quad (5.25)$$

Figura 5.8: Tração diagonal EC2 tradicional



(Fonte: Próprio autor)

Figura 5.9: Tração diagonal Proposta EC2



(Fonte: Próprio autor)

A média de V_{exp}/V_{calc} e o coeficiente de variação (COV) para este conjunto de dados são, respectivamente, de 0,99 e 18% para o EC2 tradicional e 1,19 e 14,4% para a proposta.

Mais adiante, uma análise será feita considerando separadamente lajes com alvéolos circulares e lajes com alvéolos oblongos.

Para o modelo do ACI318: 2011, o coeficiente global de minoração de resistência é retirado e considera-se a resistência à compressão obtida dos corpos de prova dos ensaios para o cálculo a resistência a tração, dada por $0,29\sqrt{f_c}$, já em MPa (esse valor é equivalente ao $f_{ct,inf}$, ou seja, já é um valor inferior para a resistência à tração do concreto). A seguir segue o modelo:

$$V_{calc} = (0,29\sqrt{f_c} + 0,3\alpha\sigma_{cp})bd \quad \text{para lajes com altura de 320 mm ou menores} \quad (5.26)$$

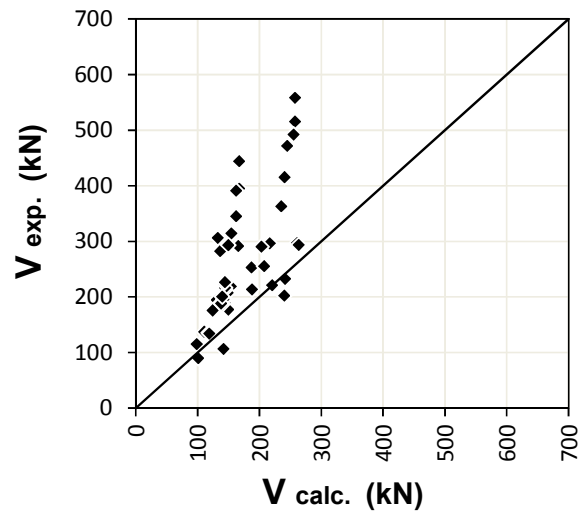
$$V_{calc} = 0,5(0,29\sqrt{f_c} + 0,3\alpha\sigma_{cp})bd \quad \text{para lajes maiores que 320 mm} \quad (5.27)$$

Para o cálculo do comprimento de transferência da protensão, ver Apêndice F. As considerações sobre a seção controle são iguais às feitas para o EC2. Considerando $\varphi = 0,6$ no cálculo de β (os valores de β podem ser encontrados no Apêndice C), tem-se:

$$V_{calc} = \beta(0,29\sqrt{f_c} + 0,3\alpha\sigma_{cp})bd \quad (5.28)$$

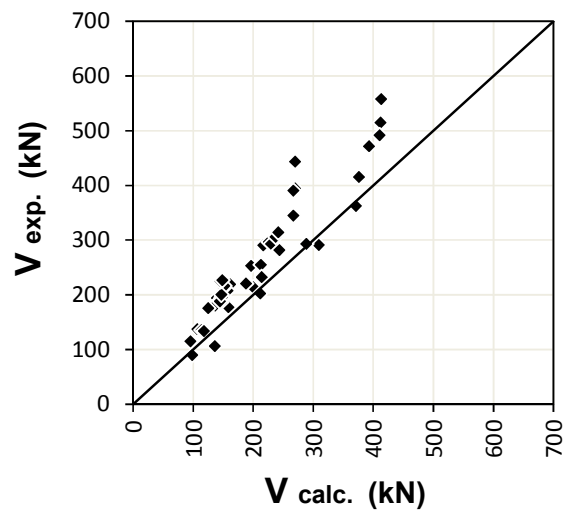
$$\beta = \left(0,6 + \frac{h_{pc} - d'}{h}\right) \leq 1 \quad (5.29)$$

Figura 5.10: Tração Diagonal ACI 318: 2011



(Fonte: Próprio autor)

Figura 5.11: Tração Diagonal Proposta ACI



(Fonte: Próprio autor)

A média de V_{exp}/V_{calc} e o coeficiente de variação para este conjunto de dados é, respectivamente, de 1,52 e 28,6%, para o ACI318: 2011 e 1,26 e 13,7% para a proposta.

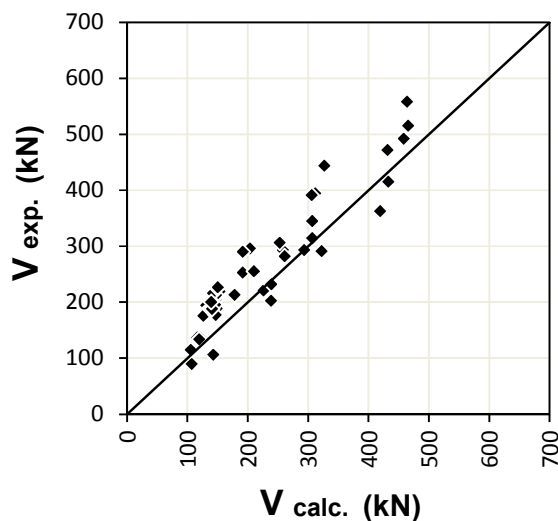
Para efeito de comparação, apresenta-se na sequência o modelo alternativo da euro norma de lajes alveolares (EN1168: 2008) e o gráfico correspondente. Todas as premissas assumidas para o modelo do EC2 são mantidas. Assim, além do valor inferior da resistência à tração e $L_{pt2} = 1,2L_{pt}$ para o modelo, acrescentam-se os coeficientes redutores 0,8 (global) e 0,9 (protensão). Para elementos maiores que 450 mm, um coeficiente multiplicador adicional de 0,9 (global) é aplicado, como prescrito nessa norma. A seção controle foi considerada a 0,5h a partir da face interna do apoio, uma vez que a EN1168 explicita que seções anteriores a esta não precisam ser verificadas.

$$V_{calc} = 0,8 \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct,inf}^2 + 0,9\alpha\sigma_{cp}f_{ct,inf}} \quad \text{para lajes com altura de 450 mm ou menores} \quad (5.30)$$

$$V_{calc} = 0,72 \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct,inf}^2 + 0,9\alpha\sigma_{cp}f_{ct,inf}} \quad \text{para lajes maiores que 450 mm} \quad (5.31)$$

A média de V_{exp}/V_{calc} e o COV para este conjunto de dados são de 1,28 e 16,7%.

Figura 5.12: Tração Diagonal EN1168:2008 alternativa



(Fonte: Próprio autor)

Atenção especial é dada para o experimento 40.200 (Tabela C.1, Apêndice C) que possui V_{exp} igual a 106,45 kN. Se comparado com o experimento 63.200, que possui a mesma

altura, 200 mm, o somatório das nervuras igual a 262 mm (contra 293 mm do experimento 40.200), resistência à compressão de 56,2 MPa (contra 76,5 MPa) e rompe com V_{exp} igual a 137,5 kN (valor aproximadamente 30% maior) pode-se suspeitar da confiabilidade do experimento 40.200, que apresenta relação V_{exp}/V_{calc} menor que 0,8 em todos os modelos de cálculo analisados. Pajari (2005) faz uma ressalva sobre esse experimento analisando os dados com e sem ele.

A tabela a seguir apresenta o resumo dos parâmetros estatísticos separando entre lajes com alvéolos circulares e oblongos. O experimento 40.200 (alvéolo circular) é aqui descartado. Ressalta-se a importância de se avaliar lajes com alvéolos circulares separadamente das lajes com alvéolos não circulares.

Tabela 5.1: Resumo dos parâmetros estatístico dos modelos analisados para V_{exp}/V_{calc}

Alvéolos	nº de exp.		EC2	Proposta EC2	ACI	Proposta ACI	EN1168
Circulares	28	μ	1,09	1,18	1,35	1,30	1,39
		σ	0,13	0,12	0,15	0,14	0,17
		COV	12,2%	10,5%	11,5%	10,4%	12,4%
Oblongos	20	μ	0,87	1,21	1,81	1,23	1,14
		σ	0,13	0,20	0,53	0,18	0,15
		COV	14,5%	16,3%	29,6%	14,9%	12,9%
Total	48	μ	1,00	1,20	1,54	1,27	1,29
		σ	0,17	0,16	0,43	0,16	0,20
		COV	17,1%	13,2%	27,6%	12,6%	15,7%

μ = média; σ = desvio padrão; COV = coeficiente de variação;

(Fonte: Próprio autor)

Quanto ao EC2, nota-se bom desempenho em relação às lajes com alvéolos circulares, o que é esperado já que o ponto crítico está localizado aproximadamente a meia altura da laje, onde a largura da nervura é mínima. Para os casos de lajes com alvéolos não circulares o desempenho é inaceitável, com média de 0,87.

O ACI318 possui um desempenho bom para as lajes com alvéolos circulares com uma média de 1,27, mais seguro que a proposta do EC2. Já para alvéolos oblongos, a média de 1,81 é antieconômica e o COV de 29,6% reflete um modelo de cálculo insatisfatório. Esses valores ocorrem devido à consideração da metade da resistência para lajes com alturas maiores que 320 mm. Como em geral, as lajes com alvéolos circulares variam de 150 mm até 320 mm por questões de fabricação, lajes fora deste intervalo possuem alvéolos oblongos e, portanto, sofrem a penalização do ACI.

A EN1168: 2008 possui um desempenho melhor que o EC2 e o ACI318 para esse conjunto de dados analisado. No entanto, a média entre as lajes com alvéolos circulares, 1,39, difere consideravelmente da média das outras lajes, 1,14. Na medida do possível, uma uniformização destes valores é necessária. Essa diferença advém da utilização de minoradores fixos para todas as tipologias de lajes, tanto com alvéolos circulares quanto não circulares.

Quanto às propostas tanto para o EC2 quanto para o ACI318, as médias para as duas tipologias de alvéolos possuem boa uniformidade. O COV total da ordem de 13% é o menor para esta análise com evidência superlativa na comparação do ACI318 e sua proposta.

O comportamento à força cortante de um pavimento de lajes alveolares difere de um com laje maciça. Neste último, e para elementos armados, a média de V_{exp}/V_{calc} pela norma brasileira NBR6118 para o mecanismo flexo-cortante é da ordem de 1,08 com COV da ordem de 14% (MARQUESI et al, 2014). Esses valores são considerados suficientes uma vez que, para este estado limite último espera-se que os esforços migrem de regiões “mais fracas” para regiões “mais fortes”, ou seja, as faixas de lajes idealizadas no cálculo (geralmente de 1 m) não rompem independentemente, situação esta, usualmente representada pelos valores obtidos em laboratório. Quanto às lajes alveolares, apesar das chavetas (chave de cisalhamento formada pelo preenchimento das juntas longitudinais entre as lajes quando da concretagem da capa estrutural), entende-se que esse efeito é atenuado pela ortotropia principalmente nas lajes altas, onde a proporção da altura da capa em relação à altura da laje é menor. Partindo deste pressuposto, a segurança à força cortante para lajes alveolares deve ser maior. Adicionalmente, a ruptura por tração diagonal pode ser considerada ainda mais frágil que a do mecanismo da flexo-cortante. Desta forma, justificam-se as médias dos modelos de cálculo melhorados possuírem valores da ordem de 1,20 com COV da ordem de 13%. Análises posteriores com mais dados e quantificando a probabilidade de ruptura são desejáveis.

No âmbito nacional, como mencionado no capítulo 3, a única formulação existente na NBR14861 refere-se à flexo-cortante. Com a utilização crescente de lajes mais altas no país, as diferenças de um modelo para o outro ficam mais significativas conduzindo a situações excessivamente seguras, considerando lajes com o mínimo de qualidade exigido por norma. No entanto, o que ainda se vê no Brasil como um todo é uma não uniformidade nos quesitos básicos de qualidade do produto laje alveolar. Ações corretivas e preventivas vem sendo tomadas pelos fabricantes e espera-se que dentro em breve a qualidade deste produto possa

ser uniformizada e a otimização do cálculo para força cortante possa ser implementada a nível normativo.

Posto isto, apresenta-se a seguir a análise dos dados considerando a formulação da NBR14861 (flexo-cortante) e uma proposta para o mecanismo de tração diagonal. Esta análise é feita principalmente como forma de se comparar a diferença entre os dois mecanismos. A validação da proposta não é plena, pois dados de lajes brasileiras precisariam ser analisados e este banco de dados ainda está incipiente.

O modelo da NBR14861 é apresentado a seguir.

$$V_{calc} = 0,25 f_{ct,inf} (1,6 - d)(1,2 + 40\rho)bd + 0,15\sigma_{cp}bd \quad (5.32)$$

$$f_{ct,inf} = 0,21\sqrt[3]{f_c^2} \quad \text{para } f_c \leq 50 \text{ MPa} \quad (5.33)$$

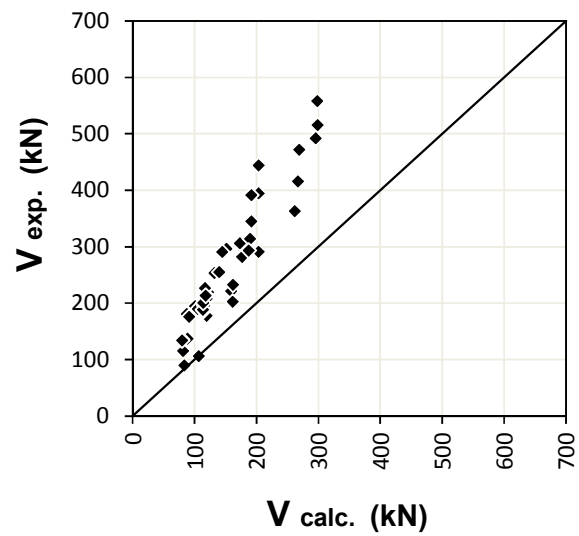
$$f_{ct,inf} = 0,7.2,12 \ln(1,8 + 0,1f_c) \quad \text{para } f_c > 50 \text{ MPa} \quad (5.34)$$

Para a proposta da NBR14861, a única diferença entre a proposta de melhoria para a equação do EC2 se dá pelo comprimento de transferência da protensão. A NBR14861 fixa o comprimento necessário para que toda a força de protensão seja transmitida ao concreto, em 85ϕ como valor de projeto e, portanto 60ϕ sem coeficiente de segurança (no caso 1,4). Esse valor fornece uma boa aproximação para lajes brasileiras em que a protensão é, em geral, maior que as europeias e a resistência do concreto no saque é geralmente menor. Assim, a utilização deste valor na comparação com os dados europeus aqui analisados seria inconsistente. Adotou-se, portanto, a formulação da NBR6118 para o cálculo do comprimento de transferência da protensão. Esta formulação considera variáveis como a resistência à tração do concreto no saque, o nível de protensão além da bitola da cordoalha (ver Apêndice F). Assim, a proposta fica:

$$V_{calc} = \beta \frac{bI_y}{S_y} \sqrt{f_{ct}^2 + \alpha\sigma_{cp}f_{ct}} \quad (5.35)$$

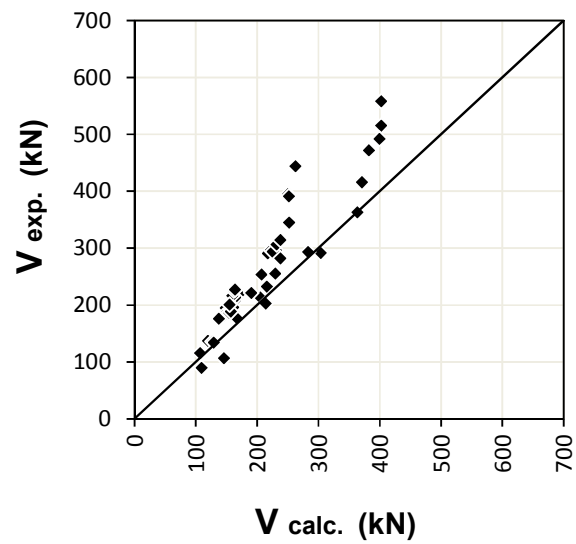
$$\beta = \left(0,5 + \frac{h_{pc} - d'}{h} \right) \leq 1 \quad (5.36)$$

Figura 5.13: NBR14861 (Flexo-Cortante)



(Fonte: Próprio autor)

Figura 5.14: Proposta Tração Diagonal NBR14861



(Fonte: Próprio autor)

A média de V_{exp}/V_{calc} e o COV para NBR14861 são de 1,75 e 11%, respectivamente. Já para a proposta, 1,22 e 14,5%.

A seguir apresenta-se a comparação entre as propostas separando as lajes pelo tipo de alvéolos e retirando o experimento 40.200.

Tabela 5.2: Parâmetros estatístico das propostas para V_{exp}/V_{calc}

Alvéolos	nº de exp.		Proposta EC2	Proposta ACI	Proposta NBR 14861
Circulares	28	μ	1,18	1,30	1,22
		σ	0,12	0,14	0,13
		COV	10,5%	10,4%	10,6%
Oblongos	20	μ	1,21	1,23	1,26
		σ	0,20	0,18	0,20
		COV	16,3%	14,9%	16,3%
Total	48	μ	1,20	1,27	1,23
		σ	0,16	0,16	0,16
		COV	13,2%	12,6%	13,3%

μ = média; σ = desvio padrão; COV = coeficiente de variação

(Fonte: Próprio autor)

A proposta para a NBR14861 possui uma média ligeiramente maior que o EC2 devido ao comprimento de transferência do EC2 ser menor. Do ponto de vista de segurança, isso é razoável uma vez que o coeficiente γ_c é igual a 1,4 nas normas brasileiras enquanto que no EC2 é de 1,5.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

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

6.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

O programa experimental apresentado neste trabalho englobou duas etapas: Etapa A e Etapa B. Na primeira etapa foram realizados 9 experimentos, sendo 8 aqui analisados. O experimento não apresentado foi um ensaio de flexão que devido a problemas técnicos não foi completado.

Todas as lajes alveolares da Etapa A são de uma mesma pista de protensão e, portanto, possuem as mesmas características como resistência do concreto, tipo e número de cordoalhas, nível de protensão e dimensões. Todas possuem nominalmente 26,5 cm de altura e foram cortadas com 6 metros de comprimento. De igual forma, as lajes da Etapa B possuem sempre as mesmas características entre si, possuindo altura nominal de 26 cm e também 6 m de comprimento. Nesta etapa, 6 lajes foram ensaiadas sendo que duas delas foram ensaiadas nas duas extremidades, portanto, 8 experimentos constituem a Etapa B.

As lajes serão denominadas de forma geral como Lajes A e Lajes B ou de forma específica pela seguinte nomenclatura: LAXX-C-Y. Os quatro primeiros caracteres referem-se à numeração das lajes alveolares: laje alveolar número XX. O caractere seguinte refere-se à tipologia do ensaio, sendo C referência à força cortante. E por fim, a última letra refere-se à etapa do programa experimental, A ou B.

A preparação dos experimentos consistiu primeiramente na medição das características geométricas das lajes, tais como, altura (h_i) e largura das nervuras (b_i), distância do centro das cordoalhas até a borda inferior das lajes (d'_i), comprimento das lajes, largura total e dimensões dos alvéolos (esta última apenas nas Lajes B). Não houve nenhuma característica das lajes que levou ao seu descarte, como por exemplo, escorregamento significativo das cordoalhas ou fissuras nas nervuras. Os escorregamentos das cordoalhas das Lajes A não superaram 1 mm e os das Lajes B não foram maiores que 0,5 mm.

Figura 6.1: Medição realizada com paquímetro na seção transversal da laje



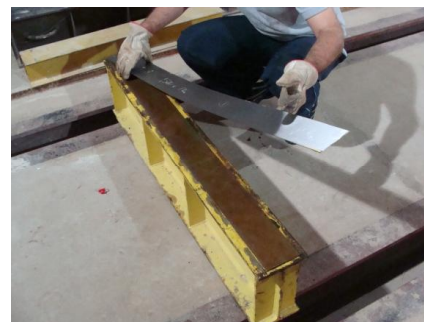
(Fonte: Próprio autor)

Foram feitas marcações nas lajes alveolares para possibilitar o seu posicionamento em relação aos apoios e ao atuador. Para isso foram utilizados esquadro, trena e pincel atômico. Para o apoio das lajes, foram utilizadas vigas metálicas enrijecidas, sobre as quais foram colocadas duas chapas metálicas, com uma camada inicial de graxa de aproximadamente 3 mm entre elas. A finalidade da graxa é mitigar uma possível restrição horizontal nos apoios.

Figura 6.2: Preparação do apoio para a lajes



a) aplicação de graxa na chapa inferior

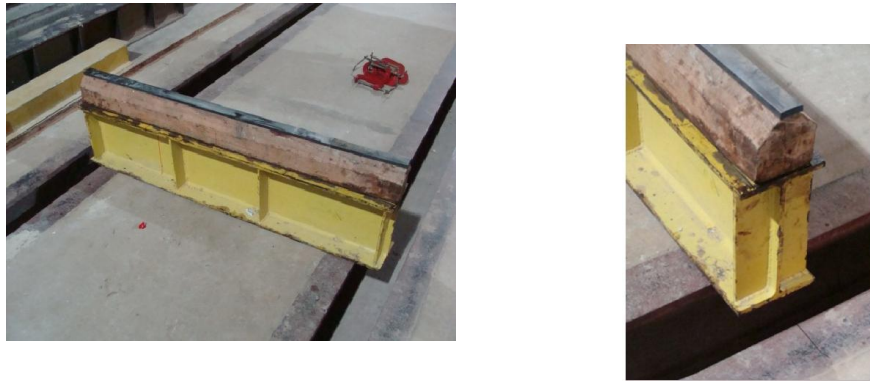


b) posicionamento da chapa superior

(Fonte: Próprio autor)

Sobre as chapas metálicas, colocou-se uma viga de madeira com a parte superior chanfrada, e sobre ela, uma tira de elastômero, como mostra a Figura 6.3.

Figura 6.3: Apoios para os ensaios das lajes alveolares



(Fonte: Próprio autor)

Após o posicionamento dos apoios de acordo com o esquema estrutural de cada ensaio, colocaram-se as vigas de transmissão de carga sobre a laje. Em algumas regiões da superfície das lajes, utilizou-se massa plástica ou areia úmida para regularizar a área de contato com as vigas.

Figura 6.4: Regularização da superfície das lajes na região de contato com a viga de transmissão



a) com areia úmida

b) com massa plástica

(Fonte: Próprio autor)

Entre as vigas de transmissão e as células de carga, foram colocadas rótulas para evitar possíveis excentricidades e chapas metálicas para ajuste da altura quando necessário.

