

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Bruna Catoia¹; Marcelo de Araujo Ferreira² & Libânio Miranda Pinheiro³

Resumo

Muitos estudos experimentais, relacionados a lajes alveolares, tem sido realizados em vários países. Essas estruturas são elementos pré-moldados protendidos amplamente fabricados e utilizados ao redor do mundo. O comportamento último das lajes alveolares, principalmente quando submetidas a ações de cisalhamento, está relacionado a vários fenômenos diferentes como: a dispersão da protensão, a ancoragem dos cabos protendidos, momento de fissuração e, certamente, a resistência ao cisalhamento. O aumento da utilização de lajes alveolares no mercado brasileiro tem provocado um aumento significativo da produção, exigindo a avaliação da capacidade real desses elementos. Este artigo apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados em lajes alveolares protendidas produzidos por uma fábrica no Brasil. Os resultados experimentais foram comparados com as equações recomendadas pelo manual de projeto para lajes alveolares da FIB, pelo EC2 e ACI, sendo constatado que as equações da FIB (2000) fornecem valores mais precisos com relação aos determinados experimentalmente para o tipo de laje analisado.

Palavras-chave: Lajes alveolares. Ensaio padrão. Capacidade ao cisalhamento com flexão. Mecanismos de ruptura. Perda de ancoragem.

STRENGTH SHEAR OF PRESTRESSED HOLLOW CORE SLABS

Abstract

Wide-ranging experimental studies on hollow-core slabs have been conducted in several countries. These structures are precast prestressed members widely manufactured and used around the world. The ultimate behaviour of hollow core slabs mainly subjected to shear actions is related to many different phenomena such as prestressing dispersion, anchorage of prestressing strands, cracking bending moment and, of course, shear resistance. The increase of the use of hollow core slabs within the Brazilian market has caused a significant boost of production, demanding the assessment of the actual capacity of these elements. This paper presents the results of the shear tests carried out on hollow core slabs produced in a factory in Brazil. The experimental results were compared with equations from the handbook for hollow core slabs design of the FIB, EC2 and ACI, being found that the equations of FIB (2000) provide more accurate values compared to the values determined experimentally considering the type of slab analyzed.

Keywords: Hollow core slabs. Pattern test. Flexural shear capacity. Mechanisms of rupture. Anchorage loss.

¹ Doutora do Departamento de Engenharia de Estruturas - EESC-USP, bcatoia@yahoo.com.br

² Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, marceloaferrreira@uol.com.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, libanio@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

A indústria de pré-fabricados busca atender as demandas da sociedade, oferecendo, com seus produtos: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho. O emprego das estruturas pré-fabricadas permite obter significativa eficiência estrutural, com o emprego de elementos mais esbeltos. Além disso, garante o uso otimizado dos materiais, com redução do desperdício de recursos. Assim, o emprego desse sistema torna possível a obtenção de edifícios com maiores áreas livres e vãos superiores aos convencionais, o que já pode ser observado nos vãos de lajes e de coberturas usuais do sistema.

As primeiras lajes alveolares foram desenvolvidas na década de 1950, quando evoluíram as técnicas de protensão em longas pistas. Por mais de 30 anos o tipo de unidades produzidas pouco mudou. Nos Estados Unidos as unidades típicas apresentavam uma espessura de 300 mm. Somente a partir de 1980, na Europa, foi possível a produção econômica de unidades com espessuras maiores que 300 mm, devido a um avanço tecnológico na produção de unidades alveolares. A produção desses tipos de lajes se espalhou para os Estados Unidos.

As lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas. Dezenas de milhões de metros quadrados de lajes são fabricadas todo ano ao redor do mundo, com o emprego predominante na América do Norte e na Europa Ocidental; sua tecnologia de fabricação é bem desenvolvida em países como Alemanha e Estados Unidos. As lajes alveolares possuem uma concepção arrojada, podendo ser utilizadas nos mais variados sistemas estruturais, funcionando como laje de piso ou como painéis de fechamento. Além disso, elas também podem ser utilizadas em combinação com outros materiais, por exemplo, em estruturas metálicas, em estruturas de madeira, de concreto moldado no local etc. Alguns exemplos de aplicações das unidades alveolares em diversos sistemas construtivos podem ser observados nas Figuras 1 e 2.