Figura 6.5: Vigas de transmissão, rótulas e chapas metálicas posicionadas



(Fonte: Próprio autor)

Após a preparação do ensaio, aplicou-se uma pré-carga de aproximadamente 2,0 kN para acomodação da viga de transmissão de carga. A taxa de aplicação de carga durante o ensaio foi de aproximadamente 50 kN/min.

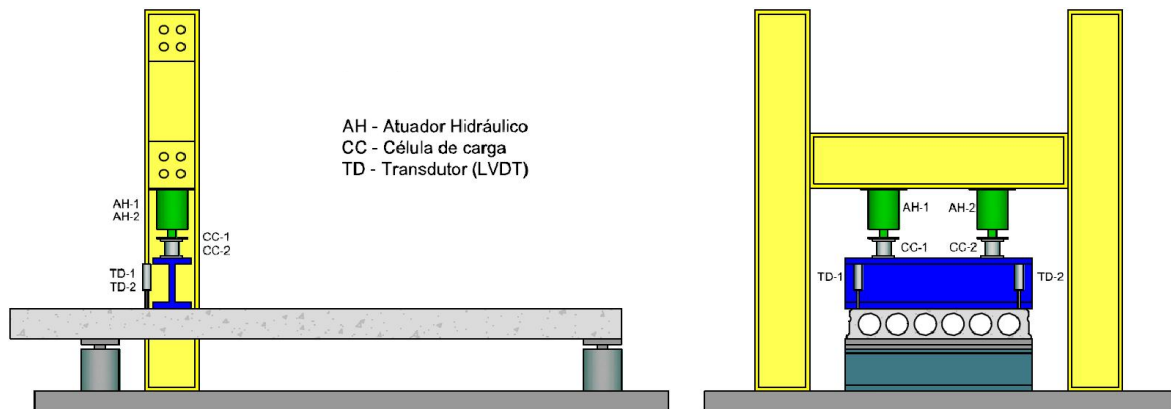
6.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para os ensaios da Etapa A utilizaram-se dois atuadores hidráulicos de 500 kN de capacidade da marca ENERPAC e um, da mesma marca, mas com 1000 kN, para a Etapa B. Uma bomba manual foi utilizada para alimentar os atuadores. Dois transdutores (LVDT – *Linear Variable Differential Transducers*) foram posicionados na linha de atuação da carga, ou imediatamente ao lado, para aferição dos deslocamentos ao longo do ensaio. Detalhe do um transdutor é apresentado na figura a seguir. Sobre a laje fixaram-se chapas metálicas para não haver interferência da sua rugosidade na medição dos deslocamentos. Duas células de carga, ambas de 500 kN, foram utilizadas para fornecer leituras das forças aplicadas na Etapa A e uma de 1000 kN, na Etapa B.

Figura 6.6: Transdutor (LVDT) para medição de deslocamentos



(Fonte: NETPRE)

Figura 6.7: Esquema geral da instrumentação utilizada nos ensaios de força cortante

(Fonte: Próprio autor)

Para a aquisição dos dados foi utilizado o System 5000. Nele foram conectados os cabos de todos os instrumentos utilizados nos ensaios permitindo a transferência das leituras feitas para o computador.

Figura 6.8: Sistema de aquisição de dados

(Fonte: NETPRE)

6.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

As lajes apresentadas neste trabalho foram fornecidas por duas empresas por meio da ABCIC (Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto). A seguir são apresentadas as nomenclaturas específicas e as características dos modelos.

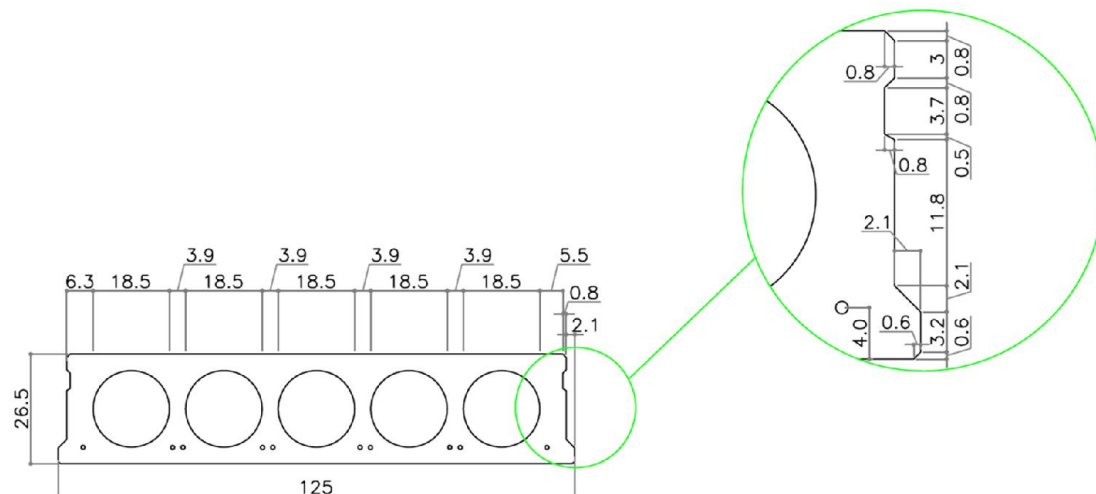
6.3.1 Lajes A

Tabela 6.1: Nomenclaturas e características das Lajes A

	h_{nominal} (cm)	$b_{w,\text{nominal}}$ (cm)	Armadura inferior	F_p inicial inferior (kN)	$f_{c,\text{saque}}$ (Mpa)	f_c (Mpa)
LA02-C-A	26,5	28	10 ϕ 12,7	124,5	25	45
LA03-C-A						
LA04-C-A						
LA05-C-A						
LA06-C-A						
LA07-C-A						
LA08-C-A						
LA09-C-A						

(Fonte: Próprio autor)

Figura 6.9: Seção transversal nominal das Lajes A



(Fonte: Próprio autor)

Na Figura 6.9 acima é apresentada a seção transversal nominal ou de projeto das lajes alveolares utilizadas na Etapa A. A Figura 6.10 apresentada a seção transversal real de uma das lajes ensaiadas. Notam-se algumas diferenças na geometria em relação à seção de projeto, a citar, irregularidades nos alvéolos e, portanto, na espessura das nervuras e diferenças de posicionamento das cordoalhas tanto em relação à borda inferior quanto em relação ao eixo da nervura. Distâncias como altura e larguras mínimas das nervuras e distâncias do centro das cordoalhas até a borda inferior foram aferidas e são apresentadas no Apêndice D. Os valores médios destas grandezas para cada laje são utilizados nos cálculos do capítulo seguinte.

Figura 6.10: Seção transversal LA06-C-A



(Fonte: Próprio autor)

Como para as Lajes A, as diferenças de geometria podem ser consideradas aceitáveis, grandezas como área da seção transversal, inércia e momento estático em relação ao centroide da seção foram calculados a partir da seção nominal.

Tabela 6.2: Características geométricas das Lajes A

	h (cm)	d' (cm)	d (cm)	Σb_w (cm)	e_p (cm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	S (cm ³)	y_i (cm)
LA02-C-A	26,63	4,34	22,29	31,41	8,96	1869	160457,6	8038,8	13,3
LA03-C-A	26,62	4,48	22,14	30,11	8,82				
LA04-C-A	26,92	4,64	22,28	29,91	8,66				
LA05-C-A	26,78	4,41	22,37	30,25	8,89				
LA06-C-A	26,64	4,58	22,06	30,25	8,72				
LA07-C-A	26,45	4,61	21,84	31,66	8,69				
LA08-C-A	26,41	4,45	21,96	30,00	8,85				
LA09-C-A	26,43	4,38	22,05	30,00	8,92				

(Fonte: Próprio autor)

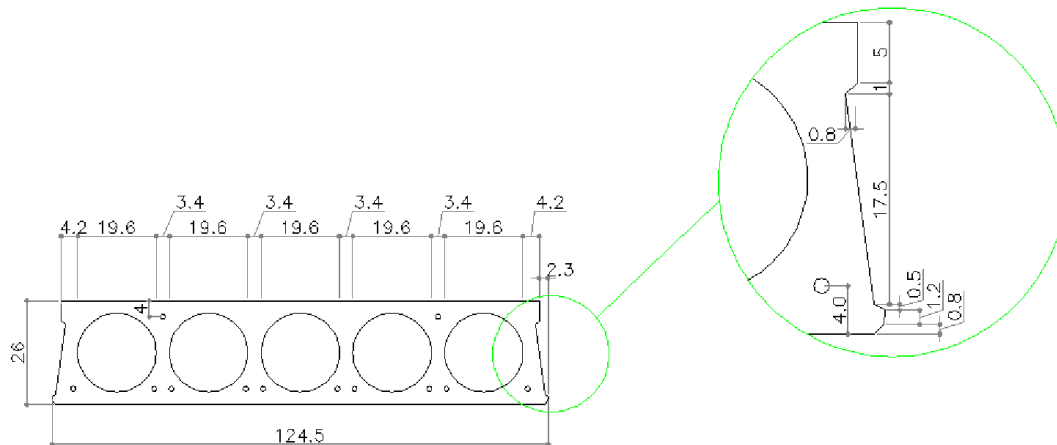
6.3.2 Lajes B

Tabela 6.3: Nomenclaturas e características das Lajes B

	h_{nominal} (cm)	$b_{w,\text{nominal}}$ (cm)	Armadura inferior	Armadura superior	F_p inicial inferior (kN)	F_p inicial superior (kN)	$f_{c,\text{saque}}$ (Mpa)	f_c (Mpa)
LA01-C-B	26	22	10 ϕ 12,7	2 ϕ 9,5	144,1	81	35	55
LA02-C-B-a								
LA02-C-B-b								
LA03-C-B-a								
LA03-C-B-b								
LA04-C-B								
LA05-C-B								
LA06-C-B								

(Fonte: Próprio autor)

Figura 6.11: Seção transversal nominal das Lajes B



(Fonte: Próprio autor)

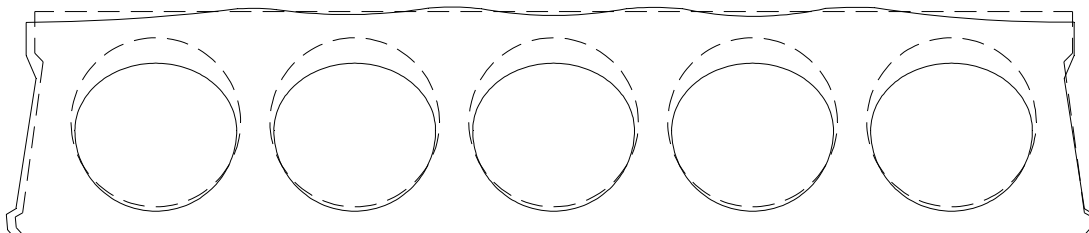
Na Figura 6.11 acima é apresentada a seção transversal nominal das lajes alveolares utilizadas na Etapa B. A Figura 6.12 apresentada a seção transversal real de uma das lajes ensaiadas. Notam-se diferenças significativas na geometria em relação à seção de projeto, a citar, alvéolos achatados e, portanto, engrossamento na espessura da flange superior das lajes, além de alturas das nervuras proeminentes em relação à borda superior. Distâncias como altura e larguras mínimas das nervuras e distâncias do centro das cordoalhas até a borda inferior foram aferidas, assim como as dimensões dos alvéolos, e são apresentadas no Apêndice D. Os valores médios destas grandezas para cada laje são utilizados nos cálculos do capítulo seguinte e as características como área da seção, inércia e momento estático em relação ao centroide da seção foram obtidos de uma seção construída com os valores médios das grandezas medidas.

Figura 6.12: Seção transversal LA03-C-B

(Fonte: Próprio autor)

A Figura 6.13 apresenta a seção construída sobreposta à seção nominal (tracejada). As diferenças mais significativas estão na flange superior da laje. Os alvéolos também estão ligeiramente deslocados para baixo, que, associado ao seu achatamento, provocaram um aumento das larguras das nervuras.

A área e a inércia nominais são de 1627 cm^2 e 141394 cm^4 , respectivamente, enquanto que as da seção construída são de 1840 cm^2 e $155441,5 \text{ cm}^4$. Um aumento de 13% para a área e 10% para a inércia. O centro de gravidade da seção, medido a partir da borda inferior possui valor nominal de $12,84 \text{ cm}$ enquanto que na seção construída, $13,61 \text{ cm}$.

Figura 6.13: Seção transversal construída considerando os valores médios das grandezas medidas

(Fonte: Próprio autor)

Tabela 6.4: Características geométricas das Lajes B

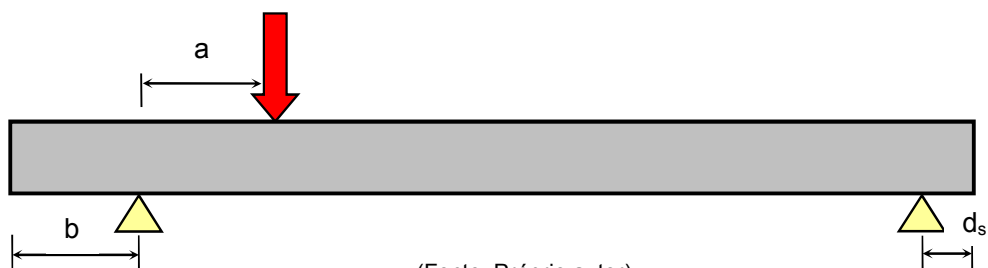
	h (cm)	d' (cm)	d (cm)	Σb_w (cm)	e_p (cm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	S (cm ³)	y_i (cm)
LA01-C-B	25,96	3,2	22,76	26,21	10,70	1840	155441,5	7962,6	13,9
LA02-C-B-a	26,64	2,93	23,71	23,9	10,97				
LA02-C-B-b	26,64	2,93	23,71	23,9	10,97				
LA03-C-B-a	26,71	2,81	23,9	25,1	11,09				
LA03-C-B-b	26,71	2,81	23,9	25,1	11,09				
LA04-C-B	25,88	2,98	22,9	26,4	10,92				
LA05-C-B	25,72	2,86	22,86	27,15	11,04				
LA06-C-B	26,45	3,12	23,33	26,45	10,78				

(Fonte: Próprio autor)

6.4 ESQUEMAS DOS ENSAIOS

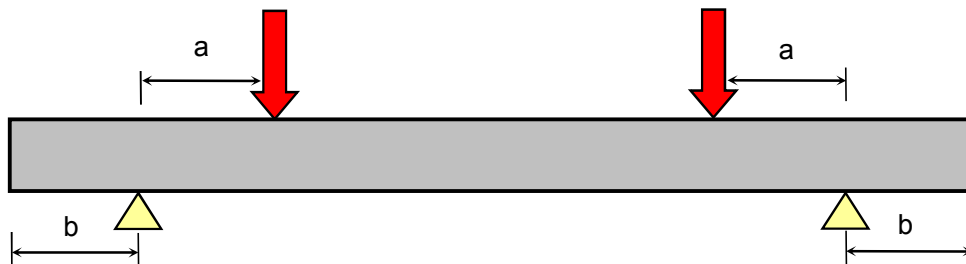
A seguir apresentam-se as informações dos esquemas dos ensaios. A Figura 6.14 mostra o esquema geral e na Figura 6.15 é mostrado o esquema do ensaio LA-01-C-B. Na Tabela 6.5 possui os valores de a , b e d_s para cada laje ensaiada. Todas as lajes possuem 600 cm de comprimento com variação de $\pm 0,5$ cm. Essa variação foi desprezada.

Figura 6.14: Esquema geral dos ensaios



(Fonte: Próprio autor)

Figura 6.15: Esquema do ensaio LA-01-C-B



(Fonte: Próprio autor)

Tabela 6.5: Características dos esquemas dos ensaios

	a (cm)	b (cm)	d _s (cm)
LA02-C-A	66,25	13	40
LA03-C-A	66,25	6,35	50
LA04-C-A	66,25	19	40
LA05-C-A	66,25	31,75	20
LA06-C-A	66,25	44,5	10
LA07-C-A	66,25	63,5	10
LA08-C-A	66,25	89	10
LA09-C-A	66,25	108	10
LA01-C-B	140	75	-
LA02-C-B-a	66,25	13	50
LA02-C-B-b	130	5	100
LA03-C-B-a	66,25	25	50
LA03-C-B-b	130	13	95
LA04-C-B	66,25	40	70
LA05-C-B	66,25	50	60
LA06-C-B	66,25	60	50

(Fonte: Próprio autor)

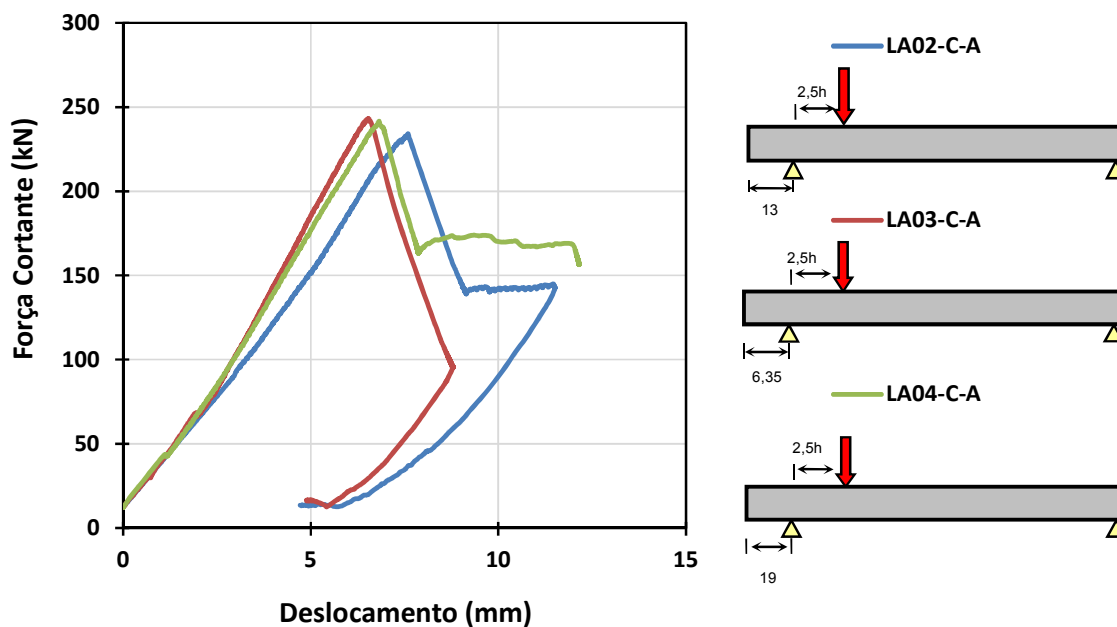
7. RESULTADOS E ANÁLISES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

7.1 LAJES A

7.1.1 RESULTADOS

Primeiramente, apresentam-se as curvas de força cortante pelo deslocamento medido já considerando o peso próprio da laje e dos aparatos de ensaio. Maiores detalhes sobre os ensaios são apresentados no Apêndice G. Nas figuras a seguir, a indicação do comprimento de apoio está em centímetros e h se refere à altura da laje, também em cm.

Figura 7.1: Força cortante vs. deslocamento: LA02, LA03 e LA04



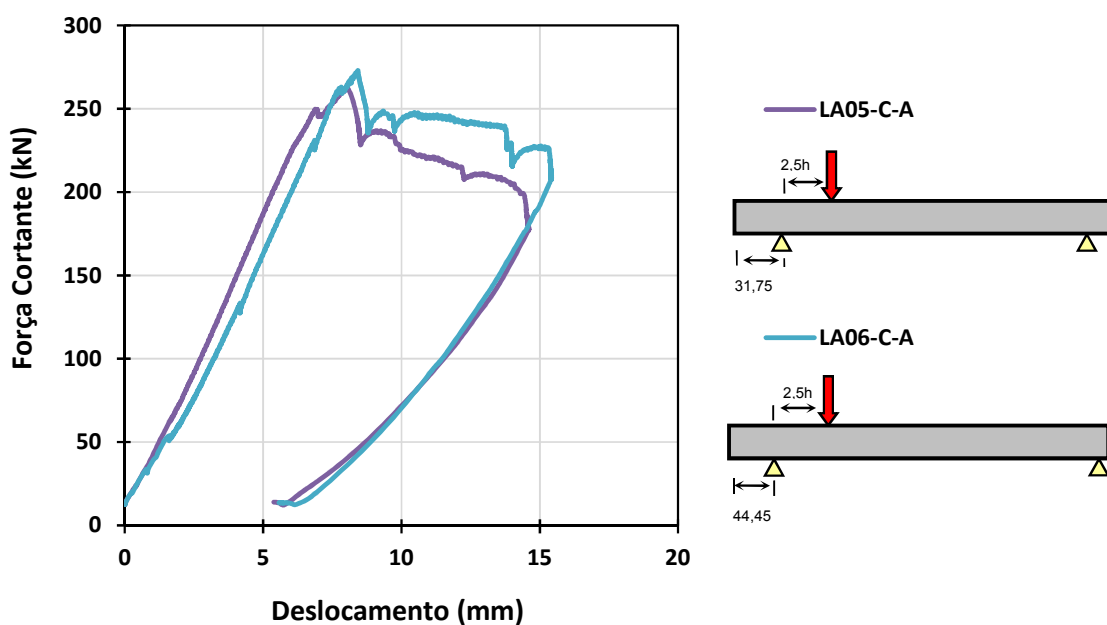
(Fonte: Próprio autor)

Todas as rupturas das Lajes A foram por tração diagonal. As lajes LA02, LA03 e LA04 tiveram comportamentos semelhantes mesmo havendo alteração no comprimento do apoio.

As lajes LA-05 e LA-06, por sua vez, com comprimentos de apoio de 31,75 e 44,45, respectivamente, resistiram mais que as anteriores.

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.