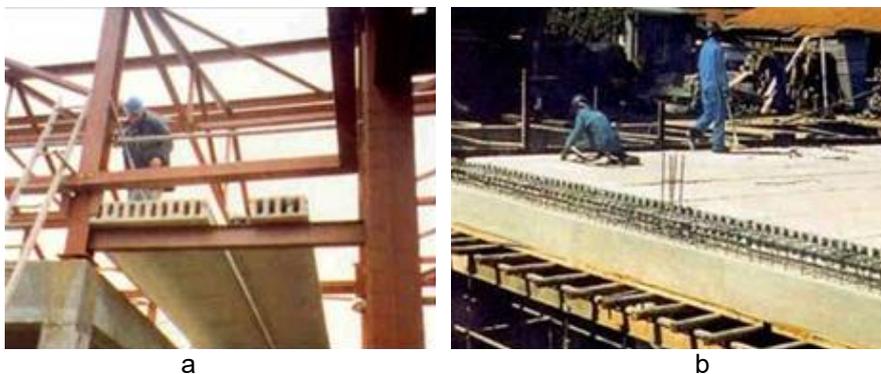


Figura 1 – Aplicação de unidades alveolares sobre estrutura metálica (UK); b) Aplicação de unidades alveolares sobre concreto moldado no local (África do Sul, 2001). Fonte: FERREIRA (2007).



Figura 2 – Aplicação de unidades alveolares sobre alvenaria estrutural (África do Sul, 2001); b) Aplicação de unidades alveolares sobre estrutura de madeira (Finlândia, 2005). Fonte: FERREIRA (2007).

Esse tipo de laje é mais utilizado em edificações, uma vez que a facilidade de manuseio, transporte, armazenagem e aplicação em grandes vãos reduzem a espessura média da estrutura, permitindo ganhos nas fundações, além de possuir capacidade de carga muito superior às das lajes convencionais de concreto armado. Segundo a FIP (1992), as lajes alveolares protendidas podem suportar uma carga de utilização superior a 30 kN/m^2 , são geralmente usadas para vencer vãos entre 4 m e 20 m, com espessuras que variam de 100 mm a mais de 400 mm, sendo a largura padrão de 1,2 m, porém, larguras maiores ou menores também são utilizadas.

As espessuras das lajes alveolares são diferentes nos vários países onde ela é empregada, sendo que no Brasil são comuns espessuras entre 150 mm e 300 mm, enquanto nos EUA e na Europa essas dimensões variam entre 265 mm e 500 mm.

Em virtude de se empregarem lajes de menor altura útil no Brasil, em geral se têm situações de projeto com maior quantidade de armadura de protensão, quando comparadas com lajes de mesmos vãos e carregamentos nos EUA e na Europa, podendo levar a um comportamento diferenciado.

O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho de lajes alveolares protendidas produzidas no Brasil, quando submetidas a ensaios de cisalhamento de acordo com normas européias. Os modelos experimentais foram comparados com equacionamentos teóricos recomendados pelo Guia de Projeto da FIB (2000), considerando as unidades alveolares em diferentes situações de projeto, tais como, laje com e sem capa de concreto e lajes com e sem o preenchimento parcial dos alvéolos. Além disso, é apresentada uma comparação entre os valores experimentais da capacidade ao cisalhamento e os resultados previstos teoricamente, a partir das equações recomendadas pela FIB (2000), EC2 (CEN, 2004) e ACI (2008), considerando unidades alveolares sem capa.

2 CAPACIDADE AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES

Na prática corrente de projeto, são definidas as forças de protensão e a geometria da laje de tal modo que conduza a uma situação de projeto em que a condição crítica para a seção das lajes alveolares seja atingida por momentos fletores, e não por forças de cisalhamento. No entanto, quando as forças cortantes são significativas nas unidades alveolares, devido à ausência de armadura transversal, a capacidade ao cisalhamento deve ser considerada adequadamente.

O mecanismo pelo qual a resistência do concreto à tração é atingida nas nervuras é altamente dependente do nível de protensão e da geometria da laje (largura das nervuras e formas dos alvéolos). Além disso, para uma laje fissurada na flexão, a capacidade de ancoragem das barras é essencial. A força de protensão na armadura é introduzida pela aderência e o comprimento de transferência real depende do tipo de armadura e do nível de protensão.

Para uma unidade alveolar simplesmente apoiada, a primeira fissura de flexão tem início na região onde a tensão de tração na fibra inferior primeiro atingir a resistência à tração. A formação de uma fissura proporciona um súbito aumento da força de tração na armadura, pois as tensões de tração na seção transversal do concreto não fissurado acabam atravessando a fissura por meio da armadura. Assim, esta força adicional na armadura necessita ser totalmente ancorada para evitar uma falha brusca na formação da fissura. Um aumento adicional do carregamento deve resultar na formação de novas fissuras de flexão mais próximas ao apoio.

Entretanto, se forças de cisalhamento estão presentes, com uma tensão de tração adicional nas nervuras, devido ao cisalhamento, a fissura de flexão resulta em uma típica fissura inclinada de cisalhamento com flexão. Além disso, esta fissura inclinada resulta em um aumento da força na armadura. Um menor ângulo entre a fissura inclinada e o eixo da laje resulta em um aumento adicional da força na armadura assim como um aumento das fissuras de flexão na borda inferior. Como a força de protensão não está totalmente distribuída ao longo da seção transversal na região próxima ao apoio, a capacidade ao cisalhamento não pode ser efetivamente aumentada nessa região,

especialmente se esta região estiver fissurada devido à flexão, causando um mecanismo final de falha de ancoragem.

2.1 Mecanismos de ruptura

Os principais modos de ruptura de lajes alveolares são: falha por perda de ancoragem; falha por tensões de cisalhamento superiores à tensão de tração do concreto na nervura; falha combinada de cisalhamento, flexão e escorregamento da armadura ativa; falha combinada por torção e cisalhamento; falha por flexão com possibilidade de escorregamento da armadura ativa junto ao apoio; e, finalmente, falha por interação dos mecanismos de flexão e de cisalhamento que podem ocorrer em peças com pequenos vãos e elevados carregamentos.

Os mecanismos de ruptura que cada peça pode apresentar variam de acordo com diversos parâmetros, como a ancoragem das cordoalhas, a resistência do concreto, altura da peça, entre outros.

Assim, na Figura 3 podem ser observados mecanismos de ruptura apresentados por dois diferentes tipos de laje quando elas se encontraram próximas ao colapso. Nesse caso são consideradas peças com diferentes alturas.

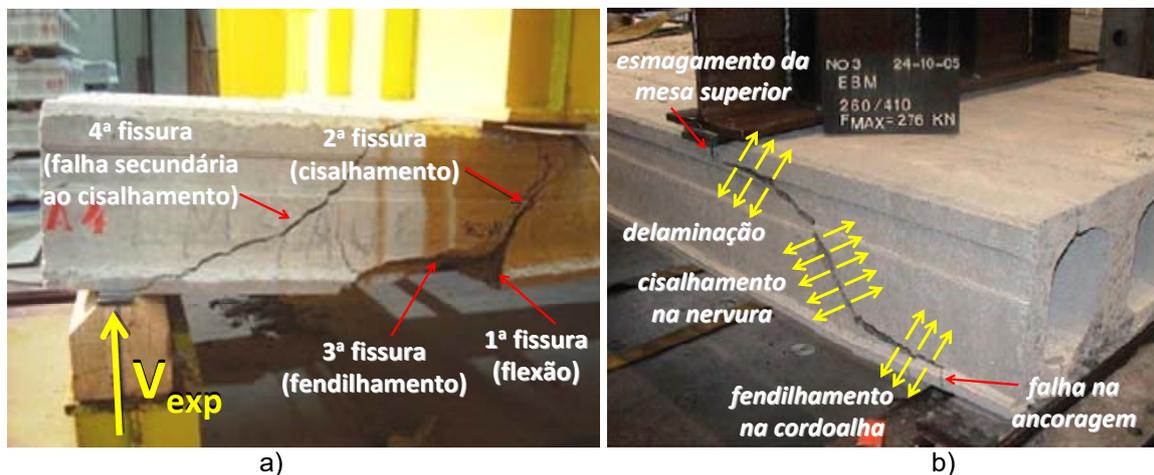


Figura 3 – Mecanismos de ruptura apresentados por dois diferentes tipos de laje. a) pequena altura (200 cm); b) maior altura (260 mm). Fonte: adaptado de Bertagnoli e Mancini (2009).

2.2 Resistência ao cisalhamento em região fissurada pela flexão

O Manual de Projeto para Lajes Alveolares da FIB (2000) apresenta equações para a consideração da contribuição da capa de concreto e do preenchimento dos alvéolos, visando o aumento da resistência ao cisalhamento. As resistências ao cisalhamento, para diferentes situações de lajes, sem e com capa, sem e com preenchimento dos alvéolos, estão apresentadas nas Eqs. de 1 a 4.

a) Elemento de laje alveolar sem capa estrutural

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

b) Elemento de laje alveolar com capa estrutural

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

c) Elemento de laje alveolar sem capa estrutural e com preenchimento dos alvéolos

$$V'_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V'_{Rd2} \quad (3)$$

d) Elemento de laje alveolar com capa estrutural e alvéolos preenchidos

$$\overline{V'_{Rdf}} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (4)$$

Nessas equações tem-se:

A_p : Área total da seção transversal de aço protendido;

b_w : Soma das larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares;

b'_w : Soma das larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares de seção composta com alvéolos preenchidos - $b'_w = b_w + n \cdot b_c \cdot E_c / E_p$;

b_c : Largura dos alvéolos preenchidos;

E_c / E_p : Relação entre o módulo de elasticidade do concreto moldado no local e do concreto pré-moldado;

d : Altura efetiva da seção transversal do elemento de laje alveolar;

d' : Altura efetiva da seção transversal do elemento de laje alveolar de seção composta;

f_{ctd} : Resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;

k : coeficiente $k = 1,6 - d \geq 1$; k' : coeficiente $k' = 1,6 - d' \geq 1$;

n : Quantidade de alvéolos preenchidos;

P_∞ : Força de protensão final, depois de todas as perdas;

V_{Rdf} : Resistência ao cisalhamento de projeto em zona de flexão, para lajes sem capa e sem alvéolos preenchidos;

V'_{Rdf} : Resistência ao cisalhamento de projeto em zona de flexão, para lajes sem capa estrutural e com preenchimento nos alvéolos;

$\overline{V_{Rdf}}$: Resistência ao cisalhamento de projeto em zona de flexão, para lajes com capa estrutural;

$\overline{V'_{Rdf}}$: Resistência ao cisalhamento de projeto em zona de flexão, para lajes com capa estrutural e com preenchimento nos alvéolos;

$$V_{Rd2} : \text{limite} - V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d ; \quad V'_{Rd2} : \text{limite} - V'_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b'_w \cdot 0,9 \cdot d' ;$$

$$v : v = 0,7 - f_{ck} / 200 \geq 0,5 ;$$

$$\rho_1 : \text{Taxa de armadura da seção alveolar pré-moldada} - \rho_1 = \frac{A_p}{b_w \cdot d} ;$$

$$\rho'_1 : \text{Taxa de armadura da seção alveolar pré-moldada composta} - \rho'_1 = \frac{A_p}{b'_w \cdot d'} ;$$

$$\sigma_{cpm} : \text{Tensão de compressão do concreto devida à força de protensão} - \sigma_{cpm} = \frac{P_\infty}{A} .$$

2.3 Resistência ao cisalhamento de acordo com CEN (2004)

Considerando elementos pré-tracionados com um único vão e sem armadura transversal, a resistência ao esforço cortante em zonas fissuras à flexão ou também denominada como Flexural Shear Capacity, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad (5)$$

Com um mínimo de:

$$V_{Rd,c} = \left(0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) b_w \cdot d \quad (6)$$

Sendo:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ com } d \text{ em mm};$$

ρ_1 : taxa de armadura longitudinal $\rho_1 = A_{st} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$;

A_{st} : área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (\ell_{bd} + d)$ para além da seção considerada;

b_w : Menor largura da seção transversal na área tracionada (mm);

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$ (MPa);

N_{Ed} : esforço normal na seção devido às ações aplicadas ou à protensão (em N);

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

$V_{Rd,c}$: força cortante resistente (em N).

De acordo com a norma EN 1168:2005, para uma laje com a presença de capa, o cálculo para a determinação da resistência ao cisalhamento em zonas fissuradas por flexão, recomendado pelo EC2 (Eq. 5), pode ser realizado substituindo d por d' (altura útil da seção composta) e ρ por ρ' , sendo:

$d' = d + h_c \rightarrow$ com h_c igual a altura da capa

$$\rho' = \frac{A_p}{b_w \cdot d'}$$

2.4 Resistência ao cisalhamento de acordo com ACI 318:2008

De acordo com o ACI 318:2008, a resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto, quando a fissuração diagonal resulta da combinação de cisalhamento e flexão (V_{ci}), é calculada pela seguinte expressão:

$$V_{ci} = 0,6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d_p + V_d + \frac{V_i \cdot M_{cre}}{M_{max}} \quad (7)$$

Sendo:

d_p : distância da fibra mais comprimida ao centro da armadura protendida, não pode ser menor que $0,8h$ (in);

V_{ci} : resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto quando a fissuração diagonal resulta da combinação de momento e cisalhamento (lb).

V_d : força cortante na seção devida à carga permanente sem fator de segurança (lb).