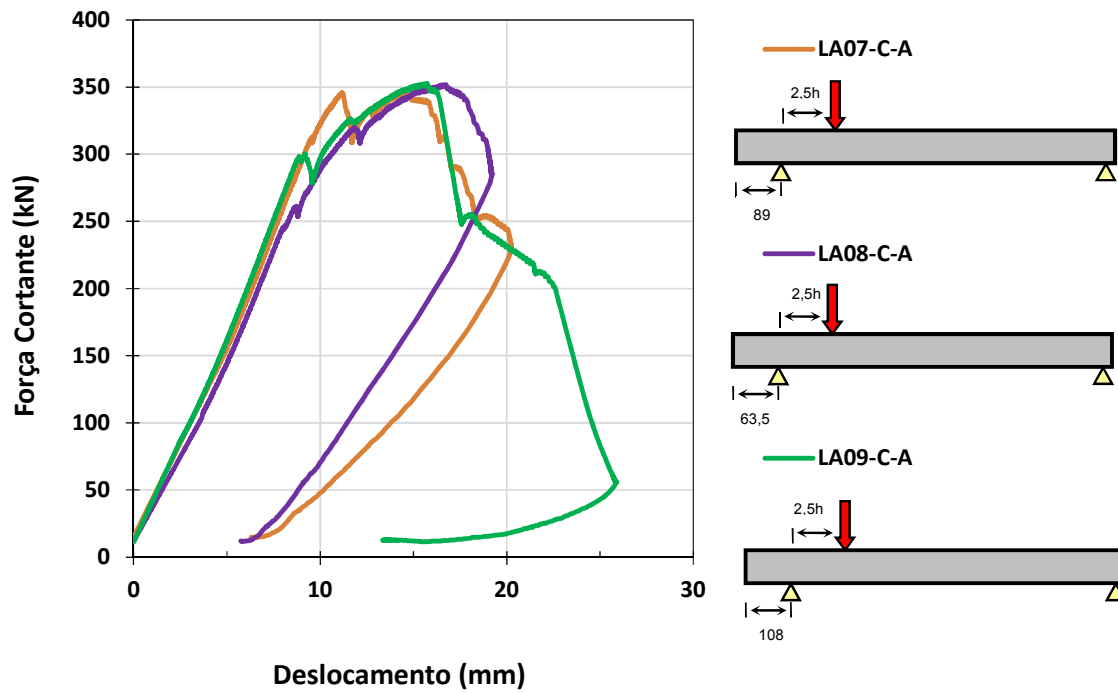
Figura 7.2: Força cortante vs. Deslocamento: LA05 e LA06



(Fonte: Próprio autor)

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.

Figura 7.3: Força cortante vs. Deslocamento: LA07, LA08 e LA09



(Fonte: Próprio autor)

A seguir, apresentam-se ilustrações das lajes antes e após o ensaio.

Figura 7.4: Laje LA04 e sua ruptura



(Fonte: Próprio autor)

Figura 7.5: Laje LA06 e sua ruptura

(Fonte: Próprio autor)

Figura 7.6: Laje LA09 e sua ruptura

(Fonte: Próprio autor)

A figura que ilustra a ruptura da LA09 mostra a fissura partindo inclinada do apoio e tendendo a ficar horizontal. Com o carregamento já elevado, uma fissura na parte superior da laje ocorreu. Ruptura semelhante a esta aconteceu nas lajes LA07 e LA08.

No mecanismo de tração diagonal não se observa fissuras de flexão nem escorregamentos de cordoalhas antes da fissura característica (inclinada com ângulo variando de 30 a 35 graus, para essas lajes). Observou-se que após essa fissura, as cordoalhas sofrem um escorregamento da ordem de 5 mm nas lajes ensaiadas com comprimentos de apoio curtos (LA02, LA03 e LA04). Para as lajes com esse comprimento maior, menores escorregamentos são notados e sugere-se que um mecanismo pós-fissura crítica seja mobilizado principalmente por causa da boa condição de ancoragem. Observa-se que nas curvas de força cortante por deslocamento apresentadas, as lajes com maiores

comprimentos de apoio conseguem reestabelecer o nível de carregamento, sendo inclusive superior, após quedas súbitas de carga, interpretadas como rupturas de nervuras.

Os resultados experimentais foram comparados com modelos de cálculo para tração diagonal apresentados ao longo deste trabalho. Portanto, EC2, EN1168 e ACI318 foram utilizados. Além destes, e apesar de se tratar de flexo-cortante, o modelo da NBR14861 foi utilizado para demonstrar a disparidade existente quando se compara o resultado de um fenômeno físico com uma formulação desenvolvida para representar outro. Adicionalmente, o modelo para tração diagonal proposto no capítulo 5 para a NBR14861 foi utilizado e será referido como “Proposta”.

Para os modelos de tração diagonal, as seções analisadas são aquelas que distam $h/2$ da face interna do apoio, sendo h a altura da laje. O único modelo que considerou uma seção diferente a essa foi a Proposta, onde a seção controle é definida como βh da face interna do apoio. Para as Lajes A, o valor médio de β é de 0,83 quando a seção controle fica dentro do comprimento de transferência da protensão (L_{pt}). Para outros casos, considera-se $\beta=1$, como nas lajes LA07, LA08 e LA09 em que as seções controles ficaram além do L_{pt} devido ao grande comprimento de apoio. A variação do β nas Lajes A se deve as pequenas variações existentes no d' .

A Tabela 7.1 apresenta para as Lajes A, a seção controle, $x=b+\beta h$ onde x é o eixo longitudinal que parte da extremidade da laje e b é o comprimento do apoio, e o coeficiente α definido como a proporção da protensão introduzida nessa seção. Os valores de α apresentados abaixo consideram o comprimento de transferência da protensão calculado pela formulação presente na NBR6118 considerando liberação não gradual da protensão.

Tabela 7.1: Seção controle para Proposta e respectivas perdas de protensão

Lajes A	$x = b + \beta h$ (cm)	α	$t_{\text{médio}}$ (dias)	Perdas (%)		σ_{cp} (Mpa)	$\alpha \cdot \sigma_{cp}$ (Mpa)
				Iniciais	Finais		
LA02-C-A	35	0,40	160	4,54	13,99	5,73	2,29
LA03-C-A	28	0,32		3,98	12,36	5,84	1,87
LA04-C-A	41	0,47		5,03	15,39	5,64	2,64
LA05-C-A	54	0,62		6,07	18,41	5,43	3,35
LA06-C-A	65	0,74		6,95	20,97	5,26	3,91
LA07-C-A	89	0,87		7,84	23,53	5,09	4,42
LA08-C-A	115	1,00		8,77	26,23	4,91	4,91
LA09-C-A	134	1,00		8,77	26,23	4,91	4,91

(Fonte: Próprio autor)

As perdas foram calculadas conforme Apêndice E. O tempo final foi considerado como o tempo médio até a data dos ensaios ($t_{\text{médio}}$). Como a metodologia dos experimentos variou o comprimento de apoio, e por consequência a seção controle, as perdas de protensão variaram de modelo para modelo. Na Tabela 7.1, estão apresentadas as perdas iniciais e finais. Vale ressaltar que dentre as perdas iniciais, ancoragem, relaxação e perdas por deformação imediata do concreto, a parcela mais significativa foi essa última. No tocante às perdas finais (data do ensaio) por relaxação, retração do concreto e fluência, a parcela mais significativa foi a da fluência. Isso está diretamente relacionado com o alto nível de protensão aplicado nestas lajes. Ainda na Tabela 7.1, as duas últimas colunas apresentam as tensões de compressão no concreto (σ_{cp}) corrigida pelas perdas finais e ao lado, ponderadas pelo coeficiente α .

A tabela a seguir apresenta os valores experimentais da força cortante e as seções controle medidas a partir da extremidade da laje. b é o comprimento do apoio.

Tabela 7.2: Seções controle e V_{exp}

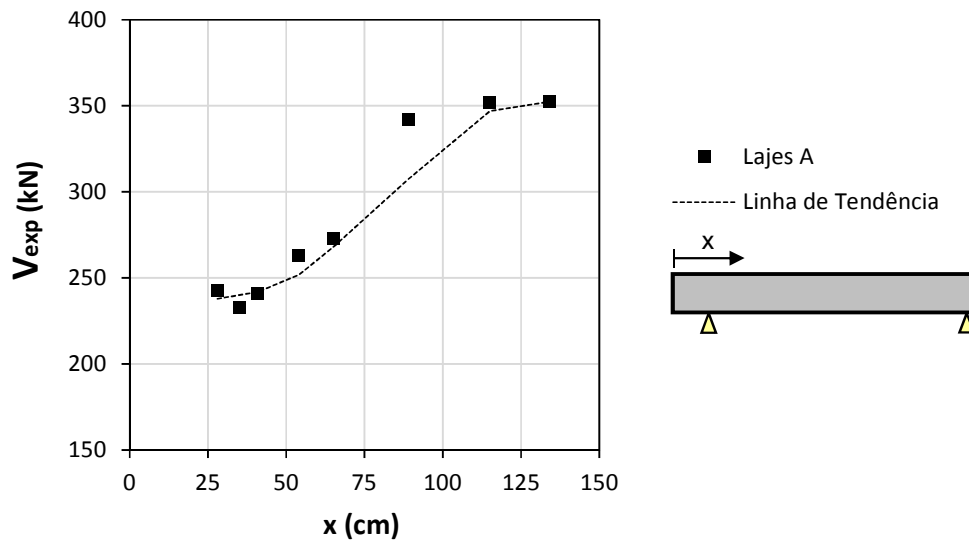
Lajes A	$x = b + \beta h$ (cm)	$x = b + 0,5h$ (cm)	V_{exp} (kN)
LA02-C-A	35	26	233
LA03-C-A	28	19	243
LA04-C-A	41	32	241
LA05-C-A	54	45	263
LA06-C-A	65	57	273
LA07-C-A	89	76	342
LA08-C-A	115	102	352
LA09-C-A	134	121	353

(Fonte: Próprio autor)

7.1.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 7.7 apresenta os valores experimentais em função da seção controle $x = b + \beta h$. A linha de tendência traçada busca descrever aproximadamente o comportamento dos dados. Como as lajes são iguais, com exceção a pequenas diferenças tidas como normais à fabricação, a variável significativa dos modelos ensaiados é a proporção de protensão introduzida na seção analisada. Observa-se um forte crescimento da cortante observada nos experimentos para x variando de 50 a 100 cm.

Figura 7.7: Relação entre V_{exp} . e a posição da seção analisada

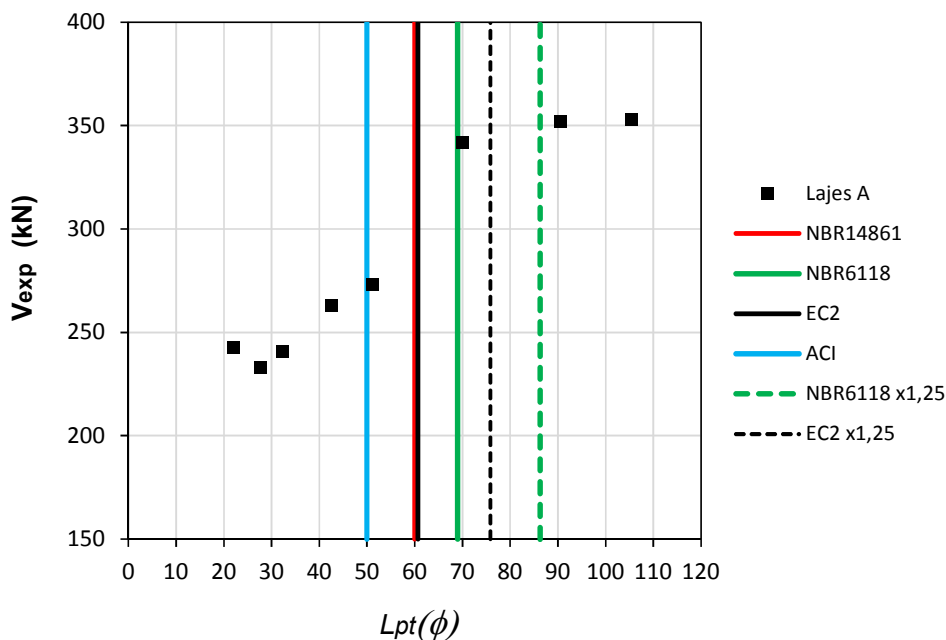


(Fonte: Próprio autor)

Para x entre 25 e 50 cm a variação na cortante experimental foi pequena. Pode-se considerar que a partir de x igual a 90 cm houve uma estabilização dos pontos no gráfico.

A figura a seguir correlaciona a cortante do experimento com o comprimento de transferência da protensão, sendo este uma função do diâmetro da cordoalha, $L_{pt}(\phi)$, com ϕ em centímetros.

Para as lajes A, o EC2, considerando liberação da protensão gradual, fornece o menor valor para L_{pt} , sendo este bem próximo dos 50ϕ estabelecido pelo ACI318. A NBR6118 apresenta 55ϕ para estas lajes considerando também a liberação da protensão gradual, enquanto que a NBR14861 fixa o valor em 60ϕ , independente da resistência do concreto no saque e da tensão inicial de protensão nas cordoalhas.

Figura 7.8: Relação entre V_{exp} e $L_{pt}(\phi)$ 

(Fonte: Próprio autor)

As curvas tracejadas do EC2 e da NBR6118 consideram a liberação da protensão de maneira não gradual. Assim, os valores são majorados em 25%.

Para as lajes A, pode-se concluir por meio da correlação com os valores experimentais de força cortante, que o comprimento de transferência da protensão é da ordem de 70ϕ , valor este, bem representado pela NBR6118 considerando a liberação não gradual.

A seguir apresentam-se as relações V_{exp}/V_{calc} para os modelos de cálculo utilizados. A resistência à tração do concreto é considerada de duas formas: valor inferior, $f_{ct,inf}$ e valor médio, f_{ctm} , exceção feita ao modelo do ACI. As duas análises são feitas, pois a variável em questão é de difícil quantificação. Em especial para lajes com alvéolos circulares, a compactação do concreto devido à vibração da máquina e os movimentos circulares das roscas que formam os alvéolos aumentam a resistência do concreto.

Na Tabela 7.3 apresentam-se os valores experimentais de tração diagonal confrontados com os calculados pela NBR14861 (flexo-cortante), EC2, EN1168, ACI318 e a Proposta, utilizando valores inferiores da resistência à tração.

Tabela 7.3: Cálculos pelos modelos analisados utilizando $f_{ct,inf}$

Lajes A	V_{exp} (kN)	V_{exp} / V_{calc}				
		NBR14861	EC2	EN1168	ACI	Proposta
LA02-C-A	233	1,73	1,06	1,36	1,18	1,22
LA03-C-A	243	1,95	1,23	1,56	1,40	1,40
LA04-C-A	241	1,80	1,11	1,42	1,21	1,30
LA05-C-A	263	1,83	1,11	1,42	1,17	1,31
LA06-C-A	273	1,82	1,08	1,40	1,14	1,31
LA07-C-A	342	2,06	1,21	1,57	1,42	1,26
LA08-C-A	352	2,23	1,31	1,69	1,53	1,31
LA09-C-A	353	2,23	1,31	1,70	1,53	1,31
	μ	1,96	1,18	1,51	1,32	1,30
	σ	0,19	0,10	0,13	0,17	0,05
	COV	10%	9%	9%	13%	4%

(Fonte: Próprio autor)

A média (μ) do modelo NBR14861, de 1,96, é excessivamente alta, como o esperado, uma vez que descreve a flexo-cortante. Os outros modelos se mostraram seguros com menor margem para o EC2 e maior para a EN1168. Este último por minorar a resistência global por um valor fixo (0,8) e considerar a seção controle a $h/2$, independentemente do tipo de laje, conduz a uma alta margem de segurança para lajes com alvéolos circulares. A Proposta, por sua vez, apresenta o menor coeficiente de variação dentre os modelos analisados e para os dados analisados. O valor da média de 1,30 está coerente com o valor da média de 1,30 referente aos dados de lajes com alvéolos circulares (calculadas com $f_{ct,inf}$) analisados no capítulo 5 (Tabela 5.1).

Tabela 7.4: Cálculos feitos utilizando $f_{ct,m}$

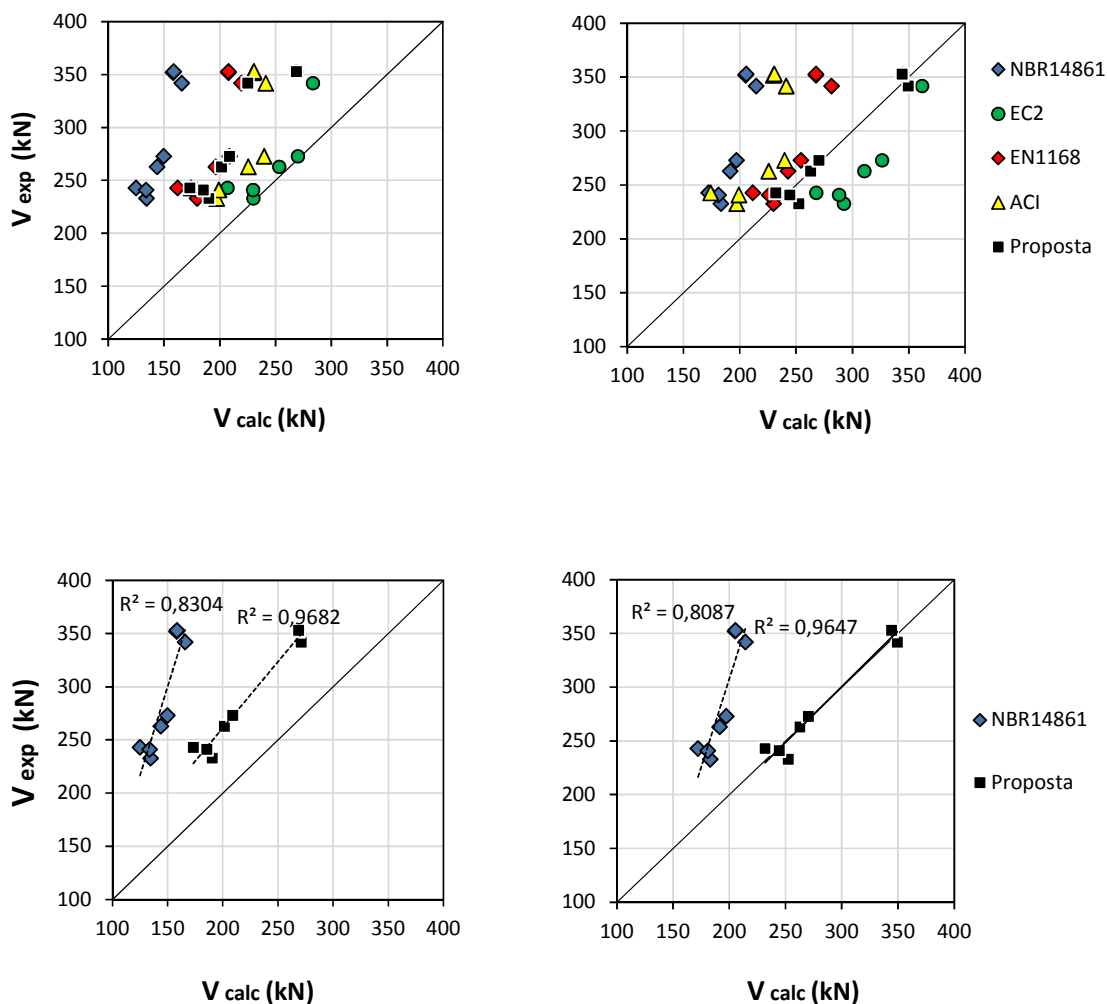
Lajes A	V_{exp} (kN)	V_{exp} / V_{calc}			
		NBR14861	EC2	EN1168	Proposta
LA02-C-A	233	1,27	0,80	1,01	0,92
LA03-C-A	243	1,41	0,91	1,15	1,05
LA04-C-A	241	1,33	0,84	1,07	0,99
LA05-C-A	263	1,37	0,85	1,08	1,00
LA06-C-A	273	1,39	0,84	1,07	1,01
LA07-C-A	342	1,59	0,95	1,22	0,98
LA08-C-A	352	1,72	1,02	1,32	1,02
LA09-C-A	353	1,72	1,03	1,32	1,03
	μ	1,48	0,90	1,15	1,00
	σ	0,18	0,09	0,12	0,04
	COV	12%	10%	10%	4%

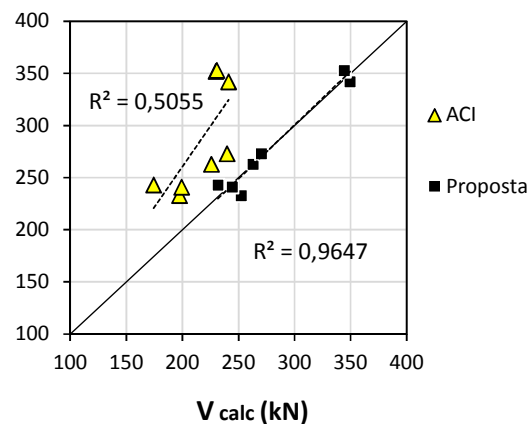
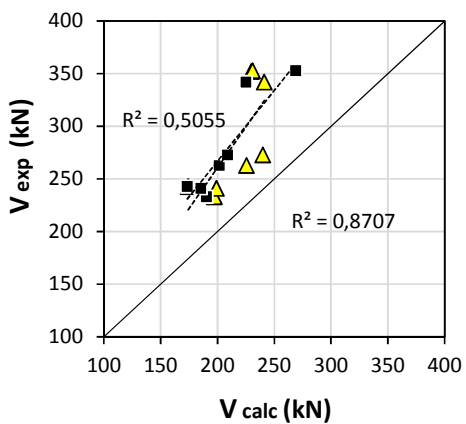
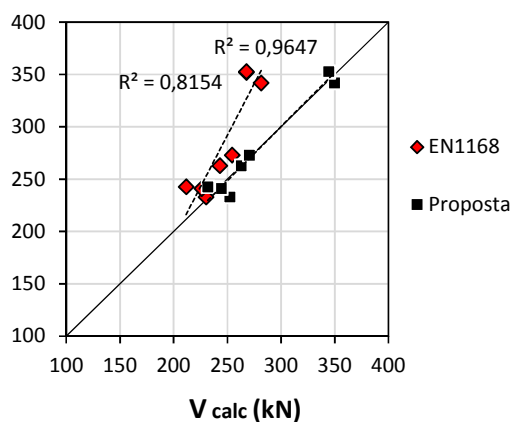
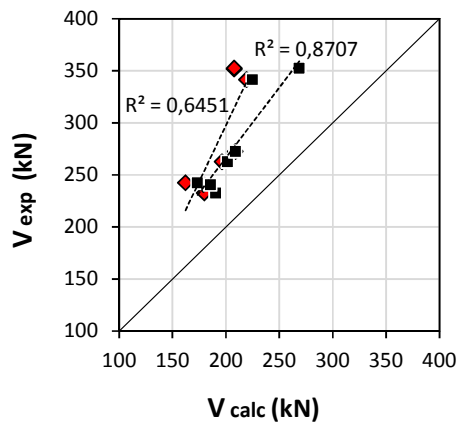
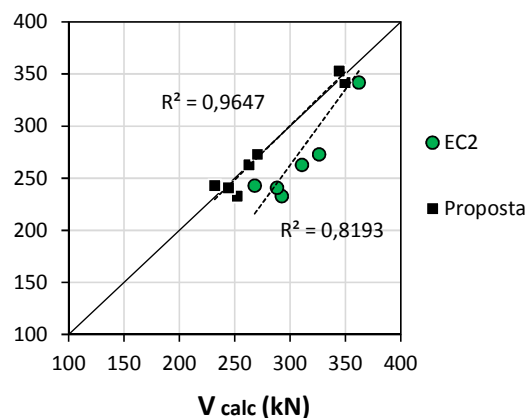
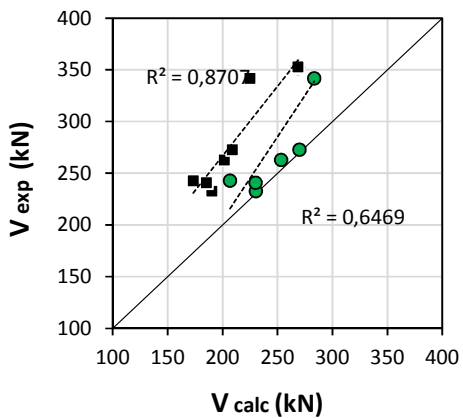
(Fonte: Próprio autor)

Para as Lajes A, o valor médio da resistência à tração conduz a resultados insatisfatórios. Os coeficientes de variação apresentados nas tabelas acima não são totalmente confiáveis assim como as médias necessitando compará-los com mais dados.