V_i : força cortante de projeto na seção devida às forças externas, ocorrendo simultaneamente com $M_{máx}$ (lb);

$M_{máx}$: momento de projeto máximo na seção devido à aplicação de forças externas (lb.in);

M_{cre} : momento que causa a fissuração na seção devido à aplicação de forças externas (lb.in),

Sendo:

$$M_{cre} = \left(\frac{I}{y_t} \right) \cdot (6 \cdot \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad (8)$$

f_{pe} : tensão de compressão no concreto devida ao efeito somente da força de protensão (após todas as perdas) na fibra extrema da seção onde a tensão de tração é causada por forças aplicadas externamente (Psi).

f_d : tensão devida à carga permanente, sem fator de segurança, na fibra extrema da seção onde a tensão de tração é causada pela aplicação de forças externas (Psi).

y_t : distância do eixo central da seção bruta, desprezando a armadura, até a face tracionada (in).

3 ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE AO CISALHAMENTO

A resistência das lajes alveolares ao cisalhamento está totalmente relacionada com a resistência à tração do concreto que a constitui, uma vez que esse tipo de laje não possui qualquer armadura transversal. Além disso, a resistência ao corte também é diretamente influenciada pela forma geométrica dos alvéolos, pela dosagem do concreto e pelo processo de fabricação. A resistência do concreto à tração é difícil de ser determinada de forma precisa a partir de métodos tradicionais, e a influência da forma da seção transversal e do método de fabricação não pode ser determinada diretamente. Assim, um ensaio padrão foi desenvolvido para determinar a resistência das lajes alveolares ao cisalhamento, para verificar o funcionamento da extrusora, e também, para determinar alguns parâmetros relacionados à capacidade de apoio. Tal ensaio padrão é indicado no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN 1168-2005 (CEN, 2005).

O ensaio ao cisalhamento, além de avaliar a resistência ao cisalhamento, permite avaliar indiretamente a resistência do concreto à tração diagonal e a eficiência da ancoragem da armadura de protensão junto ao apoio. A fim de se obter um efeito desfavorável da flexão sobre o mecanismo de resistência ao cisalhamento, o ensaio padrão recomendado pela FIP (1992) estabelece que o carregamento seja aplicado a uma distância de $2,5h$ do apoio (h é a altura total da laje). As condições de apoio devem permitir uma distribuição uniforme das forças ao longo da largura do elemento.

3.1 Metodologia e descrição dos ensaios de cisalhamento

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia empregada dividiu-se basicamente em três partes: parte teórica, parte experimental e análise dos resultados. A parte teórica engloba um levantamento bibliográfico, com o intuito de obter o máximo de informações com relação aos elementos de lajes alveolares, a partir de diversos recursos disponíveis: acervo da Biblioteca Central da Escola de Engenharia de São Carlos – USP; acervo da biblioteca do Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI – USP; acesso à rede Internet, colaboração de empresas de engenharia e de associações que possuem interesse na pesquisa e acesso à base de dados do Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE) da Universidade Federal de São Carlos. Ainda na parte teórica desenvolveu-se uma análise numérica, por meio do emprego de equacionamentos expressos na literatura, com o intuito de prever o comportamento das peças ensaiadas.

A parte experimental correspondeu a um estudo experimental dos elementos de lajes alveolares, baseado em ensaios físicos realizados conforme recomendações da FIP (1992). Essa parte engloba estudos quanto ao comportamento dos elementos alveolares e quanto a adoção de um esquema de ensaio capaz de garantir a análise do cisalhamento em região fissurada à flexão, para unidades alveolares protendidas. Além disso, esta etapa também compreende todos os procedimentos referentes à montagem e execução dos ensaios.

A análise dos resultados foi realizada por meio de ábacos, pela análise dos mecanismos resistentes na ruína e por comparações, tanto entre os valores experimentais como os obtidos com equacionamentos analíticos, expressos na revisão bibliográfica.

O esquema de ensaio pode ser observado na Figura 4.