As figuras a seguir apresentam os gráficos comparativos entre os valores experimentais e os valores calculados. Na esquerda, os valores são calculados com $f_{ct,inf}$ e na direita, com f_{ctm} .

Figura 7.9: Comparação gráfica entre os modelos analisados



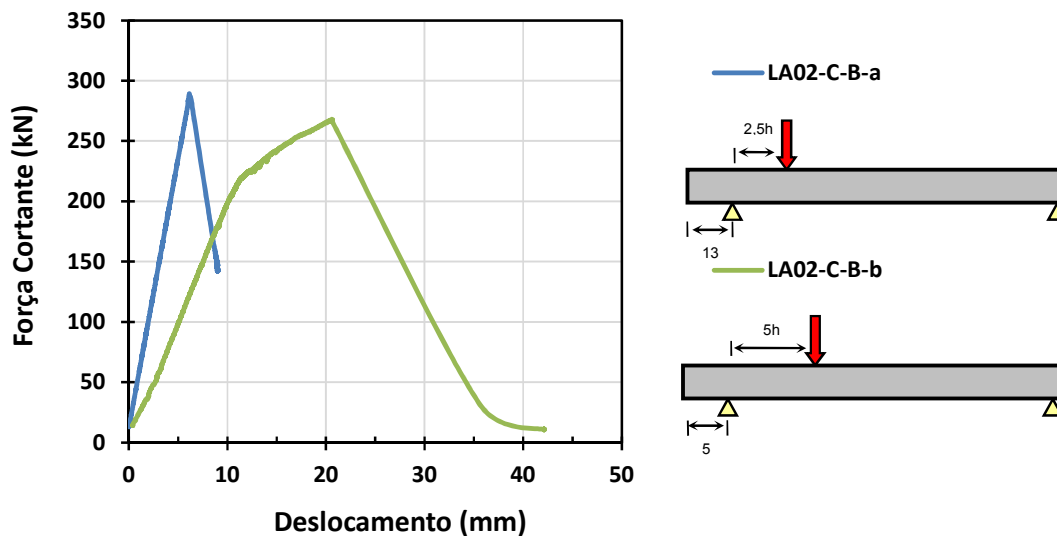


7.2 LAJES B

7.2.1 RESULTADOS

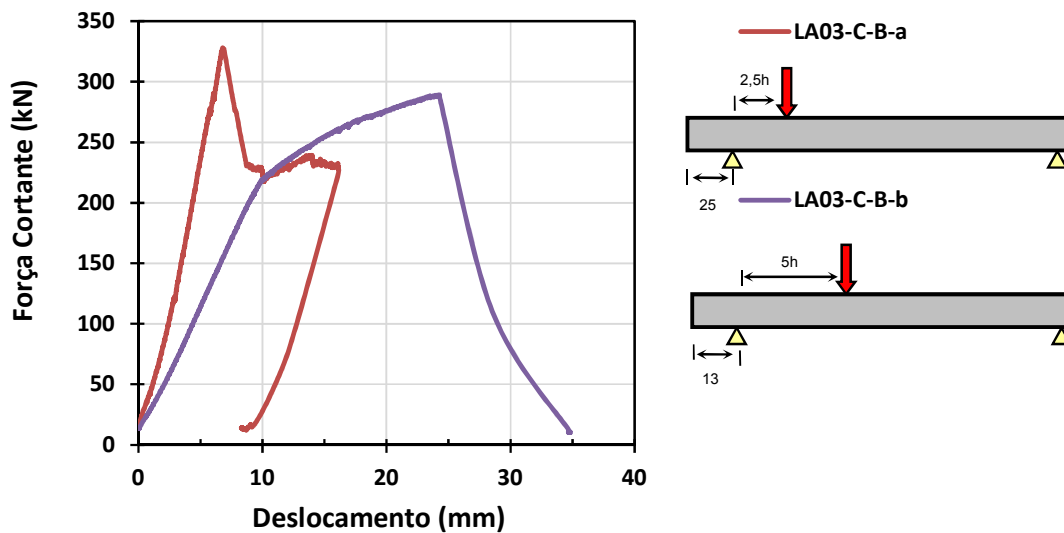
Analogamente as Lajes A, primeiramente, apresentam-se as curvas de força cortante pelo deslocamento medido já considerando o peso próprio da laje e dos aparatos de ensaio.

Figura 7.10: Força cortante vs. deslocamento: LA02-a e LA02-b



(Fonte: Próprio autor)

Figura 7.11: Força cortante vs. deslocamento: LA03-a e LA03-b

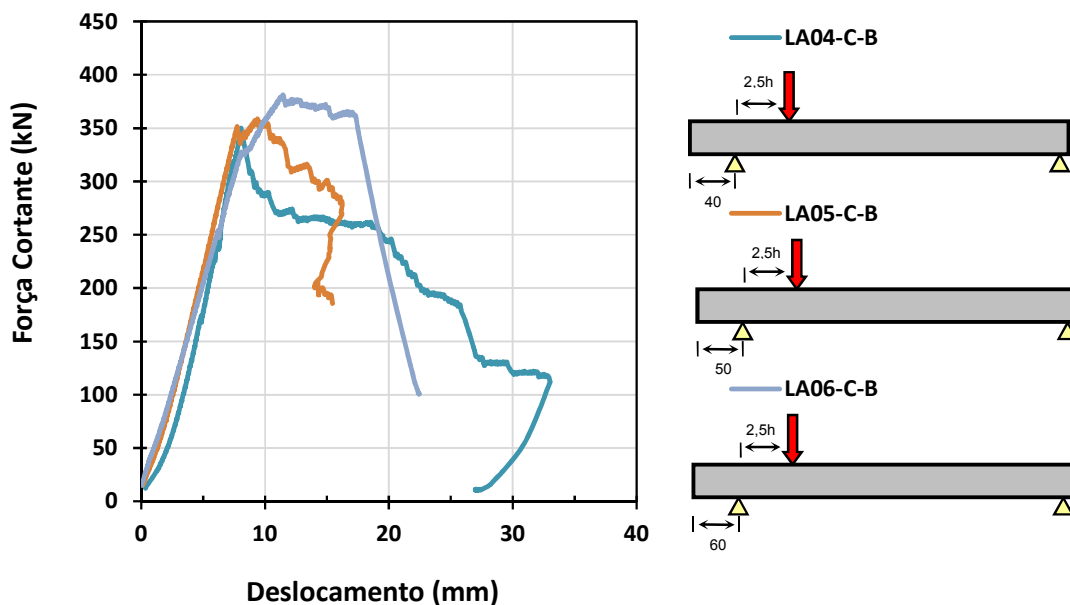


(Fonte: Próprio autor)

Comentários sobre a laje LA01-C-B serão feitos mais a frente, pois houve problemas durante o experimento.

Para as Lajes B, além da variação dos comprimentos de apoio com aplicação de cargas a 2,5h do apoio mais próximo, ensaiaram-se duas lajes com distância da aplicação da carga de 5h. Esses ensaios são os LA02-C-B-b e LA03-C-B-b cujas curvas força cortante *versus* deslocamento foram apresentadas acima. 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.

Figura 7.12: Força cortante vs. deslocamento: LA04, LA05 e LA06



(Fonte: Próprio autor)

A seguir, apresentam-se ilustrações das lajes antes e após os ensaios.

Figura 7.13: Laje LA03-C-B-a e sua ruptura



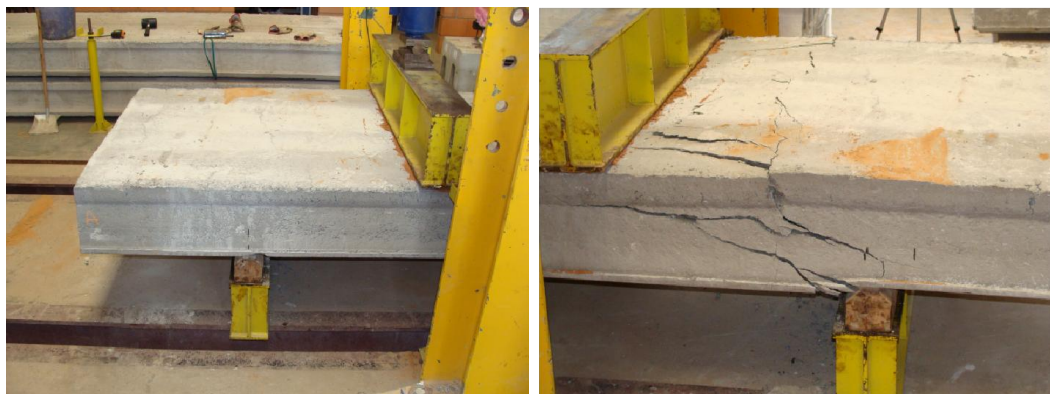
(Fonte: Próprio autor)

Figura 7.14: Laje LA03-C-B-b e sua ruptura



(Fonte: Próprio autor)

Figura 7.15: Laje LA06-C-B e sua ruptura



(Fonte: Próprio autor)

O experimento LA03-C-B-b mostrado na Figura 7.14 apresentou além da fissura diagonal crítica (detalhe em vermelho na figura), fissuras devido à falha localizada ou até mesmo oriunda de alguma interação com torção. No entanto, o resultado foi coerente com os outros experimentos.

Para as Lajes B, o valor médio de β é de 0,89 quando a seção controle fica dentro do comprimento de transferência da protensão (L_{pt}).

A Tabela 7.5 e Tabela 7.6 apresentam para as Lajes B, a seção controle, $x=b+\beta h$, e os coeficientes α_{inf} e α_{sup} multiplicando as tensões de compressão. Os valores de α_{inf} e α_{sup} consideram o comprimento de transferência da protensão calculado pela formulação presente na NBR6118 considerando a liberação da protensão não gradual.

Tabela 7.5: Seção controle para Proposta e respectivas perdas de protensão nas cordoalhas inferiores

Lajes B	$x = b + \beta h$ (cm)	$t_{médio}$ (dias)	Perdas (%): cordoalhas inferiores			
			Iniciais	Finais	σ_{cp} (Mpa)	$\alpha_{inf} \cdot \sigma_{cp}$ (Mpa)
LA02-C-B-a	36	45	5,69	14,81	6,67	2,98
LA02-C-B-b	28		4,93	12,82	6,83	2,37
LA03-C-B-a	49		6,91	18,04	6,42	3,90
LA03-C-B-b	36		5,69	14,81	6,67	2,98
LA04-C-B	64		8,33	21,78	6,13	4,87
LA05-C-B	76		9,46	24,77	5,89	5,56
LA06-C-B	86		9,89	25,91	5,80	5,80

(Fonte: Próprio autor)

Tabela 7.6: Seção controle para Proposta e respectivas perdas de protensão nas cordoalhas superiores

Lajes B	$x = b + \beta h$ (cm)	$t_{médio}$ (dias)	Perdas (%): cordoalhas superiores			
			Iniciais	Finais	σ_{cp} (Mpa)	$\alpha_{sup} \cdot \sigma_{cp}$ (Mpa)
LA02-C-B-a	36	45	2,00	4,79	0,838	0,50
LA02-C-B-b	28		2,06	4,95	0,837	0,39
LA03-C-B-a	49		1,89	4,54	0,840	0,68
LA03-C-B-b	36		2,00	4,79	0,838	0,50
LA04-C-B	64		1,80	4,32	0,842	0,84
LA05-C-B	76		1,80	4,32	0,842	0,84
LA06-C-B	86		1,80	4,32	0,842	0,84

(Fonte: Próprio autor)

A tabela a seguir apresenta os valores experimentais da força cortante e as seções controle medidas a partir da extremidade da laje.

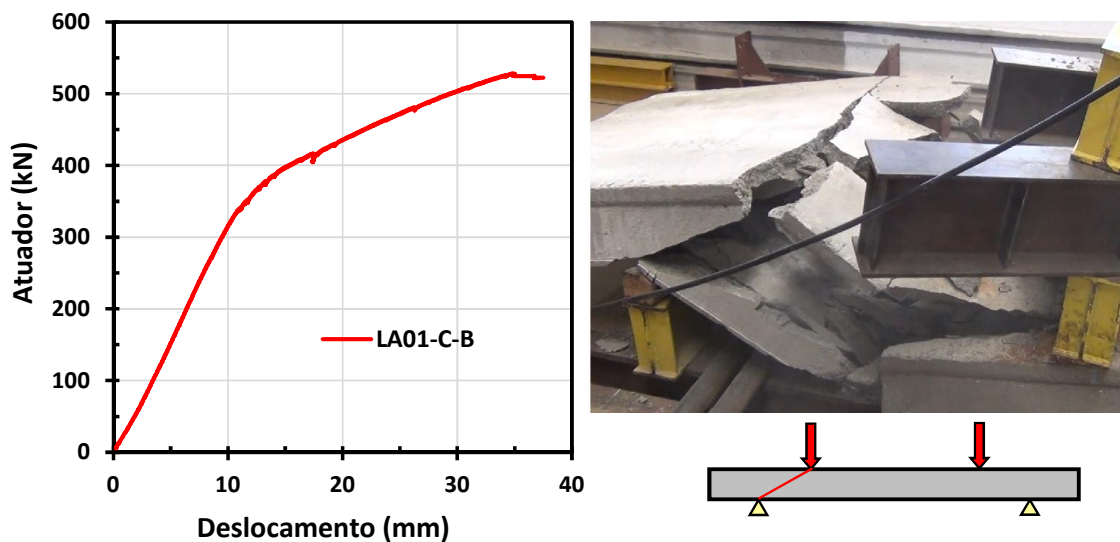
Tabela 7.7: Seções controle e V_{exp}

Lajes B	$x = b + \beta h$ (cm)	$x = b + 0,5h$ (cm)	V_{exp} (kN)
LA02-C-B-a	36	26	289
LA02-C-B-b	28	18	267
LA03-C-B-a	49	39	328
LA03-C-B-b	36	26	287
LA04-C-B	64	53	349
LA05-C-B	76	63	358
LA06-C-B	86	73	380

(Fonte: Próprio autor)

No ensaio LA01-C-B houve problemas no sistema de aquisição de dados e, portanto a carga última não foi aferida apesar de o ensaio ter sido completado, como mostra a figura abaixo. A curva mostrada é referente ao único atuador (capacidade de 1000 kN com célula de carga de 1000 kN). Devido ao esquema deste ensaio, a carga aplicada é dividida simetricamente para os apoios. A partir de 528 kN de carga no atuador, não houve mais registro de dados. Devido ao incidente e as incertezas envolvidas, esse ensaio não será analisado.

Figura 7.16: Laje LA01-C-B: problemas na aquisição de dados

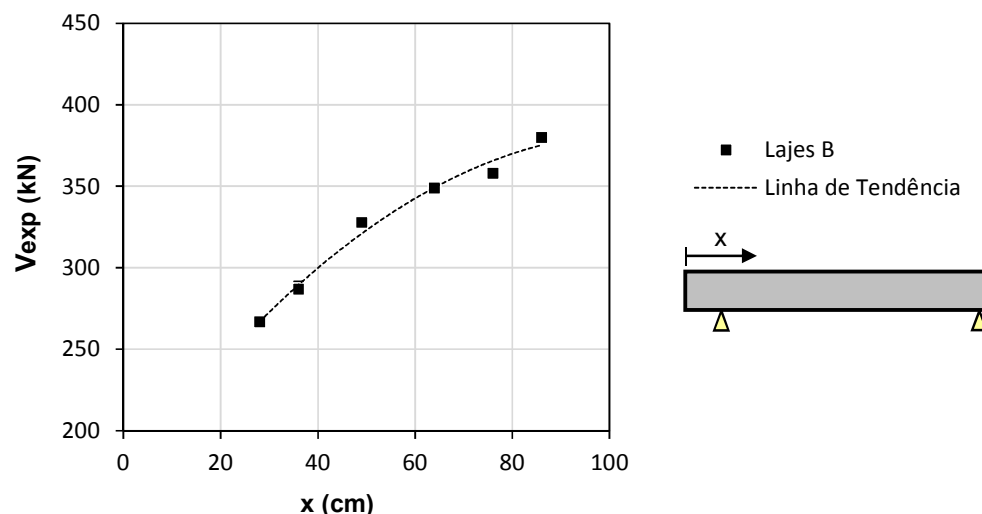


(Fonte: Próprio autor)

7.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 7.17 apresenta os valores experimentais em função da seção controle $x = b + \beta h$.

Figura 7.17: Relação entre V_{exp} . e a posição da seção analisada



(Fonte: Próprio autor)

Diferentemente das Lajes A (LA02-C-A, LA03-C-A, LA04-C-A), as Lajes B apresentaram sempre crescimento da cortante experimental à medida que o comprimento de apoio ia sendo aumentado. Sugere-se para estas lajes, que a estabilização se dá com x da ordem de 80 cm ou 63ϕ ($\phi = 1,27$ cm) seguindo a curva de tendência parabólica utilizada. Apesar da existência de cordoalhas superiores ($2 \phi 9,5$ mm), considera-se que como o comprimento de transferência da protensão é menor que o das cordoalhas inferiores ($10 \phi 12,7$ mm), elas deixam de causar variação na cortante resistente em seções anteriores àquelas que deixam de sentir variações devido a transmissão da protensão inferior.

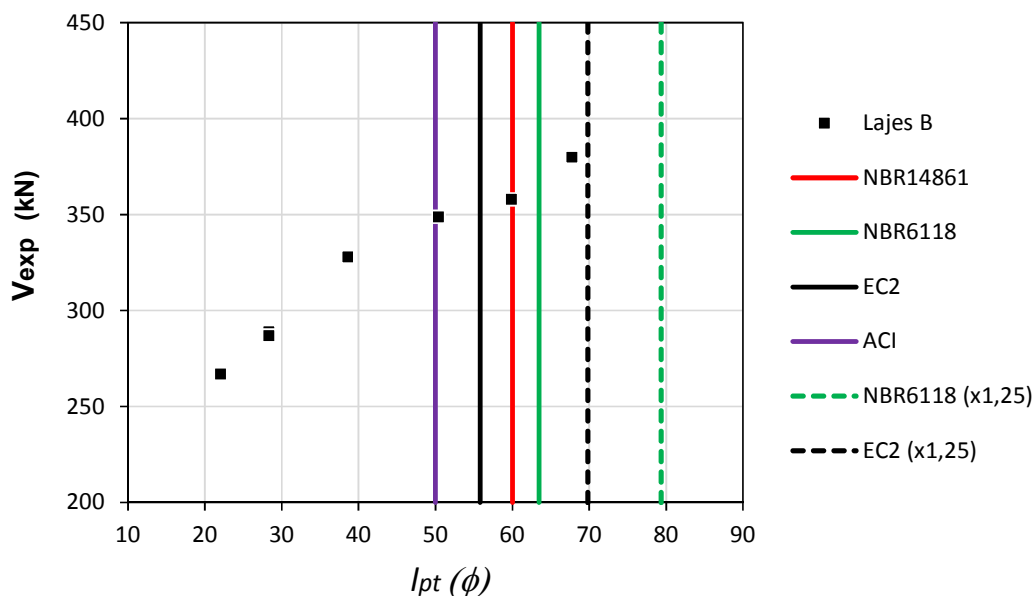
Para as Lajes B, o EC2 considerando a liberação gradual da protensão fornece o menor valor para L_{pt} . A NBR6118 nas mesmas condições que o EC2 quanto à liberação da protensão, apresenta um valor muito próximo do valor fixo do ACI (50ϕ). Já o valor fixo da NBR14861 (60ϕ) se adéqua bem ao valor sugerido pela curva de tendência parabólica destes dados.

Intuitivamente, o corte das lajes na pista caracteriza uma liberação brusca, ou não gradual da protensão. Oh e Kim (2000) mostraram um aumento da ordem de 15% nas extremidades cortadas por serra em relação àquelas sem cortes no estudo feito em vigas. No

entanto, alguns pesquisadores (Pajari, 2005; Bertagnoli e Mancini, 2009) consideraram em seus cálculos a liberação gradual para lajes alveolares.

As curvas tracejadas do EC2 e da NBR6118 consideram a liberação da protensão de maneira não gradual. Assim, os valores são majorados em 25%.

Figura 7.18: Relação entre V_{exp} e a posição da seção analisada



(Fonte: Próprio autor)

Para as lajes B, pode-se concluir, por meio da correlação com os valores experimentais de força cortante, que o comprimento de transferência da protensão é da ordem de 60ϕ .

A seguir apresentam-se as relações V_{exp}/V_{calc} para os modelos utilizados. A resistência à tração do concreto é considerada de duas formas: valor inferior, $f_{ct,inf}$ e valor médio, f_{ctm} , exceção feita ao modelo do ACI.

Na Tabela 7.8 apresentam-se os valores experimentais de tração diagonal confrontados com os calculados pela NBR14861 (flexo-cortante), EC2, EN1168, ACI318 e a Proposta, utilizando valores inferiores da resistência à tração.

Tabela 7.8: Cálculos pelos modelos analisados utilizando $f_{ct,inf}$

Lajes B	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{calc}				
		NBR14861	EC2	EN1168	ACI	Proposta
LA02-C-B-a	289	2,13	1,42	1,82	1,54	1,48
LA02-C-B-b	267	2,06	1,42	1,80	1,55	1,45
LA03-C-B-a	328	2,24	1,46	1,88	1,54	1,55
LA03-C-B-b	287	2,11	1,42	1,81	1,53	1,47
LA04-C-B	349	2,24	1,40	1,81	1,50	1,35
LA05-C-B	358	2,14	1,32	1,71	1,38	1,29
LA06-C-B	380	2,19	1,38	1,79	1,46	1,38
μ		2,16	1,40	1,80	1,50	1,42
σ		0,07	0,04	0,05	0,06	0,09
COV		3%	3%	3%	4%	6%

(Fonte: Próprio autor)

A média (μ) do modelo NBR14861, de 2,16, é excessivamente alta, como o esperado, uma vez que descreve a flexo-cortante. Os outros modelos se mostraram altamente seguros sendo a EN1168, excessivamente segura com média de 1,80. A Proposta, por sua vez, apresenta uma média de 1,42 sendo maior do que o valor de referência adotado: 1,30 (Tabela 5.1). Na sequência fazem-se as análises considerando o $f_{ct,m}$.

Tabela 7.9: Cálculos feitos utilizando $f_{ct,m}$

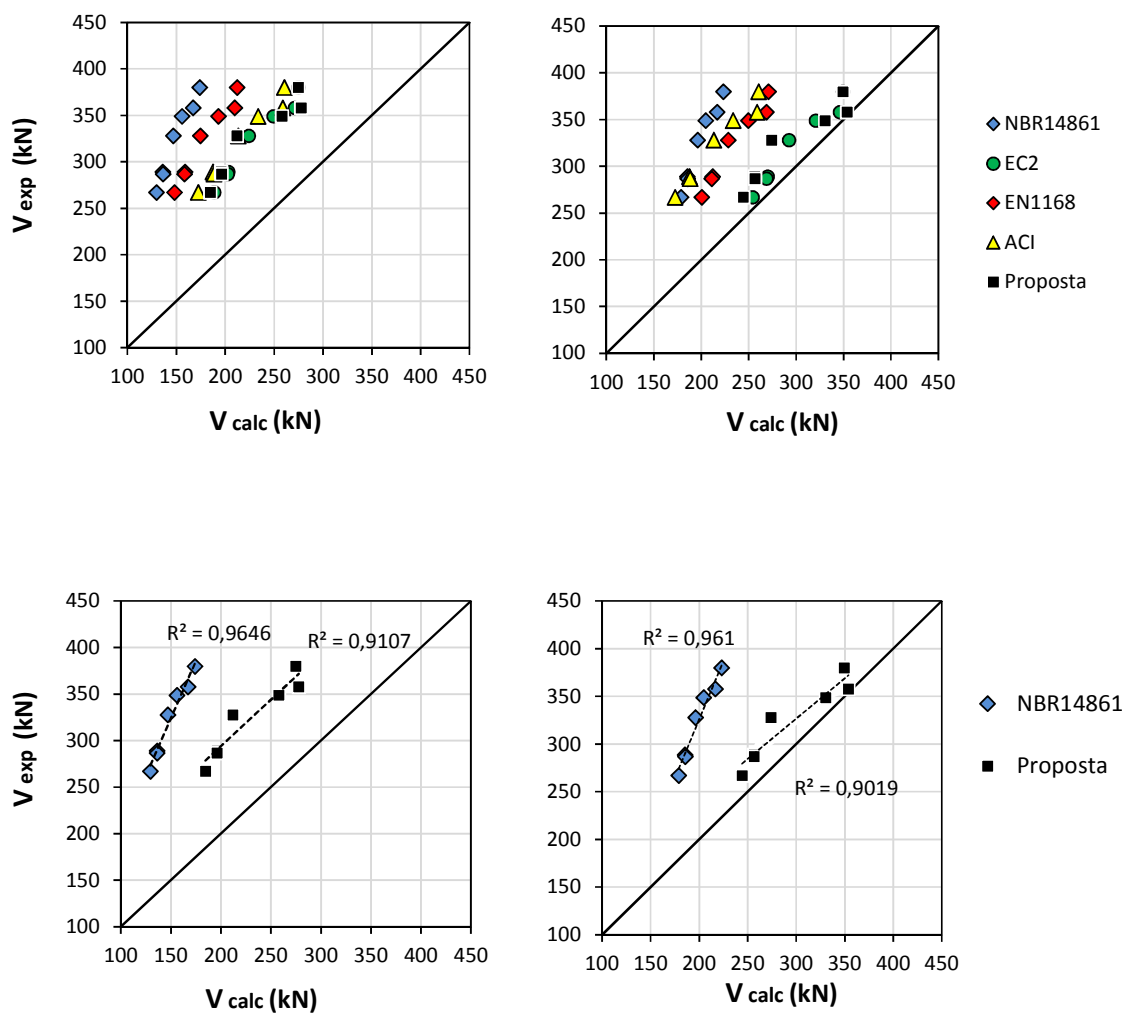
Lajes B	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{calc}			
		NBR14861	EC2	EN1168	Proposta
LA02-C-B-a	289	1,56	1,07	1,36	1,13
LA02-C-B-b	267	1,49	1,05	1,33	1,09
LA03-C-B-a	328	1,67	1,12	1,44	1,20
LA03-C-B-b	287	1,55	1,07	1,36	1,12
LA04-C-B	349	1,71	1,09	1,40	1,06
LA05-C-B	358	1,65	1,03	1,33	1,01
LA06-C-B	380	1,70	1,09	1,40	1,09
μ		1,62	1,07	1,38	1,10
σ		0,08	0,03	0,04	0,06
COV		5%	3%	3%	5%

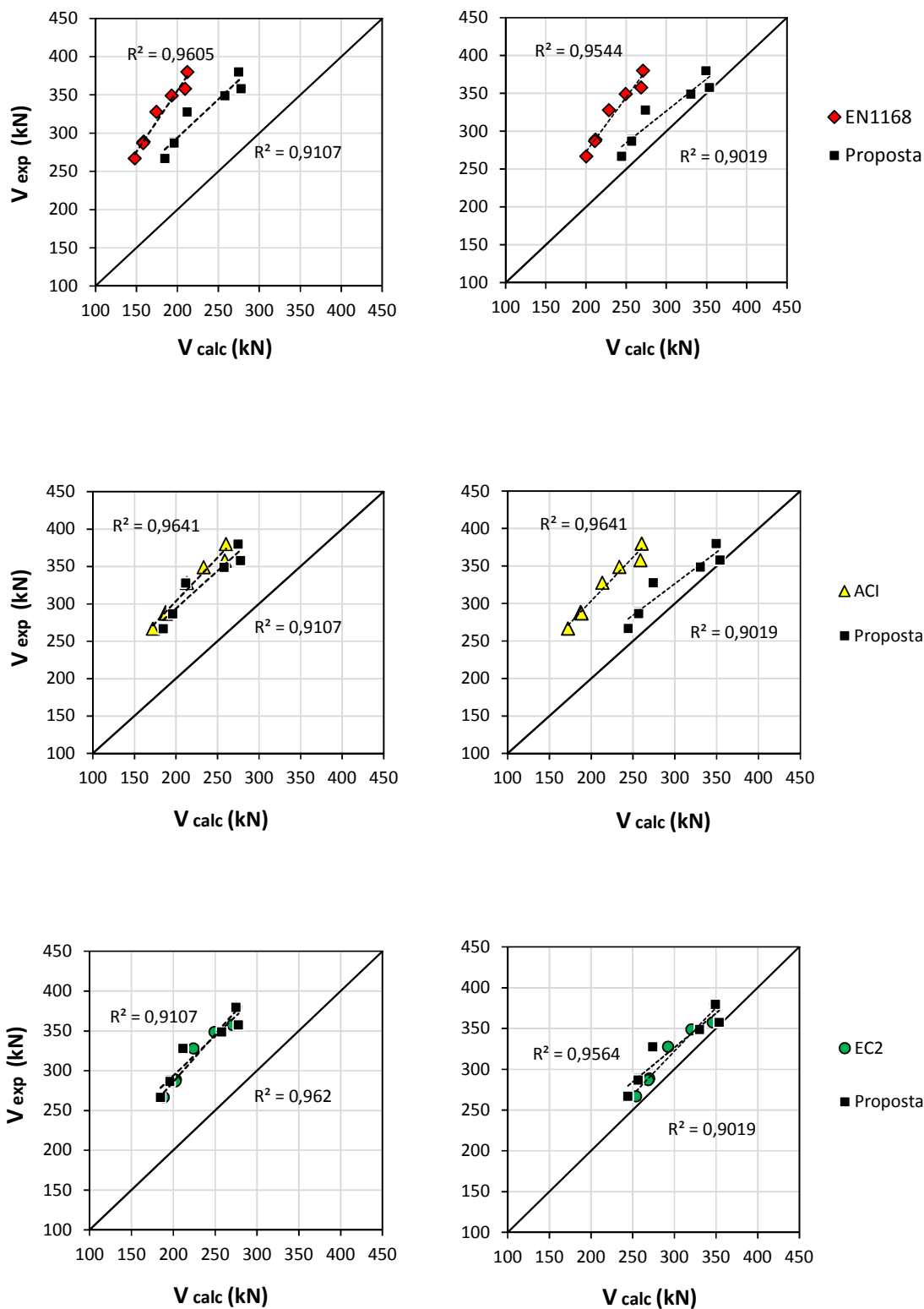
(Fonte: Próprio autor)

Para essa análise, os valores de V_{exp}/V_{calc} ficam mais razoáveis dando a entender que a resistência à tração do concreto foi subestimada ao se utilizar as correlações normativas com a resistência à compressão.

A seguir são apresentadas as comparações gráficas dos resultados.

Figura 7.19: Comparação gráfica entre os modelos analisados



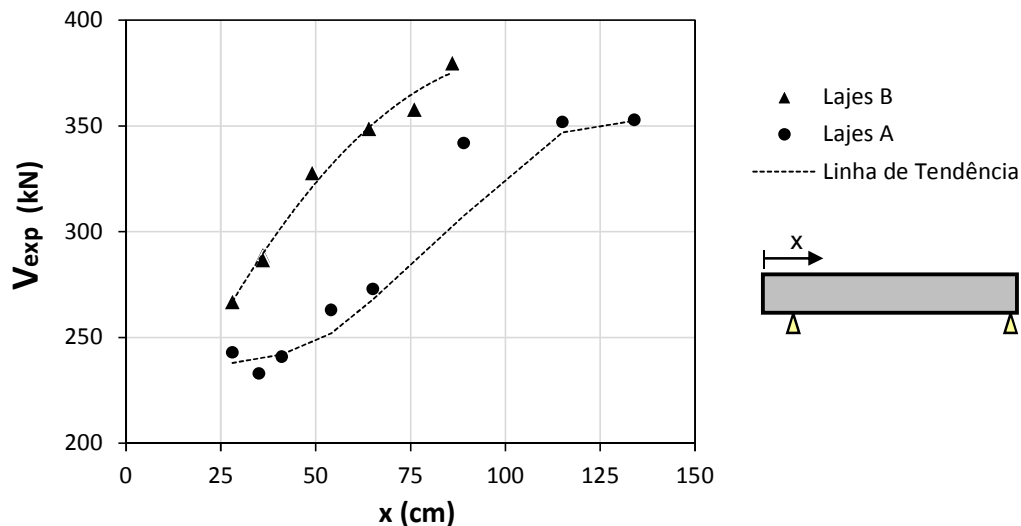


(Fonte: Próprio autor)

7.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Na Figura 7.20 são apresentados os experimentos das Lajes A e B. Como já mencionado, nas Lajes A não se observa o comportamento crescente da cortante resistente ao longo de toda a variação de x . No entanto isso pode ser observado nas Lajes B.

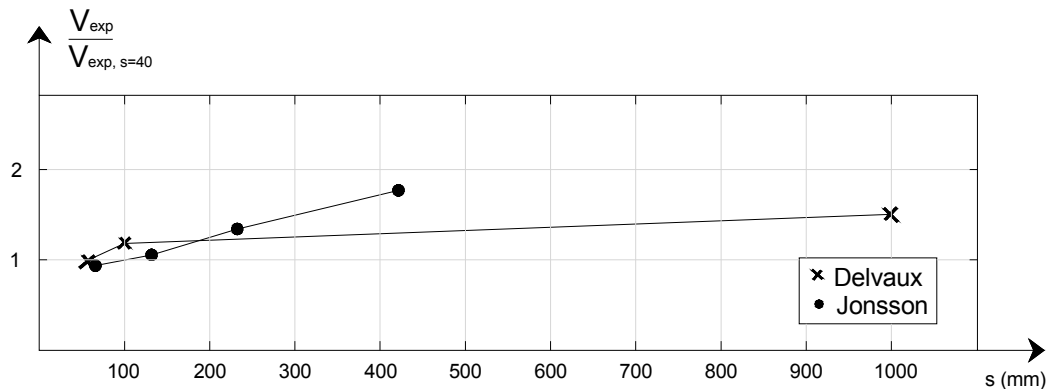
Figura 7.20: Relação entre $V_{exp.}$ e posição da seção analisada



(Fonte: Próprio autor)

Situação semelhante a esta é apresentada em Walraven (1982). O autor descreve sucintamente os experimentos de Delvaux e Jonsson, em que a influência do apoio foi investigada.

Figura 7.21: Porcentagem de variação da cortante variando o comprimento de apoio



(Fonte: adaptado de Walraven, 1982)

Na figura acima, pode-se observar que nos ensaios de Delvaux, um sutil incremento de resistência ocorre a partir de $s > 100$ mm em relação ao experimento de referência ($s = 40$ mm), onde s é o comprimento da extremidade da laje até a face interna do apoio. Já nos ensaios de Jonsson, os valores ainda não estão estabilizados para $s = 400$ mm. A explicação para isso remete ao escorregamento inicial das cordoalhas. Nos ensaios de Delvaux, os escorregamentos após a liberação da protensão foram menores que 1 mm, enquanto que nos de Jonsson eles variaram de 0,5 a 3 mm.

Nas lajes ensaiadas neste trabalho, o escorregamento não ultrapassou 1 mm para as lajes A, nem 0,5 para as lajes B. Assim, da mesma forma que apresentado por Walraven, isso pode justificar o comportamento diferente dos dois tipos de lajes, principalmente na região $25 < x < 50$ cm na Figura 7.20.

Figura 7.22: Escorregamento de cordoalhas Lajes A e Lajes B



Lajes A: menor que 1 mm



Lajes B: menor que 0,5 mm

(Fonte: Próprio autor)

Quanto à capacidade resistente das lajes ensaiadas, bons resultados foram obtidos para o mecanismo de tração diagonal para lajes com alvéolos circulares. Ressalta-se apenas

que a consideração da resistência à tração, feita usualmente pela correlação com a resistência à compressão, pode subestimar o seu valor. Isso foi mostrado nos ensaios das Lajes B. Assim, com comprovação experimental, as fábricas de lajes alveolares podem diferenciar seus produtos no mercado considerando resistências maiores para a tração do concreto.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

- Quanto ao modelo de flexo-cortante das normas brasileiras, NBR6118 e NBR14861, sugere-se a alteração da constante, no cálculo de τ_{Rd} , de 0,25 para 0,19 somente para $f_{ck} \geq 55$ MPa, e interpolando linearmente entre esses dois valores para $50 < f_{ck} < 55$ MPa;
- 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 a tração diagonal;
- Para o cálculo da tração diagonal, os modelos com o coeficiente proposto β , que busca considerar indiretamente a redução da resistência à força cortante devido às tensões cisalhantes na introdução da protensão, mostraram bom desempenho frente aos modelos de cálculo analisados neste trabalho;
- O valor da cortante resistente pela tração diagonal é fortemente influenciado pela quantidade de protensão introduzida na seção analisada. Assim, o aumento do comprimento do apoio pode ser considerado em projeto como forma eficaz de aumento da capacidade resistente à força cortante da laje alveolar;
- A consideração pela NBR14861 de 60ϕ para o comprimento de transferência da protensão é considerada adequada para as lajes ensaiadas;
- A resistência à tração do concreto em lajes alveolares com alvéolos circulares pode ser aumentada em relação ao valor de $f_{ctk,inf}$ por meio de avaliação experimental, podendo ser um diferencial no mercado para estas lajes. Quanto a lajes com alvéolos não circulares, ensaios precisam ser feitos para avaliar essa situação;

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os dados utilizados neste trabalho para avaliação do mecanismo da tração diagonal são na grande maioria europeus. Faz-se necessário o estudo de lajes brasileiras com alturas acima de 260 mm e principalmente com alvéolos oblongos. Só assim, e contanto com a melhoria do padrão de qualidade de uma forma geral, uma equação que considera a tração diagonal poderá ser incorporada na NBR14861.

Além disso, todas as análises feitas neste trabalho consideraram lajes alveolares simplesmente apoiadas. No entanto, a utilização de capa estrutural considerando o pavimento de laje alveolar contínuo é muito comum no Brasil. Isso, no âmbito da resistência à força cortante, gera dúvidas, como por exemplo:

- As fissuras devido ao momento negativo avançam pela capa, de cima para baixo, atingindo a seção da laje e configurando um mecanismo de flexo-cortante?
- A queda de rigidez na ligação devido a essas fissuras conduz a uma situação da laje bi-apoiada e, portanto o mecanismo da tração diagonal se faz condicionante? Com seção simples ou composta? Para qual proporção altura da capa – altura total? Para quais taxas de armadura passiva (negativo)?
- Qual o limite da tensão na interface capa-laje para garantir seção composta?

Assim, essas dúvidas de pesquisa podem servir de motivação para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBAJAR, J. S. **The Influence of Aggregate Fracture on the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams**. 409f. Thesis. Imperial College London. 2008

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary**, Farmington Hills, MI, 2011.

ANTUNES; C. F. M. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória**. 146f. Dissertação – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

ARAÚJO; C. A. M.; LORIGGIO, D. D.; CAMARA, J. M. **Anchorage Failure and Shear Design of Hollow-Core Slabs**. Structural Concrete, vol. 12. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). **NBR 6118: 2013 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rascunho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). **NBR 14861: 2011 Lajes Alveolares Protendidas – Requisitos e Procedimentos**. Rascunho.

BAZANT, Z. P. **Wake-Up Call for Creep, Myth about Size Effect and Black Holes in Safety: What to Improve in Fib Model Code Draft**. In: fib Symposium Prague. 2011.

BERTAGNOLI, G.; MANCINI, G. **Failure analysis of hollow-core slabs tested in shear**. Structural Concrete, [S. l.], v. 10, n. 3, p.139-152, 2009.

CATOIA, Bruna. **Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão**. 325 f. Tese - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido**. 1ª ed. Pini. 2012.

COLLINS M. et al. **Where is Shear Reinforcement Required? Review of Research Results and Design Procedures**, ACI Structural J., Vol. 105, No 5, 2008.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – **EN 1168: 2008. Precast Concrete Product – Hollow Core Slabs.**

COSTA, Olívia Oliveira. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.** 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

EUROCODE 2 – Design of Concrete Structures – Part 1.1 General Rules and Rules for Buildings, 2004.

EUROCODE 2 Commentary. European Concrete Platform ASBL. 2008.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. FIB (CEB-FIB) – Guide to good practice: **Special design considerations for precast prestressed hollow core floors.** Lausanne, 2000.

FERNANDES, Neiton Santos. **Lajes Alveolares Pré-Fabricadas em Concreto Protendido.** 111 f. Dissertação - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FRANÇA, Alessandra A. V. **Estudo das Lajes Alveolares Pré-Fabricadas em Concreto Protendido Submetidas a Ensaio de Cisalhamento.** 2012. 136 f. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto – Solicitações tangenciais.** 1ª ed. São Paulo. Pini. 2008.

GHOSH, S. K., HAWKINS, N. M. Shear strength of hollow core slabs. PCI Journal 51 (1). 2006.

GIRHAMMAR, U. A.; PAJARI, M. **Tests and analysis on shear of composite slabs of hollow core units and concrete topping.** Construction and Building Materials. V. 22, 2008.

KANI, G. N. J. **The Riddle of Shear Failure and Its Solution,** ACI Journal, Proceedings V. 61, No. 3, pp. 441-467, 1964.

KÖNIG, G., FISCHER, J. Model Uncertainties concerning Design Equations for the Shear Capacity of Concrete Member without Shear Reinforcement. In: CEB Bulletin 224, 1995.

HEDMAN, O.; LOSBERG, A., **Design of Concrete Structures with regard to shear forces, in shear and torsion.** CEB Bulletin d'Information n. 126. Paris, 1978.

MACGREGOR, J. G., WIGHT, J. K. **Reinforced Concrete – Mechanics and Design**. 6^a ed. Pearson. 2012.

MARQUESI, M. L. G.; STUCCHI, F. R.; FUJII, G.; UNGARETTI, M. C. **Shear Analysis and Experimental Research Program on Anchorage Criteria in RC Slabs: Comparisons between FibMC2010 and NBR6118**. In: IV INTERNATIONAL fib CONGRESS 2014, MUMBAI, 2014.

OH, B. H., KIM, E. S. **Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Member**. ACI Structural Journal v. 97 n.1 p. 821- 830, November 2000.

PAJARI, M. **Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure**. VTT Technical Research Centre of Finland, Research Notes 2292, 2005.

PAJARI, M.; YANG, L. **Shear capacity of hollow core slabs on flexible supports**. VTT Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1587, 1994.

PAJARI, M. **Web shear failure in prestressed hollow core slabs**. Journal of Structural Mechanics, [S. l.], v. 42, n. 4, p.551-559, 2009.

Precast prestressed hollow core floors, FIB Draft Manual, September 2012.

PAJARI, M., **Experimental research on two hollow core slabs in order to quantify the effect of slab depth on the flexural tensile strength**. VTT Technical report, RTE3166/04, 2004-03-16.

SHERWOOD, E. G., **One-Way Shear Behavior of Large, Lightly-Reinforced Concrete Beams and Slabs**, PhD dissertation, University of Toronto, Toronto, Ontario Canada, 546 pp. 2008.

TIMOSHENKO. S. P. **History of Strength of Materials**. Dover. 1983.

WALRAVEN, J. C., **Design principles for hollow core slabs regarding shear and transverse load-bearing capacity**. The shear resistance of prestressed hollow core slabs, FIP Technical Paper, October 1982.

WALRAVEN, J. C. and MERCX, W. P. M. **The Bearing Capacity of Prestressed Hollow Core Slabs**. Heron, Vol. 28, No. 3, 46 p, 1983.

YANG, L. **Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure**. Journal of Structural Engineering, [s. L.], p. 2675-2696. set. 1994.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ASSOCIATION OF MANUFACTURES OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS – ASSAP (2002). **The hollow core floor design and applications**. Verona, 2002.

BROO, H.; LUNDGREN, K.; ENGSTRÖM, B. **Shear and torsion in prestressed hollow core units: finite element analyses of full-scale tests**. Structural Concrete, [S.I.], v. 8, n. 2, p.87-100, 2007.