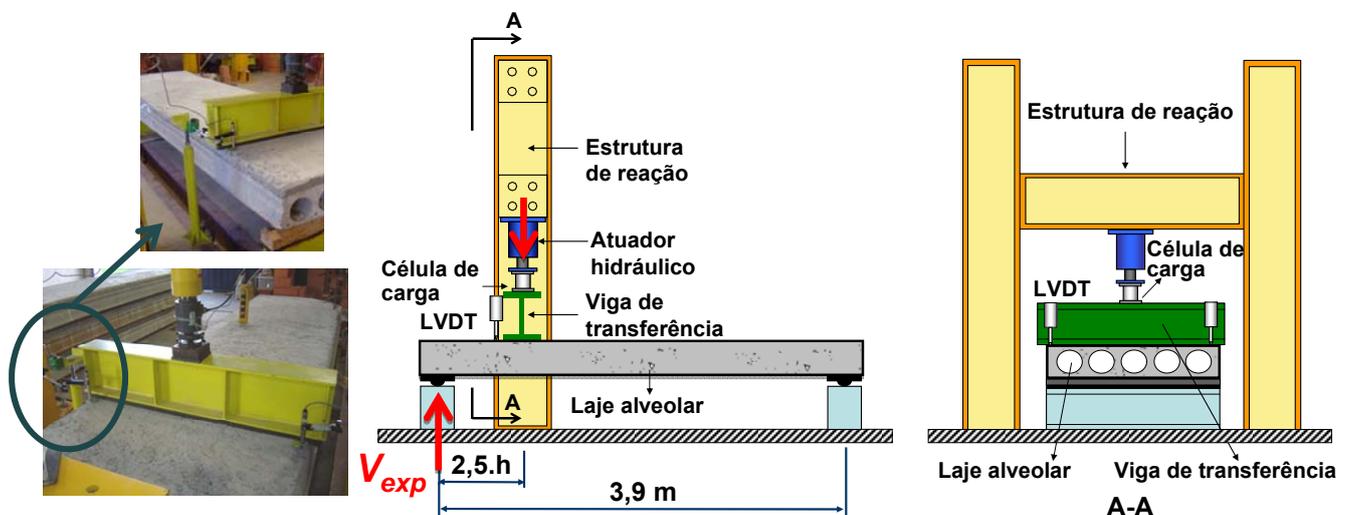


Figura 4 – Esquema de ensaio de acordo com FIP (1992) e EN 1168:2005 (CEN, 2005).

Para a realização do ensaio foi utilizado um atuador hidráulico com capacidade de 500 kN, sendo a força aplicada a uma taxa constante de 50 kN / min, conforme recomendado pelo FIP (1992), com monitoramento de uma célula de carga. Além disso, dois transdutores (LVDT) foram utilizados para o monitoramento de qualquer mudança do mecanismo de comportamento durante os ensaios. A partir de ensaios pilotos, com a fixação de LVDTs na estrutura de reação, observou-se que a fixação dos transdutores em estrutura presa ao piso do laboratório eliminaria quaisquer procedimentos de correção dos dados referente à deformação causada pelo noprène, presente entre a viga de

transferência e a unidade alveolar. Assim, a maioria dos ensaios foi realizada da maneira como indicado na Figura 4.

Estes instrumentos foram ligados a um equipamento de aquisição de dados, a fim de obter as curvas experimentais, que posteriormente foram utilizadas para a comparação com os valores teóricos. Nos ensaios, foram empregadas unidades alveolares de 4 m de comprimento, apresentando vão de 3,9 m.

Nas lajes que receberam capa, foi realizado um tratamento da superfície. Após a moldagem, foram criadas ranhuras longitudinais na face superior do elemento e posteriormente, antes da concretagem da capa, foi realizada limpeza com aspersão de água.

3.2 Propriedades e características dos modelos ensaiados

A fim de verificar a viabilidade da aplicação dos procedimentos recomendados pela FIP (1992) e pela EN 1168:2005 no Brasil, cinco séries de unidades alveolares foram testadas sob força cortante, compreendendo um total de 22 lajes. A Figura 5 mostra os 4 grupos das lajes estudadas com as respectivas seções transversais.

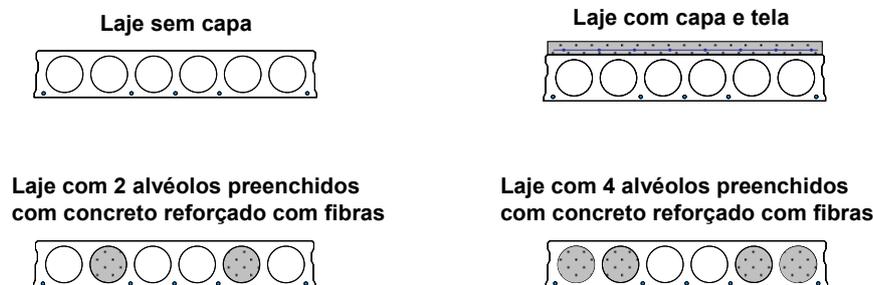


Figura 5 – Tipologias de lajes alveolares ensaiadas.

As lajes foram produzidas pelo método de extrusão e a seção transversal típica é mostrada na Figura 6.