HEGGER, J.; ROGGENDORF, T.; KERKENI, N. **Shear capacity of prestressed hollow core slabs in slim floor constructions**. Engineering Structures, [S. I.], v. 31, n. 2, p.551-559, 2009.

HEGGER, J.; ROGGENDORF, T.; TEWORTE, F. **FE analyses of shear-loaded hollow-core slabs on different supports**. Magazine Of Concrete Research, [S.I.], v. 62, n. 8, p.531-541, 2010.

IBRAHIM, I. S.; ELLIOTT, K. S. **Bending capacity of precast prestressed hollow core slabs with concrete toppings**. Malaysian Journal Of Civil Engineering, [S. I.], p. 260-283. jun. 2008.

LUNDGREN K. et al. **Shear and torsion in hollow core slabs**. In: fib SYMPOSIUM, 2005, Budapest. Proceedings... Budapest: FIB, 2005. p. 594-599.

LUNDGREN, K.; BROO, H.; ENGSTRÖM, B. **Analyses of hollow core floors subjected to shear and torsion**. Structural Concrete, [S.I.], v. 5, n. 4, p.161-172, 2004.

FINAL DRAFT OF FIB MODEL CODE 2010. Fédération internationale de béton (fib). Lausanne.

BENTZ, E. C., AND COLLINS, M. P. (2006), **Development of the 2004 CSA A23.3 shear provisions for reinforced concrete**. Can. J. Civ. Eng., 335, 521–534.

BENTZ, E. C., VECCHIO, F. J., AND COLLINS, M. P. (2006), **The simplified MCFT for calculating the shear strength of reinforced concrete elements**. ACI Journal, 1034, 614–624.

FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZIN, A.; COSTA. O. O.; FILHO. F. M. A. **Avaliação teórico-experimental da capacidade resistente ao cisalhamento e a flexão em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido**. Revista concreto & Construções. São Paulo, Nº 50, p. 104-115, 2007.

FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZIN, A.; COSTA. O. O.; FILHO. F. M. A.; DONIAK, I. L. O. **Resistência ao cisalhamento em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas: avaliação de desempenho segundo a EN:1168:2005**. In: Congresso Nacional da Prefabricação em betão (ANIPB), 2º, 2008, Lisboa, Portugal.

KANI, G. N. J. (1966), **Basic Facts Concerning Shear Failure** ACI Journal, Proceedings V. 63, No. 6, pp. 675-692.

MUTTONI, A., RUIZ, M. F. (2012), **Level-of-Approximation Approach in Codes of Practice**. **Structural Engineering International**, V. 2, pp 190-194.

MUTTONI, A., RUIZ, M. F. (2008), **Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width**, ACI Journal, Vol. 105, No 2.

REINECK, K. H., KUCHMA, D. A. (2010), **Extended databases with shear tests on structural concrete beams without and with stirrups for the assessment of shear design procedures**, Research Report.

SCHLAICH, J. (1991), **The need for consistent and translucent Models**, IABSE Colloquium Structural Concrete, Proceedings V. 62, Stuttgart, p. 169-184.

VECCHIO, F. J., AND COLLINS, M. P. (1986), **The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear**. J. Am. Concr. Inst., 832, 219–231.

APÊNDICE A

Tabela A.1: Dados detalhados de vigas e faixas de lajes maciças utilizadas no estudo da Flexo-Cortante com $f_c > 50$ MPa

Autor	Ano	Experimento	b (mm)	h (mm)	d (mm)	a/d	s (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	a_g (mm)	f_y (MPa)	$\frac{M_{exp}}{M_R}$	V_{exp} (kN)	$\rho \leq 2$ (%)	$f_{ct,inf}$ (MPa)
Muruyama, Y.	1986	N2	200	250	250	2,5	90	1,55	51	19	343	0,83	83,4	1,55	2,87
Ahmad and Lue	1987	A7	127	254	208	4	10	1,77	60,8	13	586	0,76	46,7	1,77	3,06
Ahmad and Lue	1987	A8	127	254	208	3	10	1,77	60,8	13	586	0,6	48,9	1,77	3,06
Ahmad and Lue	1987	B7	127	254	208	4	10	2,25	67	13	586	0,58	44,5	2	3,18
Ahmad and Lue	1987	B8	127	254	208	3	10	2,25	67	13	586	0,45	46,7	2	3,18
Johnson & Ramirez	1989	6	305	610	539	3,1	102	2,49	55,9	19	525	0,32	191,5	2	2,97
Adebar and	1989	ST1	360	310	278	2,88	10	1,57	52,5	19	536	0,48	127,5	1,57	2,90
Adebar and	1989	ST16	290	210	178	4,49	10	3,04	51,5	19	536	0,49	75,1	2	2,88
Adebar and	1989	ST23	290	310	278	2,88	10	0,99	58,9	19	536	0,64	89,9	0,99	3,03
Thorenfeldt	1990	B11	150	250	221	3	25	1,82	54	16	500	0,64	58,1	1,82	2,93
Thorenfeldt	1990	B21	150	250	221	3	25	1,82	77,8	16	500	0,73	67,9	1,82	3,35
Thorenfeldt	1990	B61	300	500	442	3	25	1,82	77,8	16	500	0,48	179,8	1,82	3,35
Thorenfeldt	1990	B61R	300	500	442	3	25	1,82	77,8	16	500	0,48	180,3	1,82	3,35
Rommel	1991	s1_2	150	200	165	3,06	10	1,87	85,1	16	523	0,65	48	1,87	3,46
Hallgren	1994	B90SB13-2-8	163	233	192	3,65	10	2,17	86,2	18	630	0,78	82,5	2	3,48
Hallgren	1994	B90SB14-2-8	158	235	194	3,61	10	2,21	86,2	18	630	0,71	76,5	2	3,48
Hallgren	1994	B90SB22-2-8	158	234	193	3,63	10	2,22	84,6	18	630	0,71	75,5	2	3,46
Hallgren	1994	B90SB21-2-8	155	235	194	3,61	10	2,25	84,6	18	630	0,65	69	2	3,46
Kim, J.-K., and Par	1994	CTL-1	170	300	270	3	10	1,87	53,7	25	477	0,58	71,1	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	CTL-2	170	300	270	3	10	1,87	53,7	25	477	0,58	71,6	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	P1.0-1	170	300	272	3	10	1,01	53,7	25	477	0,83	58,3	1,01	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	P1.0-2	170	300	272	3	10	1,01	53,7	25	477	0,80	56,4	1,01	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	A4.5-1	170	300	270	4,5	10	1,87	53,7	25	477	0,81	66,6	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	A4.5-2	170	300	270	4,5	10	1,87	53,7	25	477	0,78	63,8	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	D142-1	170	170	142	3	10	1,87	53,7	25	477	0,63	41	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	D142-2	170	170	142	3	10	1,87	53,7	25	477	0,61	39,3	1,87	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	D550-1	300	620	550	3	10	1,88	53,7	25	477	0,51	226,1	1,88	2,92
Kim, J.-K., and Par	1994	D550-2	300	620	550	3	10	1,88	53,7	25	477	0,48	214,5	1,88	2,92

continuação da Tabela A.1

Autor	Ano	Experimento	b (mm)	h (mm)	d (mm)	a/d	s (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	a_g (mm)	f_y (MPa)	$\frac{M_{exp}}{M_R}$	V_{exp} (kN)	$\rho \leq 2$ (%)	$f_{ct,inf}$ (MPa)
Matsui, Y., Kurihara	1995	D1	100	180	150	3	10	2,65	70,9	19	367	0,75	33,4	2	3,24
Matsui, Y., Kurihara	1995	D2	100	180	150	3	10	2,65	70,9	19	367	0,76	33,9	2	3,24
Matsui, Y., Kurihara	1995	E1	100	180	150	3	10	2,65	83,4	19	367	0,84	38,3	2	3,44
Ghannoum	1998	H220-l	400	220	190	2,5	100	1,2	58,6	10	433	0,71	105,8	1,2	3,02
Ghannoum	1998	H350-l	400	350	313	2,5	100	1,2	58,6	10	477	0,58	157,1	1,2	3,02
Ghannoum	1998	H485-l	400	485	440	2,5	100	1,2	58,6	10	385	0,64	197,7	1,2	3,02
Ghannoum	1998	H220-h	400	220	190	2,5	100	2	58,6	10	433	0,56	135,3	2	3,02
Ghannoum	1998	H350-h	400	350	313	2,5	100	2	58,6	10	477	0,44	189,5	2	3,02
Islam M.S., Pam H	1998	M60-S0	150	250	207	3,86	10	2,02	50,8	10	554	0,58	45,5	2	2,86
Islam M.S., Pam H	1998	M60-S4	150	250	207	3,86	10	2,02	50,8	10	554	0,66	51,9	2	2,86
El-Sayed, A., El-Sa	2005	SH-1.7	250	400	326	3,07	300	1,72	62	19	460	0,82	160	1,72	3,09

(Fonte: Próprio autor)

LEGENDA:

- b – largura;
 h – altura;
 d – altura útil;
 a/d – distância de aplicação da carga sobre altura útil do elemento;
 s – comprimento de apoio;
 ρ – taxa de armadura longitudinal;
 f_c – resistência à compressão do concreto;
 a_g – diâmetro máximo do agregado;
 f_y – tensão de escoamento do aço;
 V_{exp} – força cortante última do ensaio;
 M_{exp}/M_R – momento fletor relativo à ruptura dividido pelo momento resistente da seção;
 $f_{ct,inf}$ – $0,7 \cdot 2,12 \cdot \ln(1,8 + 0,1 \cdot f_c)$, resistência à tração do concreto inferior;

Tabela A.2: Cálculos da força cortante resistente e relação V_{exp}/V_{calc}

Autor	Ano	Experimento	$\tau_R=0.25f_{ct,inf}$			$\tau_R=0.19f_{ct,inf}$		EC2 (2004)		
			k	V_{R1} (kN)	V_{exp}/V_{calc}	V_{R1} (kN)	V_{exp}/V_{calc}	k	V_{Rc} (kN)	V_{exp}/V_{calc}
Muruyama, Y.	1986	N2	1,35	88,03	0,95	66,91	1,25	1,89	73,17	1,14
Ahmad and Lue	1987	A7	1,39	53,73	0,87	40,84	1,14	1,98	44,79	1,04
Ahmad and Lue	1987	A8	1,39	53,73	0,91	40,84	1,20	1,98	44,79	1,09
Ahmad and Lue	1987	B7	1,39	58,39	0,76	44,38	1,00	1,98	48,19	0,92
Ahmad and Lue	1987	B8	1,39	58,39	0,80	44,38	1,05	1,98	48,19	0,97
Johnson & Ramirez	1989	6	1,06	258,86	0,74	196,73	0,97	1,61	229,39	0,83
Adebar and	1989	ST1	1,32	175,24	0,73	133,18	0,96	1,85	144,89	0,88
Adebar and	1989	ST16	1,42	105,59	0,71	80,25	0,94	2,00	87,11	0,86
Adebar and	1989	ST23	1,32	128,73	0,70	97,84	0,92	1,85	104,00	0,86
Thorenfeldt	1990	B11	1,38	64,55	0,90	49,06	1,18	1,95	53,73	1,08
Thorenfeldt	1990	B21	1,38	73,89	0,92	56,16	1,21	1,95	60,69	1,12
Thorenfeldt	1990	B61	1,16	248,19	0,72	188,62	0,95	1,67	208,09	0,86
Thorenfeldt	1990	B61R	1,16	248,19	0,73	188,62	0,96	1,67	208,09	0,87
Rommel	1991	s1_2	1,44	59,89	0,80	45,51	1,05	2,00	48,28	0,99
Hallgren	1994	B90SB13-2-8	1,41	76,63	1,08	58,24	1,42	2,00	62,71	1,32
Hallgren	1994	B90SB14-2-8	1,41	74,95	1,02	56,96	1,34	2,00	61,41	1,25
Hallgren	1994	B90SB22-2-8	1,41	74,12	1,02	56,33	1,34	2,00	60,72	1,24
Hallgren	1994	B90SB21-2-8	1,41	73,04	0,94	55,51	1,24	2,00	59,87	1,15
Kim, J.-K., and Par	1994	CTL-1	1,33	86,91	0,82	66,05	1,08	1,86	71,45	1,00
Kim, J.-K., and Par	1994	CTL-2	1,33	86,91	0,82	66,05	1,08	1,86	71,45	1,00
Kim, J.-K., and Par	1994	P1.0-1	1,33	71,98	0,81	54,71	1,07	1,86	58,52	1,00
Kim, J.-K., and Par	1994	P1.0-2	1,33	71,98	0,78	54,71	1,03	1,86	58,52	0,96
Kim, J.-K., and Par	1994	A4.5-1	1,33	86,91	0,77	66,05	1,01	1,86	71,45	0,93
Kim, J.-K., and Par	1994	A4.5-2	1,33	86,91	0,73	66,05	0,97	1,86	71,45	0,89
Kim, J.-K., and Par	1994	D142-1	1,46	50,11	0,82	38,08	1,08	2,00	40,39	1,02
Kim, J.-K., and Par	1994	D142-2	1,46	50,11	0,78	38,08	1,03	2,00	40,39	0,97
Kim, J.-K., and Par	1994	D550-1	1,05	247,16	0,91	187,84	1,20	1,60	221,69	1,02
Kim, J.-K., and Par	1994	D550-2	1,05	247,16	0,87	187,84	1,14	1,60	221,69	0,97

continuação da Tabela A.2

Autor	Ano	Experimento	$\tau_R=0.25f_{ct,inf}$			$\tau_R=0.19f_{ct,inf}$		EC2 (2004)		
			k	V_{R1} (kN)	V_{exp}/V_{calc}	V_{R1} (kN)	V_{exp}/V_{calc}	k	V_{RC} (kN)	V_{exp}/V_{calc}
Matsui, Y., Kurihara	1995	D1	1,45	35,26	0,95	26,80	1,25	2,00	28,16	1,19
Matsui, Y., Kurihara	1995	D2	1,45	35,26	0,96	26,80	1,26	2,00	28,16	1,20
Matsui, Y., Kurihara	1995	E1	1,45	37,38	1,02	28,41	1,35	2,00	29,73	1,29
Ghannoum	1998	H220-l	1,41	135,99	0,78	103,35	1,02	2,00	112,93	0,94
Ghannoum	1998	H350-l	1,29	204,48	0,77	155,40	1,01	1,80	167,37	0,94
Ghannoum	1998	H485-l	1,16	259,08	0,76	196,90	1,00	1,67	218,92	0,90
Ghannoum	1998	H220-h	1,41	161,89	0,84	123,04	1,10	2,00	133,89	1,01
Ghannoum	1998	H350-h	1,29	243,43	0,78	185,00	1,02	1,80	198,44	0,95
Islam M.S., Pam H	1998	M60-S0	1,39	61,90	0,74	47,04	0,97	1,98	51,71	0,88
Islam M.S., Pam H	1998	M60-S4	1,39	61,90	0,84	47,04	1,10	1,98	51,71	1,00
El-Sayed, A., El-Sa	2005	SH-1.7	1,27	151,23	1,06	114,94	1,39	1,78	124,06	1,29

(Fonte: Próprio autor)

APÊNDICE B

Para elementos com protensão inferior e superior, o momento de descompressão pode ser formulado como segue:

$$\frac{N_p e_p}{W} + \frac{N_p}{A_c} - \frac{N'_p e'_p}{W} + \frac{N'_p}{A_c} - \frac{M_0}{W} = 0 \quad (\text{B.1})$$

em que o módulo resistente da seção W é admitido igual em relação a fibra extrema superior e inferior.

$$M_0 = N_p e_p + \frac{N_p}{A_c} W - N'_p e'_p + \frac{N'_p}{A_c} W \quad (\text{B.2})$$

Para uma viga de seção retangular com largura b , altura h e excentricidades de protensão e_p e e'_p tem-se:

$$M_0 = N_p \left(e_p + \frac{h}{6} \right) + N'_p \left(-e'_p + \frac{h}{6} \right) \quad (\text{B.3})$$

$$M_0 = N_p h \left(\frac{e_p}{h} + \frac{1}{6} \right) + N'_p h \left(-\frac{e'_p}{h} + \frac{1}{6} \right) \quad (\text{B.4})$$

Para a maioria dos casos de ensaios a relação e_p/h e e'_p/h é cerca de 0,35. A equação B.4 torna-se:

$$M_0 = 0,517 N_p h - 0,183 N'_p h \quad (\text{B.5})$$

$$V_p = M_0 \left| \frac{V_x}{M_x} \right| = (0,517 N_p - 0,183 N'_p) h \left| \frac{V_x}{M_x} \right| \quad (\text{B.6})$$

Assumindo $d = 0,85h$:

$$V_p = (0,608 N_p - 0,215 N'_p) d \left| \frac{V_x}{M_x} \right| \quad (\text{B.7})$$

E ainda $N_p = \sigma_{cp} b d$ e $N'_p = \sigma'_{cp} b d$ e o coeficiente de segurança, tem-se:

$$V_p = \left(\frac{0,60 \sigma_{cp}}{\gamma_p} - 0,22 \sigma'_{cp} \right) \left| \frac{V_x}{M_x} \right| b d^2 \quad (\text{B.8})$$

APÊNDICE C

Tabela C.1: Dados detalhados de lajes alveolares analisadas no estudo sobre tração diagonal (Pajari, 2005)

n	Alvéolos	Exp.	h (mm)	h _{pc} (mm)	d'(mm)	l (cm ⁴)	b _w (cm)	S (cm ³)	A _p (cm ²)	A' _p (cm ²)	A _c (m ²)	f _c (MPa)	σ _{cp1} (MPa)	f _p (MPa)	f' _p (MPa)	σ _{cp} (MPa)	φ (mm)	s (cm)	V _{exp} (kN)	
1	C	31	200	200	100	39	6,02E+04	23,9	3,95E+03	6,51	0	0,119	54,8	1100	608,69	0	5,115	12,5	4,0	90,00
2	C	33	200	200	100	40	6,03E+04	23,8	3,95E+03	6,51	0	0,119	52,8	1100	608,69	0	5,115	12,5	4,0	115,45
3	C	40	200	200	100	39	6,07E+04	29,3	4,10E+03	6,51	0	0,126	76,5	1100	608,69	0	4,831	12,5	4,0	106,45
4	C	63	200	200	100	38	6,18E+04	26,2	4,10E+03	6,51	0	0,126	56,6	1000	553,35	0	4,392	12,5	4,0	137,50
5	C	98	265	260	130	36	1,51E+05	22,8	7,52E+03	9,3	0	0,172	71,3	1100	869,55	0	5,056	12,5	4,0	219,40
6	C	104	265	260	130	45	1,51E+05	24,4	7,53E+03	3,72	0	0,172	47,6	1000	316,20	0	1,838	12,5	4,0	136,00
7	C	107	265	260	130	39	1,51E+05	23,9	7,53E+03	3,72	0	0,172	47,9	1000	316,20	0	1,838	12,5	4,0	134,20
8	C	109	265	260	130	39	1,50E+05	24,2	7,52E+03	9,3	0	0,172	56,7	1000	790,50	0	4,596	12,5	4,0	188,80
9	C	110	265	260	130	32	1,46E+05	22	7,26E+03	7,44	0	0,164	56,5	1000	632,40	0	3,856	12,5	4,0	194,80
10	C	113	265	260	130	32	1,46E+05	22,6	7,24E+03	3,72	1,04	0,163	61,9	1000	316,20	79,56	2,428	12,5	4,0	181,10
11	C	114	265	260	130	34	1,46E+05	22,6	7,24E+03	7,44	1,04	0,163	61,9	900	569,16	79,56	3,980	12,5	4,0	190,10
12	C	115	265	260	130	40	1,46E+05	21,5	7,24E+03	5,58	0	0,163	63,2	1000	474,30	0	2,910	12,5	4,0	176,00
13	C	501	265	260	130	41	1,50E+05	22,4	7,48E+03	9,3	0	0,171	67,1	1100	869,55	0	5,085	12,5	7,5	213,40
14	C	502	265	260	130	41	1,50E+05	22,4	7,48E+03	9,3	0	0,171	67,1	1100	869,55	0	5,085	12,5	7,5	205,00
15	C	503	265	260	131	34	1,50E+05	22,1	7,74E+03	9,3	0	0,172	72	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	208,00
16	C	504	265	260	132	34	1,50E+05	22,1	7,74E+03	9,3	0	0,172	72	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	177,80
17	C	505	265	260	130	35	1,51E+05	21,6	7,52E+03	9,3	0	0,172	70,8	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	213,30
18	C	506	265	260	131	35	1,50E+05	21,6	7,74E+03	9,3	0	0,172	70,8	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	216,50
19	C	507	265	260	130	37	1,50E+05	21,8	7,51E+03	9,3	0	0,172	68	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	195,80
20	C	508	265	260	131	37	1,50E+05	21,8	7,74E+03	9,3	0	0,172	68	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	186,70
21	C	509	265	260	130	36	1,50E+05	21,7	7,50E+03	9,3	0	0,172	65,8	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	188,40
22	C	510	265	260	131	36	1,50E+05	21,7	7,74E+03	9,3	0	0,172	65,8	950	750,98	0	4,366	12,5	6,0	200,70
23	C	511	265	260	130	40	1,50E+05	22,1	7,46E+03	9,3	0	0,170	67,8	950	750,98	0	4,418	12,5	6,0	225,40
24	C	512	265	260	130	39	1,50E+05	22,3	7,46E+03	9,3	0	0,170	67,8	950	750,98	0	4,418	12,5	6,0	227,00
25	C	146	320	320	160	33	2,61E+05	25,6	1,08E+04	5,58	0	0,205	57	1000	474,30	0	2,314	12,5	4,0	213,70
26	C	148	320	320	160	51	2,59E+05	26,3	1,07E+04	10,23	1,04	0,203	46,8	1000	869,55	79,56	4,675	12,5	4,0	253,50
27	C	151	320	320	160	48	2,64E+05	27	1,09E+04	8,37	0	0,207	66,8	950	675,88	0	3,265	12,5	4,0	255,30
28	C	133	320	320	160	40	2,84E+05	26,1	1,22E+04	10,23	0	0,237	72,2	1000	869,55	0	3,669	12,5	6,0	296,55
29	C	134	320	320	160	39	2,86E+05	24,3	1,22E+04	10,23	0	0,237	72,2	1000	869,55	0	3,669	12,5	6,0	290,65
30	I	513	320	320	108,41	51	2,41E+05	25,8	9,95E+03	12,09	1,86	0,181	62,1	1100	1130,42	142,3	7,032	12,5	7,0	221,30
31	I	514	320	320	106	43	2,47E+05	30,9	1,03E+04	12,09	0	0,190	61,8	1100	1130,42	0	5,950	12,5	8,0	297,10
32	I	515	320	320	106	42	2,47E+05	31,1	1,03E+04	12,09	0	0,190	61,8	1100	1130,42	0	5,950	12,5	8,0	293,70