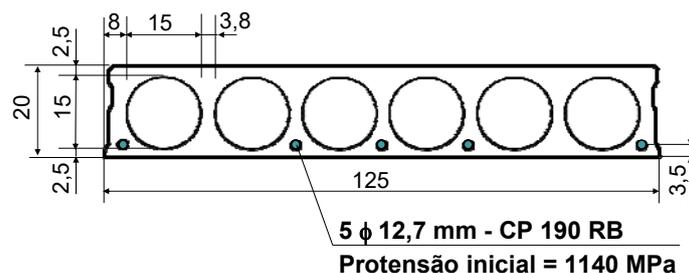


Figura 6 – Características geométricas das lajes alveolares ensaiadas.

Para comparar os resultados experimentais com os valores determinados a partir de equações teóricas, os materiais utilizados para a produção dos modelos foram caracterizados por meio de cilindros moldados e corpos-de-prova extraídos da peça, sendo ensaiados no mesmo dia dos ensaios das lajes. Os resultados reais para o concreto utilizado nas unidades alveolares, nas capas estruturais e nos alvéolos preenchidos estão apresentados na Tabela 1. Assim, foi determinado o valor médio da resistência à compressão das unidades, correspondendo a 42,3 MPa (para a data do ensaio). Tal valor médio foi considerado no cálculo teórico das resistências ao cisalhamento. A capa de concreto moldado no local apresentou 50 mm de altura, sendo que todas as capas foram moldadas no mesmo dia com o mesmo concreto, que apresentou resistência à compressão de 33,2 MPa no dia do ensaio.

Os 2 e 4 preenchimentos de alvéolos foram realizados com concreto reforçado com fibras na medida em que as lajes eram moldadas. A resistência à compressão do concreto que constituiu o preenchimento dos alvéolos, no dia do ensaio, correspondeu a 40,5 MPa. Além disso, a resistência à tração do concreto das unidades alveolares, no dia do ensaio, foi 4,09 MPa.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais reais na data dos ensaios.

Propriedades Tipo de laje	LA Moldagem f_c (MPa)	LA Extração f_c (MPa)	Capa Moldagem f_c (MPa)	Alvéolos Moldagem f_c (MPa)	LA Moldagem f_{ct} (MPa)	LA Moldagem E_c (GPa)	Área total A_c (mm ²)
Sem capa	41,3	43,3	-----	-----	4,09	28,5	137795
Capa + tela	41,3	43,3	33,2	-----	4,09	28,5	200295
2 AP	41,3	43,3	-----	40,5	4,09	28,5	175533
4 AP	41,3	43,3	-----	40,5	4,09	28,5	213272

LA: laje alveolar; AP: alvéolos preenchidos. Moldagem se refere ao ensaio realizado com corpos-de-prova cilíndrico moldados. Extração se refere ao ensaio realizado com corpos-de-prova extraídos da laje.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

As Figuras 7, 8 e 9 mostram as curvas experimentais de força cortante no apoio versus deslocamento para as unidades, sendo os resultados das lajes sem capa tomados como referência.

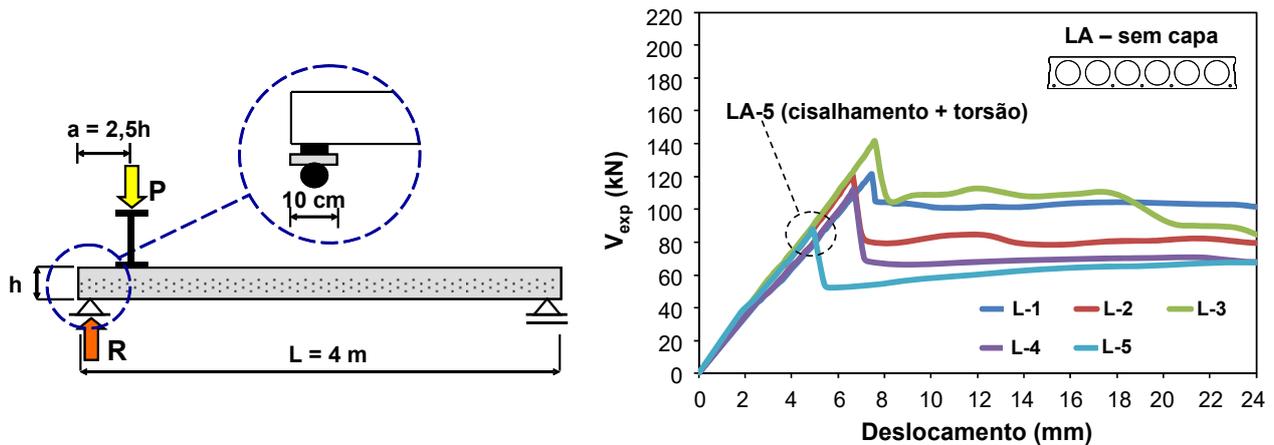


Figura 7 – Resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento para laje sem capa