continuação da Tabela C.1

n	Alvéolos	Exp.	h (mm)	h _{pc} (mm)	d'(mm)	I (cm ⁴)	b _w (cm)	S (cm ³)	A _p (cm ²)	A' _p (cm ²)	A _c (m ²)	f _c (MPa)	σ _{cp} (MPa)	f _p (MPa)	f' _p (MPa)	σ _{cp} (MPa)	φ (mm)	s (cm)	V _{exp} (kN)	
33	I	516	320	320	108,41	38	2,42E+05	28,9	1,00E+04	10,23	0	0,180	64,3	1000	869,55	0	4,831	12,5	8,0	232,50
34	I	517	320	320	108,41	39	2,42E+05	28,7	9,99E+03	10,23	0	0,180	64,8	1000	869,55	0	4,831	12,5	8,0	202,70
35	I	160	370	370	132,24	48	4,13E+05	27,2	1,51E+04	11,16	0	0,243	68	1100	1043,46	0	4,294	12,5	6,0	306,30
36	I	161	370	370	132,24	48	4,13E+05	27,6	1,51E+04	11,16	0	0,243	68	1100	1043,46	0	4,294	12,5	6,0	282,35
37	I	162	400	400	106	53	4,41E+05	28,4	1,45E+04	11,16	0	0,213	65,2	1100	1043,46	0	4,899	12,5	8,0	314,40
38	I	178	400	400	146,5	48	4,41E+05	28,6	1,46E+04	12,09	0	0,218	71,5	1100	1130,42	0	5,185	12,5	8,0	291,55
39	I	188	400	400	152,5	48	4,49E+05	28,5	1,48E+04	12,09	0	0,219	55,5	1100	1130,42	0	5,162	12,5	8,0	293,55
40	I	518	400	400	102	41	4,13E+05	29,3	1,43E+04	12,09	0	0,210	67,3	1000	1027,65	0	4,894	12,5	10,0	394,90
41	I	519	400	400	102	41	4,33E+05	29,3	1,43E+04	12,09	0	0,210	67,3	1000	1027,65	0	4,894	12,5	10,0	444,00
42	I	520	400	400	102	36	4,34E+05	29,1	1,43E+04	10,23	0	0,210	64,2	1100	956,51	0	4,555	12,5	7,5	345,20
43	I	521	400	400	102	36	4,33E+05	29,1	1,43E+04	10,23	0	0,210	64,2	1100	956,51	0	4,555	12,5	7,5	391,20
44	I	191	500	500	120,5	53	9,47E+05	32,5	2,48E+04	14,88	0	0,300	70,8	1000	1264,80	0	4,216	12,5	8,0	363,20
45	I	193	500	500	120,5	56	9,40E+05	33,5	2,46E+04	14,88	0	0,300	70,8	1000	1264,80	0	4,216	12,5	8,0	415,80
46	I	198	500	500	120,5	47	9,46E+05	32,4	2,47E+04	14,88	0	0,300	76,4	1000	1264,80	0	4,216	12,5	8,0	472,00
47	I	199	500	500	120,5	52	9,64E+05	32,6	2,52E+04	19,53	0	0,300	74,7	1000	1660,05	0	5,534	12,5	8,0	558,40
48	I	200	500	500	120,5	53	9,57E+05	32,7	2,50E+04	19,53	0	0,300	74,7	1000	1660,05	0	5,534	12,5	8,0	515,60
49	I	201	500	500	120,5	51	9,61E+05	32,2	2,51E+04	19,53	0	0,300	74,7	1000	1660,05	0	5,534	12,5	8,0	492,20

LEGENDA:

b_w – largura;
 h – altura;
 h_{pc} – altura do ponto crítico;
 d' – distância do CG da armadura até a fibra inferior;
 I – inércia da seção;
 S – momento estático seção;
 A_p – área de aço inferior;
 A'_p – área de aço superior;

A_c – área de concreto da seção;
 f_c – resistência à compressão do concreto;
 f_p e f'_p – força de protensão;
 σ_{cp} – tensão devido à normal de protensão;
 φ – diâmetro das cordoalhas inferiores;
 s – comprimento de apoio;
 V_{exp} – força cortante última do ensaio;

Tabela C.2: Cálculos da força cortante resistente e relação V_{exp}/V_{calc}

n	EC2						Proposta EC2				ACI			Proposta ACI			EN1168:2008 simplificado		
	f_{bpt} (Mpa)	l_{pt} (cm)	l_x (cm)	α	$V_{calc.}$ (kN)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	$V_{calc.}$ (kN)	l_x (cm)	$0.5+(h_{pc}-d')/h$	$V_{exp.}/V_{calc.}$	α	$V_{calc.}$ (cm)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	$0.6+(h_{pc}-d')/h$	$V_{calc.}$ (cm)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	α	$V_{calc.}$ (cm)	$V_{exp.}/V_{calc.}$
1	6,599	56,42	16,00	0,28	131,09	0,69	111,97	22,10	0,81	0,80	0,26	100,57	0,89	0,91	91,02	0,99	0,26	103,13	0,87
2	6,506	57,22	16,00	0,28	128,92	0,90	109,33	22,00	0,80	1,06	0,26	97,97	1,18	0,90	88,17	1,31	0,25	101,42	1,14
3	7,466	49,86	16,00	0,32	175,00	0,61	149,16	22,10	0,81	0,71	0,26	141,28	0,75	0,91	127,86	0,83	0,29	137,76	0,77
4	6,680	50,66	16,00	0,32	142,55	0,96	122,36	22,20	0,81	1,12	0,26	110,11	1,25	0,91	100,20	1,37	0,28	112,22	1,23
5	7,278	51,15	19,00	0,37	186,85	1,17	174,96	28,40	0,86	1,25	0,30	152,92	1,43	0,96	147,04	1,49	0,33	146,72	1,50
6	6,178	54,78	19,00	0,35	149,75	0,91	128,93	27,50	0,83	1,05	0,30	117,38	1,16	0,93	108,80	1,25	0,31	118,67	1,15
7	6,204	54,55	19,00	0,35	147,29	0,91	130,71	28,10	0,85	1,03	0,30	118,52	1,13	0,95	112,60	1,19	0,31	116,72	1,15
8	6,685	50,63	19,00	0,38	180,95	1,04	166,75	28,10	0,85	1,13	0,30	143,23	1,32	0,95	136,07	1,39	0,34	142,08	1,33
9	6,676	50,70	19,00	0,37	160,67	1,21	152,30	28,80	0,88	1,28	0,30	130,75	1,49	0,98	127,73	1,53	0,34	126,42	1,54
10	6,908	48,99	17,00	0,35	158,59	1,14	147,43	26,80	0,88	1,23	0,27	131,83	1,37	0,98	128,79	1,41	0,31	125,51	1,44
11	6,908	44,09	17,00	0,39	172,00	1,11	162,93	26,60	0,87	1,17	0,27	137,14	1,39	0,97	132,92	1,43	0,35	135,30	1,41
12	6,962	48,61	17,00	0,35	155,25	1,13	139,68	26,00	0,85	1,26	0,27	124,04	1,42	0,95	117,36	1,50	0,31	122,66	1,43
13	7,118	52,30	19,00	0,36	179,49	1,19	163,69	27,90	0,84	1,30	0,30	143,30	1,49	0,94	135,03	1,58	0,33	140,93	1,51
14	7,118	52,30	19,00	0,36	179,49	1,14	163,69	27,90	0,84	1,25	0,30	143,30	1,43	0,94	135,03	1,52	0,33	140,93	1,45
15	7,304	44,02	20,00	0,45	177,11	1,17	168,22	29,70	0,87	1,24	0,32	148,08	1,40	0,97	144,09	1,44	0,41	138,98	1,50
16	7,304	44,02	21,00	0,48	178,78	0,99	170,44	30,80	0,88	1,04	0,34	149,12	1,19	0,98	145,68	1,22	0,43	140,21	1,27
17	7,259	44,29	21,00	0,47	179,94	1,19	168,89	30,50	0,87	1,26	0,34	144,07	1,48	0,97	139,08	1,53	0,43	141,12	1,51
18	7,259	44,29	21,00	0,47	173,67	1,25	163,85	30,60	0,87	1,32	0,34	144,07	1,50	0,97	139,64	1,55	0,43	136,20	1,59
19	7,153	44,95	21,00	0,47	177,99	1,10	165,31	30,30	0,86	1,18	0,34	141,66	1,38	0,96	135,67	1,44	0,42	139,59	1,40
20	7,153	44,95	19,00	0,42	169,47	1,10	158,68	28,40	0,86	1,18	0,30	139,62	1,34	0,96	134,25	1,39	0,38	133,07	1,40
21	7,067	45,50	19,00	0,42	171,99	1,10	161,04	28,40	0,86	1,17	0,30	137,64	1,37	0,96	132,35	1,42	0,38	135,05	1,40
22	7,067	45,50	21,00	0,46	169,84	1,18	159,41	30,50	0,87	1,26	0,34	139,68	1,44	0,97	134,85	1,49	0,42	133,20	1,51
23	7,145	45,00	21,00	0,47	181,87	1,24	166,33	30,00	0,85	1,36	0,34	141,75	1,59	0,95	134,12	1,68	0,42	142,61	1,58
24	7,145	45,00	21,00	0,47	183,51	1,24	168,73	30,10	0,85	1,35	0,34	143,68	1,58	0,95	136,50	1,66	0,42	143,90	1,58
25	6,698	50,53	26,00	0,51	218,74	0,98	209,38	38,70	0,90	1,02	0,42	187,63	1,14	1,00	187,04	1,14	0,46	172,48	1,24
26	6,109	55,40	26,00	0,47	233,22	1,09	213,59	36,90	0,84	1,19	0,42	186,48	1,36	0,94	175,40	1,45	0,42	182,37	1,39
27	7,106	45,25	23,50	0,52	256,99	0,99	235,88	34,70	0,85	1,08	0,38	207,12	1,23	0,95	196,76	1,30	0,47	201,98	1,26
28	7,311	46,29	23,50	0,51	248,54	1,19	236,78	35,50	0,88	1,25	0,38	216,53	1,37	0,98	211,12	1,40	0,46	195,18	1,52
29	7,311	46,29	24,00	0,52	233,92	1,24	223,67	36,10	0,88	1,30	0,38	202,92	1,43	0,98	198,48	1,46	0,47	183,66	1,58
30	6,917	53,82	24,00	0,45	273,93	0,81	197,00	29,74	0,68	1,12	0,38	220,29	1,00	0,78	171,70	1,29	0,40	213,55	1,04
31	6,904	53,92	24,00	0,45	311,41	0,95	229,80	30,30	0,70	1,29	0,38	260,53	1,14	0,80	207,61	1,43	0,40	243,30	1,22

continuação da Tabela C.1

n	EC2						Proposta EC2				ACI			Proposta ACI			EN1168:2008 alternativa		
	f_{bpt} (Mpa)	l_{pt} (cm)	l_x (cm)	α	$V_{calc.}$ (kN)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	$V_{calc.}$ (kN)	l_x (kN)	$0.5+(h_{pc}-d')/h$	$V_{exp.}/V_{calc.}$	α	$V_{calc.}$ (kN)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	$0.6+(h_{pc}-d')/h$	$V_{calc.}$ (kN)	$V_{exp.}/V_{calc.}$	α	$V_{calc.}$ (kN)	$V_{exp.}/V_{calc.}$
32	6,904	53,92	24,00	0,45	313,43	0,94	232,52	30,40	0,70	1,26	0,38	263,16	1,12	0,80	210,53	1,40	0,40	244,88	1,20
33	7,007	48,30	24,00	0,50	290,83	0,80	222,34	31,04	0,72	1,05	0,38	241,41	0,96	0,82	197,96	1,17	0,45	227,56	1,02
34	7,027	48,16	24,00	0,50	289,94	0,70	220,52	30,94	0,72	0,92	0,38	239,64	0,85	0,82	195,76	1,04	0,45	226,86	0,89
35	7,153	52,05	26,50	0,51	308,34	0,99	238,43	34,92	0,73	1,28	0,42	132,25	2,32	0,83	218,93	1,40	0,46	241,61	1,27
36	7,153	52,05	28,50	0,55	317,64	0,89	245,20	36,92	0,73	1,15	0,46	136,03	2,08	0,83	225,18	1,25	0,49	248,66	1,14
37	7,043	52,86	30,00	0,57	372,78	0,84	245,37	35,30	0,63	1,28	0,48	154,12	2,04	0,73	225,79	1,39	0,51	291,15	1,08
38	7,285	51,10	30,00	0,59	390,94	0,75	314,04	39,85	0,75	0,93	0,48	165,27	1,76	0,85	279,73	1,04	0,53	305,10	0,96
39	6,631	56,15	30,00	0,53	355,73	0,83	292,66	40,45	0,76	1,00	0,48	149,39	1,97	0,86	257,32	1,14	0,48	277,63	1,06
40	7,126	47,50	30,00	0,63	377,98	1,04	258,70	36,10	0,65	1,53	0,48	166,50	2,37	0,75	250,58	1,58	0,57	294,84	1,34
41	7,126	47,50	30,00	0,63	396,29	1,12	271,22	36,10	0,65	1,64	0,48	166,50	2,67	0,75	250,58	1,77	0,57	309,12	1,44
42	7,003	53,16	30,00	0,56	372,69	0,93	259,85	36,60	0,67	1,33	0,48	162,04	2,13	0,77	247,93	1,39	0,51	291,35	1,18
43	7,003	53,16	30,00	0,56	371,83	1,05	259,25	36,60	0,67	1,51	0,48	162,04	2,41	0,77	247,93	1,58	0,51	290,68	1,35
44	7,259	46,62	35,00	0,75	565,45	0,64	375,78	41,75	0,64	0,97	0,56	234,81	1,55	0,74	345,16	1,05	0,68	396,94	0,92
45	7,259	46,62	35,00	0,75	583,24	0,71	383,20	41,45	0,63	1,09	0,56	240,41	1,73	0,73	350,51	1,19	0,68	409,43	1,02
46	7,463	45,35	35,00	0,77	581,23	0,81	395,08	42,35	0,65	1,19	0,56	244,41	1,93	0,75	365,15	1,29	0,69	408,01	1,16
47	7,402	45,72	35,00	0,77	622,51	0,90	417,77	41,85	0,64	1,34	0,56	257,23	2,17	0,74	379,15	1,47	0,69	435,44	1,28
48	7,402	45,72	35,00	0,77	624,85	0,83	417,72	41,75	0,64	1,23	0,56	257,44	2,00	0,74	378,44	1,36	0,69	437,07	1,18
49	7,402	45,72	35,00	0,77	615,41	0,80	414,60	41,95	0,64	1,19	0,56	254,64	1,93	0,74	376,36	1,31	0,69	430,47	1,14

OBSERVAÇÕES:

As perdas foram consideradas como 5 e 15% para iniciais e finais, respectivamente (Pajari, 2005);

A variação da protensão (α) introduzida na seção analisada ($l_x = \beta h + s$) é linear;

Tabela C.3: Cálculos da força cortante resistente e relação V_{exp}/V_{calc}

Proposta NBR 14861							
n	f_{bp} (Mpa)	l_{bp}	l_x	α	$V_{calc.}$	$0.5+(h_{pc}-d')/h$	$V_{exp}/V_{calc.}$
1	2,47	64,14	22,10	0,34	109,21	0,81	0,82
2	2,44	65,05	22,00	0,34	106,64	0,80	1,08
3	2,80	56,69	22,10	0,39	145,61	0,81	0,73
4	2,51	57,60	22,20	0,39	119,44	0,81	1,15
5	2,73	58,15	28,40	0,49	170,01	0,86	1,29
6	2,32	62,27	27,50	0,44	126,96	0,83	1,07
7	2,33	62,01	28,10	0,45	128,69	0,85	1,04
8	2,51	57,56	28,10	0,49	162,06	0,85	1,16
9	2,50	57,64	28,80	0,50	148,37	0,88	1,31
10	2,59	55,69	26,80	0,48	144,73	0,88	1,25
11	2,59	50,12	26,60	0,53	158,58	0,87	1,20
12	2,61	55,27	26,00	0,47	136,85	0,85	1,29
13	2,67	59,46	27,90	0,47	159,09	0,84	1,34
14	2,67	59,46	27,90	0,47	159,09	0,84	1,29
15	2,74	50,04	29,70	0,59	163,34	0,87	1,27
16	2,74	50,04	30,80	0,62	165,40	0,88	1,07
17	2,72	50,35	30,50	0,61	163,92	0,87	1,30
18	2,72	50,35	30,60	0,61	159,03	0,87	1,36
19	2,68	51,10	30,30	0,59	160,47	0,86	1,22
20	2,68	51,10	28,40	0,56	154,19	0,86	1,21
21	2,65	51,72	28,40	0,55	156,49	0,86	1,20
22	2,65	51,72	30,50	0,59	154,72	0,87	1,30
23	2,68	51,16	30,00	0,59	161,45	0,85	1,40
24	2,68	51,16	30,10	0,59	163,78	0,85	1,39

continuação da Tabela C.3

Proposta NBR 14861							
n	f_{bp} (Mpa)	l_{bp}	l_x	α	$V_{calc.}$	$0.5+(h_{pc}-d')/h$	$V_{exp}/V_{calc.}$
25	2,51	57,44	38,70	0,67	204,64	0,90	1,04
26	2,29	62,98	36,90	0,59	206,63	0,84	1,23
27	2,66	51,44	34,70	0,67	229,53	0,85	1,11
28	2,74	52,62	35,50	0,67	230,09	0,88	1,29
29	2,74	52,62	36,10	0,69	217,29	0,88	1,34
30	2,59	61,19	29,74	0,49	190,28	0,68	1,16
31	2,59	61,30	30,30	0,49	222,49	0,70	1,34
32	2,59	61,30	30,40	0,50	225,11	0,70	1,30
33	2,63	54,91	31,04	0,57	215,57	0,72	1,08
34	2,64	54,76	30,94	0,57	213,82	0,72	0,95
35	2,68	59,17	34,92	0,59	231,52	0,73	1,32
36	2,68	59,17	36,92	0,62	237,88	0,73	1,19
37	2,64	60,09	35,30	0,59	237,72	0,63	1,32
38	2,73	58,09	39,85	0,69	303,39	0,75	0,96
39	2,49	63,83	40,45	0,63	282,68	0,76	1,04
40	2,67	54,00	36,10	0,67	250,16	0,65	1,58
41	2,67	54,00	36,10	0,67	262,28	0,65	1,69
42	2,63	60,44	36,60	0,61	251,90	0,67	1,37
43	2,63	60,44	36,60	0,61	251,32	0,67	1,56
44	2,72	53,00	41,75	0,79	363,40	0,64	1,00
45	2,72	53,00	41,45	0,78	370,62	0,63	1,12
46	2,80	51,56	42,35	0,82	381,99	0,65	1,24
47	2,78	51,98	41,85	0,81	402,27	0,64	1,39
48	2,78	51,98	41,75	0,80	402,23	0,64	1,28
49	2,78	51,98	41,95	0,81	399,20	0,64	1,23

OBSERVAÇÕES:

As perdas foram consideradas como 5 e 15% para iniciais e finais, respectivamente (Pajari, 2005);

A variação da protensão (α) introduzida na seção analisada ($l_x = \beta h + s$) é linear;

APÊNDICE D

As tabelas a seguir apresentam medidas aferidas nas seções transversais (lado A e lado B) das lajes. Os valores médios das grandezas medidas em cada laje foram utilizados nos cálculos.

Lajes A

Tabela D.1: Distâncias dos centros das cordoalhas inferiores até as bordas inferiores das lajes (nominal 4,0 cm)

		d' ₁	d' ₂	d' ₃	d' ₄	d' ₅	d' ₆	d' ₇	d' ₈	d' ₉	d' ₁₀	Média 1	Média 2
LA01-FC-A	A	5,10	5,00	5,40	5,40	4,80	4,90	4,60	4,70	4,70	5,00	4,96	4,81
	B	4,50	4,60	4,30	4,30	4,80	4,60	5,00	4,90	4,90	4,70	4,66	
LA02-C-A	A	4,63	4,61	4,71	4,85	4,26	4,35	4,16	3,84	4,28	3,73	4,34	4,34
	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LA03-C-A	A	4,58	4,49	4,93	4,75	3,99	4,39	4,03	3,90	4,06	4,49	4,36	4,48
	B	4,80	4,65	4,92	5,04	4,27	4,63	4,58	4,23	4,44	4,52	4,61	
LA04-C-A	A	4,15	4,20	4,10	4,25	4,70	4,40	5,10	5,20	4,80	4,80	4,57	4,64
	B	4,30	4,62	4,44	4,41	4,67	4,59	5,21	5,21	4,90	4,78	4,71	
LA05-C-A	A	4,10	4,20	4,20	4,20	4,50	4,20	4,80	4,95	4,60	4,60	4,44	4,41
	B	4,20	4,20	4,05	4,35	4,40	4,15	4,70	4,90	4,70	4,20	4,39	
LA06-C-A	A	4,00	4,00	4,90	4,05	4,55	4,10	4,80	5,10	4,55	5,00	4,51	4,58
	B	4,05	4,45	4,30	4,05	4,80	4,40	5,20	5,30	4,90	5,05	4,65	
LA07-C-A	A	4,24	4,44	4,14	4,19	4,61	4,32	4,94	4,98	4,70	4,99	4,56	4,61
	B	4,70	4,45	4,15	4,26	4,69	4,38	5,04	5,20	4,80	5,00	4,67	
LA08-C-A	A	4,60	4,31	4,01	4,14	4,50	4,12	4,77	5,00	4,52	4,65	4,46	4,45
	B	4,03	3,95	4,07	4,11	4,66	4,16	4,93	4,98	4,59	4,82	4,43	
LA09-C-A	A	4,00	3,90	4,01	4,09	4,51	3,99	5,14	4,92	4,55	4,70	4,38	4,38
	B	4,13	4,06	4,01	4,03	4,46	3,99	4,65	4,96	4,58	4,93	4,38	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.2: Alturas das nervuras (nominal 26,5 cm)

		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	Média 1	Média 2
LA01-FC-A	A	26,3	26,7	26,7	26,7	26,9	26,6	26,65	26,76
	B	27,3	27	27	26,7	26,8	26,4	26,87	
LA02-C-A	A	25,7	26,8	26,9	27	26,9	26,5	26,63	26,63
	B	-	-	-	-	-	-	-	
LA03-C-A	A	26	26,9	27	26,8	26,8	26,2	26,62	26,62
	B	26	26,7	26,8	26,8	27	26,4	26,62	
LA04-C-A	A	26,5	27	27,3	27,2	27,1	26,5	26,93	26,92
	B	26,7	27,2	27,1	27,1	27,1	26,2	26,9	
LA05-C-A	A	27	27,1	27,1	27	27	26,1	26,88	26,78
	B	26,4	27,2	27	27	26,8	25,6	26,67	
LA06-C-A	A	25,8	26,8	26,6	26,8	26,6	26,3	26,48	26,64
	B	26,3	27	27	27,1	27,1	26,3	26,8	
LA07-C-A	A	26,5	26,8	26,8	26,6	26,7	26	26,57	26,45
	B	26	26,5	26,7	26,5	26,5	25,8	26,33	
LA08-C-A	A	26	26,6	26,7	26,4	26,7	25,9	26,38	26,41
	B	25,5	26,8	27	27	26,7	25,6	26,43	
LA09-C-A	A	25,4	26,7	26,8	26,9	26,7	26	26,42	26,43
	B	25,7	26,7	26,5	26,5	26,6	26,6	26,43	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.3: Espessuras das nervuras (nominal: 3,9 cm para internas, b₂ a b₅, e 6,3 cm para externas)

		b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	∑ b _w	Média
LA01-FC-A	A	7	5,2	4,6	4,6	5,5	5,9	32,80	32,35
	B	7	4,9	4,4	4,3	5,6	5,7	31,90	
LA02-C-A	A	6,27	5,38	4,61	3,83	4,94	6,38	31,41	31,41
	B	-	-	-	-	-	-	-	
LA03-C-A	A	6,03	4,75	4,86	4,02	4,88	5	29,54	30,11
	B	6,7	4,72	4,46	4,46	4,83	5,51	30,68	
LA04-C-A	A	5,16	4,74	4,15	4,88	4,91	6,22	30,06	29,91
	B	5	4,61	4,22	4,72	4,99	6,21	29,75	
LA05-C-A	A	5,5	6	4,1	4,3	4,8	6,7	31,40	30,25
	B	5	5	4,1	3,9	4,2	6,9	29,10	
LA06-C-A	A	5	4,8	4	4,3	4,5	7,2	29,80	30,25
	B	5	4,9	4	4,3	5	7,5	30,70	
LA07-C-A	A	5,81	5,15	4,46	4,7	5,18	6,45	31,75	31,66
	B	5,65	4,9	4,74	4,74	4,87	6,66	31,56	
LA08-C-A	A	4,94	4,69	3,98	5,01	4,66	6,28	29,56	29,21
	B	4,97	4,52	4,26	4,72	4,55	5,84	28,86	
LA09-C-A	A	5,03	4,65	4,2	4,55	4,63	5,99	29,05	29,11
	B	4,91	4,62	4,26	4,49	4,71	6,17	29,16	

(Fonte: Próprio autor)

Lajes B

Tabela D.4: Distâncias dos centros das cordoalhas inferiores até as bordas inferiores das lajes (nominal 4,0 cm)

		d' ₁	d' ₂	d' ₃	d' ₄	d' ₅	d' ₆	d' ₇	d' ₈	d' ₉	d' ₁₀	Média 1	Média 2
LA01-C-B	A	3,68	3,37	3,24	3,45	3,23	3,08	3,21	3,25	3,27	3,09	3,29	3,20
	B	2,80	3,30	2,90	3,30	3,10	2,80	3,10	3,20	3,30	3,30	3,11	
LA02-C-B	A	2,40	3,10	2,80	3,10	2,90	2,70	3,00	3,20	3,30	2,80	2,93	2,93
	B	2,60	3,10	2,80	3,20	2,90	2,50	2,90	2,90	3,30	3,00	2,92	
LA03-C-B	A	2,30	3,00	2,80	3,30	3,10	2,80	3,10	3,00	3,10	3,10	2,96	2,81
	B	2,10	2,90	2,60	2,80	2,60	2,40	2,90	2,70	2,90	2,70	2,66	
LA04-C-B	A	2,90	3,30	2,90	3,30	3,00	2,70	3,00	3,10	3,50	3,20	3,09	2,98
	B	2,50	3,00	2,70	3,00	2,70	2,50	2,90	2,90	3,40	3,00	2,86	
LA05-C-B	A	2,30	3,00	2,70	3,10	2,80	2,70	2,90	3,00	3,20	3,00	2,87	2,86
	B	2,50	3,00	2,70	3,10	3,00	2,60	2,90	3,00	3,00	2,70	2,85	
LA06-C-B	A	2,70	3,40	3,00	3,50	3,40	2,80	3,20	3,10	3,30	2,80	3,12	3,12
	B	2,70	3,40	3,10	3,50	3,10	2,80	3,20	3,10	3,20	3,10	3,12	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.5: Distâncias dos centros das cordoalhas superiores até as bordas superiores das lajes (nominal 4,0 cm)

		d' ₁₁	d' ₁₂	Média 1	Média 2
LA01-C-B	A	6,16	6,30	6,23	6,22
	B	6,20	6,20	6,20	
LA02-C-B	A	6,00	5,70	5,85	6,10
	B	6,40	6,30	6,35	
LA03-C-B	A	5,90	5,90	5,90	6,10
	B	6,40	6,20	6,30	
LA04-C-B	A	6,20	6,20	6,20	6,10
	B	6,00	6,00	6,00	
LA05-C-B	A	6,20	6,20	6,20	6,05
	B	5,90	5,90	5,90	
LA06-C-B	A	5,90	6,40	6,15	6,08
	B	6,00	6,00	6,00	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.6: Alturas das nervuras (nominal 26 cm)

		h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	Média 1	Média 2
LA01-C-B	A	24,90	26,50	26,10	26,20	26,10	25,60	25,90	25,96
	B	24,50	26,50	26,00	26,00	26,60	26,50	26,02	
LA02-C-B	A	25,30	26,90	27,80	27,10	26,90	25,70	26,62	26,64
	B	26,30	26,80	27,10	27,00	26,90	25,90	26,67	
LA03-C-B	A	26,00	27,00	27,00	27,00	27,00	26,50	26,75	26,71
	B	26,00	27,00	26,50	27,00	27,00	26,50	26,67	
LA04-C-B	A	25,00	26,50	26,00	26,00	26,50	26,50	26,08	25,88
	B	24,50	26,00	26,00	26,00	26,50	25,00	25,67	
LA05-C-B	A	24,50	26,50	26,00	26,00	26,60	25,00	25,77	25,72
	B	24,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	25,67	
LA06-C-B	A	25,00	26,50	26,50	26,50	27,00	26,00	26,25	26,08
	B	25,00	26,50	26,00	26,00	26,50	25,50	25,92	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.7: Espessuras das nervuras (nominal 3,4 cm para internas, b_2 a b_5 , e 4,2 cm para externas)

		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	$\sum b_w$	Média
LA01-C-B	A	5,16	4,27	3,96	3,31	4,22	5,19	26,11	26,21
	B	5,10	4,40	3,80	3,50	4,30	5,20	26,30	
LA02-C-B	A	5,10	4,20	3,60	3,50	4,05	5,20	25,65	26,10
	B	5,50	4,25	3,60	3,60	4,40	5,20	26,55	
LA03-C-B	A	4,70	4,20	3,60	3,60	4,10	4,70	24,90	25,10
	B	4,90	4,30	3,50	3,50	4,10	5,00	25,30	
LA04-C-B	A	4,80	4,40	3,80	3,40	4,20	5,30	25,90	26,40
	B	5,20	4,60	3,70	3,70	4,50	5,20	26,90	
LA05-C-B	A	5,70	4,60	3,90	3,70	4,30	5,30	27,50	27,15
	B	5,00	4,40	4,00	3,70	4,50	5,20	26,80	
LA06-C-B	A	5,10	4,50	3,70	3,40	4,50	5,20	26,40	26,45
	B	5,40	4,30	3,70	3,50	4,20	5,40	26,50	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.8: Dimensão horizontal dos alvéolos (nominal 19,60 cm)

		av _{1h}	av _{2h}	av _{3h}	av _{4h}	av _{5h}	Média
LA01-C-B	A	18,34	19,04	18,85	19,22	18,85	18,63
	B	18,50	18,90	19,10	19,00	18,40	
LA02-C-B	A	18,70	19,00	19,10	19,30	18,65	18,35
	B	18,25	18,80	18,80	19,05	18,05	
LA03-C-B	A	18,90	19,40	19,30	19,20	19,00	18,65
	B	18,40	19,30	19,30	19,30	18,30	
LA04-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	
LA05-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	
LA06-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	

(Fonte: Próprio autor)

Tabela D.9: Dimensão vertical dos alvéolos (nominal 19,60 cm)

		av _{1v}	av _{2v}	av _{3v}	av _{4v}	av _{5v}	Média
LA01-C-B	A	16,01	16,71	16,67	16,73	16,92	16,71
	B	16,80	17,10	17,20	17,00	16,50	
LA02-C-B	A	17,00	17,40	17,50	17,30	17,40	17,50
	B	17,40	17,7	17,60	17,30	17,60	
LA03-C-B	A	17,20	17,20	17,50	17,70	17,90	17,75
	B	17,40	17,7	17,60	17,30	17,60	
LA04-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	
LA05-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	
LA06-C-B	A	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	

(Fonte: Próprio autor)

APÊNDICE E

Apresentam-se a seguir as principais formulações para o cálculo das perdas de protensão. Mais informações sobre perdas de protensão por pré-tração podem ser encontradas em Carvalho (2012).

Dados gerais:

- Cimento ARI;
- Umidade relativa do ar (U) igual a 70%;
- Temperatura (T) igual a 20°;
- Classe de agressividade ambiental (CAA) igual a II.

E.1 Perdas Iniciais

E.1.1 Ancoragem

- Comprimento da pista (L) = 150 m;
- Encurtamento total do cabo (Δl) = 6 mm;

$$\varepsilon l = \frac{\Delta l}{L} = \frac{0,006}{150} = 0,00004$$

$$\Delta\sigma_{anc} = Ep \cdot \varepsilon l = 195000 \cdot 0,00004 = 7,8 \text{ MPa}$$

E.1.2 Relaxação da Armadura

$$\Delta\sigma_r = \psi(t, t_0) \cdot \sigma_{pi}$$

em que:

- $\psi(t, t_0)$ é o coeficiente de relaxação da armadura: $\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \left[\frac{t-t_0}{41,67} \right]^{0,15}$
- σ_{pi} é a tensão da armadura de protensão devido ao pré=alongamento;
- ψ_{1000} pode ser obtido por interpolação de valores tabelados em Carvalho (2012);

Para a interpolação utiliza-se o valor de R, dado por:

$$R = \frac{(\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{anc})}{f_{pytk}}$$

Para os ensaios $t = 1$ dia e $t_0 = 0$.

E.1.3 Deformação imediata do concreto

$$\Delta\sigma_{p,i} = \alpha_p \cdot \sigma_{cg, cordoalhas}$$

em que:

– α_p é a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto: $\alpha_p = \frac{E_p}{E_{ci}}$

– $\sigma_{cg, cordoalhas}$ é a tensão no concreto ao nível do centroide da armadura de protensão, dada pela seguinte forma:

$$\sigma_{cg, cordoalhas} = \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p * y_{cg, cordoalhas}}{I}$$

Como as ecoes analisadas próximas à extremidade da laje, desconsiderou-se o efeito do peso próprio. Destaca-se ainda, que assume-se por simplificação o comportamento linear das tensões nesta região, mesmo sendo anterior ao comprimento de regularização.

E.1.4 Perdas Totais Iniciais

$$\Delta\sigma_{ini} = \Delta\sigma_{anc} + \Delta\sigma_r + \Delta\sigma_{p,i}$$

OBSERVAÇÃO: Para o cálculo do comprimento de transferência da protensão, considera-se como perdas iniciais apenas a de ancoragem das cordoalhas na extremidade da pista de protensão e a da relaxação devido ao pré-alongamento;

E.2 Perdas Diferidas

E.2.1 Fluência

A perda de protensão devido à fluência é obtida por:

$$\Delta\sigma_{p,c}(t, t_0) = \alpha_p \cdot (\sigma_{cg, cordoalhas} \cdot \varphi(t, t_0))$$

em que,

– $\varphi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência, dado pela soma dos coeficientes de fluência rápida irreversível (φ_α), coeficiente de deformação lenta reversível (φ_f) e pelo coeficiente de deformação lenta reversível (φ_d):

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_\alpha + \varphi_f + \varphi_d$$

Para detalhes ver Carvalho (2012).

E.2.2 Retração

A perda de protensão devido à retração é obtida por:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p$$

em que:

– $\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$ é o coeficiente da deformação específica de retração do concreto;

Para detalhes ver Carvalho (2012).

E.2.3 Relaxação da armadura

$$\Delta\sigma_r = \psi(t, t_0) \cdot \sigma_{pi}$$

em que:

– $\psi(t, t_0)$ é o coeficiente de relaxação da armadura: $\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \left[\frac{t-t_0}{41,67} \right]^{0,15}$

– σ_{pi} é a tensão da armadura de protensão após as perdas iniciais;

– ψ_{1000} pode ser obtido por interpolação de valores tabelados em Carvalho (2012);

Para a interpolação utiliza-se o valor de R, dado por:

$$R = \frac{(\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{anc})}{f_{pytk}}$$

Para os ensaios t = data do ensaio e t_0 = 1 dia.

E.2.4 Perdas Totais Diferidas (isoladas)

$$\Delta\sigma_{p,DIF} = \Delta\sigma_{p,c} + \Delta\sigma_{p,s} + \Delta\sigma_{p,r}$$

APÊNDICE F

A seguir são apresentadas as formulações utilizadas neste trabalho para o cálculo do comprimento de transferência de protensão das lajes alveolares com cordoalhas de 7 fios.

F.1 NBR14861

No item 7.3.2.3 desta norma, é definido o valor do comprimento de transferência de protensão, fixado em 85ϕ como valor superior de projeto. Para os ensaios foi utilizado o valor de 60ϕ , retirando, portanto, o coeficiente de segurança implícito (1,4).

F.2 NBR6118

Esta norma apresenta no item 9.4.5.2 a seguinte formulação para cordoalhas de três ou sete fios, apresentada sem coeficientes de segurança:

$$l_{bpt} = 0,0972\phi \frac{\sigma_{pi}}{f_{bp}}$$

em que, σ_{pi} é a tensão na armadura imediatamente após a liberação da protensão e, f_{bp} é dado no item 9.3.2.2 como:

$$f_{bp} = \eta_{p1}\eta_{p2}f_{ct,inf}$$

Sendo $\eta_{p1} = 1,2$ para cordoalhas e $\eta_{p2} = 1$ para situações de boa aderência. $f_{ct,inf}$ é o valor da resistência à tração correlacionada com o f_c da liberação da protensão.

Para o caso de liberação súbita ou não gradual, deve-se multiplicar o comprimento de transferência da protensão por 1,25.

F.3 EC2 e EN1168

O valor do comprimento de transferência da protensão para verificação da força cortante em lajes alveolares é tomado como:

$$l_{pt2} = 1,2l_{pt}$$

Dado no item 8.10.2.2 desta norma.

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}}$$

em que, α_1 é igual a 1 para liberação gradual e 1,25 para súbita, α_2 igual a 0,19 para cordoalhas de três e sete fios e σ_{pm0} é a tensão na armadura imediatamente após a liberação da protensão.

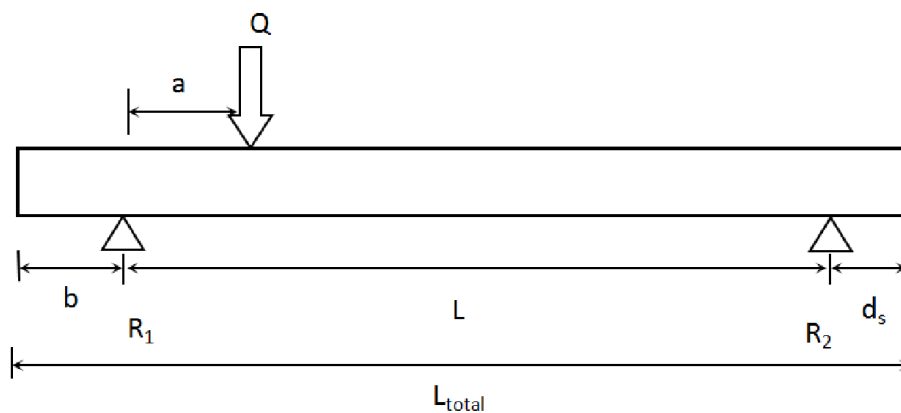
$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ct,inf}$$

Sendo $\eta_{p1} = 3,2$ para cordoalhas e $\eta_1 = 1$ para situações de boa aderência.

F.4 ACI 318

Esta norma prescreve o comprimento de transferência da protensão como 50ϕ . Como o ACI possui filosofia diferente acerca dos coeficientes de segurança, que são globais, não se faz necessário a alteração deste valor, como a alteração feita para esse cálculo na NBR14861.

APÊNDICE G



pp = peso próprio

P = peso total da laje

Q = carga total aplicada (atuador + viga de transmissão)

M_{max} = momento máximo correspondente a carga de ruptura por tração diagonal

LA01-C-B é exceção ao esquema acima, pois possui carregamentos simétricos tendo $b = d_s$

G.1 Lajes A

Ensaio	LA02-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	13 cm	P (kN)	27,9
L_{total}	600 cm		
d_s	40 cm	Q_{viga} (kN)	0,7
L	547 cm	$Q_{atuador}$ (kN)	252
		Q (kN)	252,7
Reações			
R_2	45,24 kN	Carga total (kN)	280,6
R_1	235,36 kN	M_{max} (kNm)	154,46

Ensaio	LA03-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	6,35 cm	P (kN)	27,9
L_{total}	600 cm		
d_s	50 cm	Q_{viga} (kN)	0,7
L	543,65 cm	$Q_{atuador}$ (kN)	263
		Q (kN)	263,7
Reações			
R_2	47,20 kN	Carga total (kN)	291,6
R_1	244,40 kN	M_{max} (kNm)	160,69

Ensaio	LA04-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	19 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	40 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	541 cm	Q _{atuador} (kN)	261
		Q (kN)	261,7
Reações			
R ₂	46,54 kN	Carga total(kN)	289,6
R ₁	243,06 kN	M _{max} (kNm)	159,34

Ensaio	LA05-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	31,75 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	20 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	548,25 cm	Q _{atuador} (kN)	285
		Q (kN)	285,7
Reações			
R ₂	48,17 kN	Carga total(kN)	313,6
R ₁	265,43 kN	M _{max} (kNm)	173,61

Ensaio	LA06-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	44,45 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	10 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	545,55 cm	Q _{atuador} (kN)	297
		Q (kN)	297,7
Reações			
R ₂	49,22 kN	Carga total(kN)	325,6
R ₁	276,38 kN	M _{max} (kNm)	180,25

Ensaio	LA07-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	63,5 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	10 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	526,5 cm	Q _{atuador} (kN)	378
		Q (kN)	378,7
Reações			
R ₂	60,18 kN	Carga total(kN)	406,6
R ₁	346,42 kN	M _{max} (kNm)	225,59

Ensaio	LA08-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	88,9 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	10 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	501,1 cm	Q _{atuador} (kN)	391,8
		Q (kN)	392,5
Reações			
R ₂	63,65 kN	Carga total(kN)	420,4
R ₁	356,75 kN	M _{max} (kNm)	230,75

Ensaio	LA09-C-A		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,65
b	107,95 cm	P(kN)	27,9
L _{total}	600 cm		
d _s	10 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	482,05 cm	Q _{atuador} (kN)	396
		Q (kN)	396,7
Reações			
R ₂	65,64 kN	Carga total(kN)	424,6
R ₁	358,96 kN	M _{max} (kNm)	230,76

G.2 Lajes B

Ensaio	LA01-C-B		
a	140 cm	pp (kN/m)	4,62
b	75 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	75 cm	Q _{viga} (kN)	3,8
L	450 cm	Q _{atuador} (kN)	528,23
		Q (kN)	532,03
Reações			
R ₂	279,88 kN	Carga total(kN)	559,75
R ₁	279,88 kN	M _{max} (kNm)	381,15

Ensaio	LA02-C-B-a		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,62
b	13 cm	P (kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	50 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	537 cm	Q _{atuador} (kN)	316,3
		Q (kN)	317
Reações			
R ₂	53,92 kN	Carga total (kN)	344,72
R ₁	290,80 kN	M _{max} (kNm)	191,20

Ensaio	LA02-C-B-b		
a	130 cm	pp (kN/m)	4,62
b	5 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	100 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	495 cm	Q _{atuador} (kN)	348,6
		Q (kN)	349,3
Reações			
R ₂	108,26 kN	Carga total(kN)	377,02
R ₁	268,76 kN	M _{max} (kNm)	345,18

Ensaio	LA03-C-B-a		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,62
b	25 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	50 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	525 cm	Q _{atuador} (kN)	362
		Q (kN)	362,7
Reações			
R ₂	60,29 kN	Carga total(kN)	390,42
R ₁	330,13 kN	M _{max} (kNm)	216,79

Ensaio	LA03-C-B-b		
a	130 cm	pp (kN/m)	4,62
b	13 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	95 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	492 cm	Q _{atuador} (kN)	378,2
		Q (kN)	378,9
Reações			
R ₂	116,29 kN	Carga total(kN)	406,62
R ₁	290,33 kN	M _{max} (kNm)	372,71

Ensaio	LA04-C-B		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,62
b	40 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	70 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	490 cm	Q _{atuador} (kN)	392
		Q (kN)	392,7
Reações			
R ₂	67,80 kN	Carga total(kN)	420,42
R ₁	352,62 kN	M _{max} (kNm)	231,00

Ensaio	LA05-C-B		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,62
b	50 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	60 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	490 cm	Q _{atuador} (kN)	402,17
		Q (kN)	402,87
Reações			
R ₂	68,61 kN	Carga total(kN)	430,59
R ₁	361,98 kN	M _{max} (kNm)	236,69

Ensaio	LA06-C-B		
a	66,25 cm	pp (kN/m)	4,62
b	60 cm	P(kN)	27,72
L _{total}	600 cm		
d _s	50 cm	Q _{viga} (kN)	0,7
L	490 cm	Q _{atuador} (kN)	428
		Q (kN)	428,7
Reações			
R ₂	71,54 kN	Carga total(kN)	456,42
R ₁	384,88 kN	M _{max} (kNm)	251,30