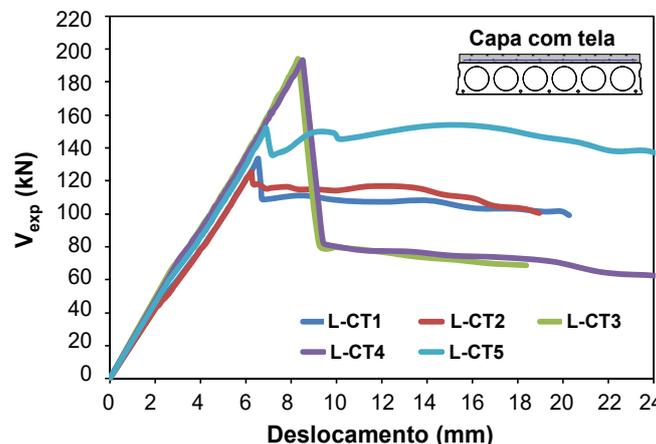


Figura 8 – Resultados experimentais para laje com capa e tela.

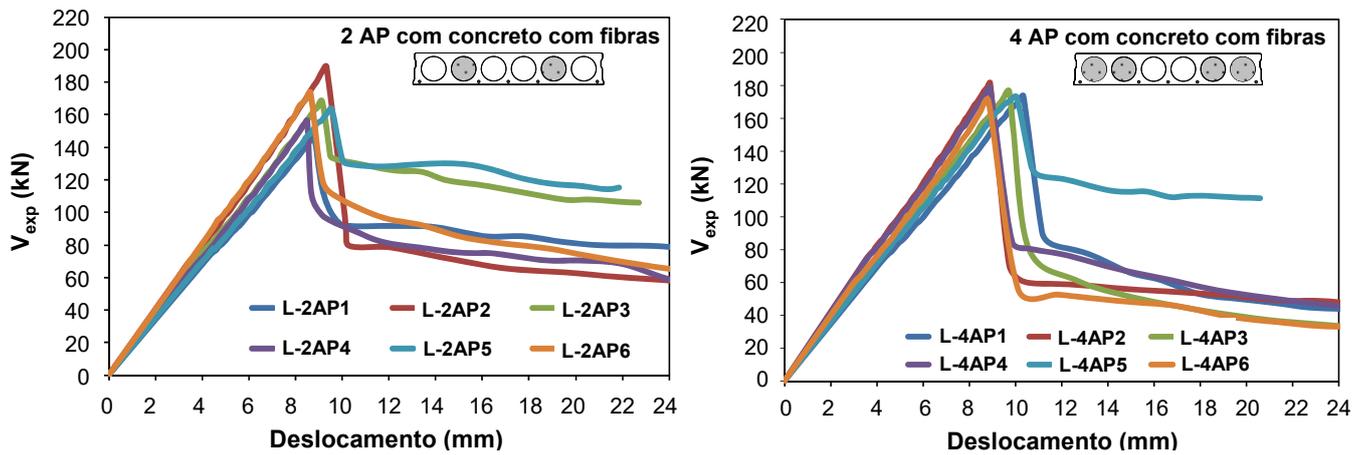
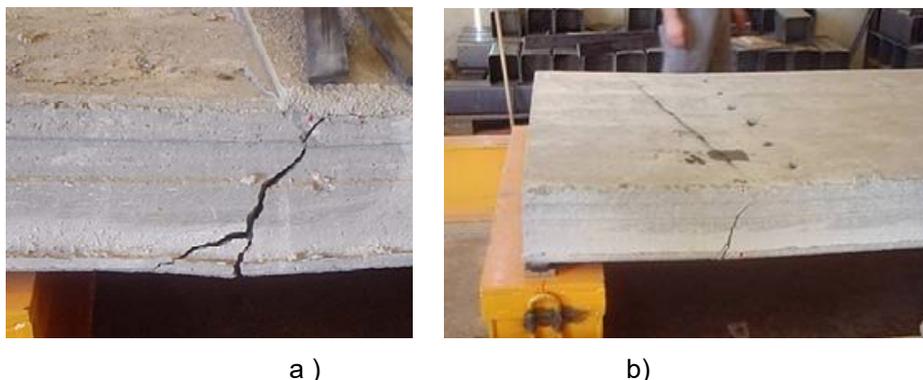


Figura 9 – Resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento para laje com 2 e 4 alvéolos preenchidos

Com os resultados experimentais, pode-se observar que a presença da capa contribuiu para melhorar a capacidade ao cisalhamento das lajes ensaiadas, comparando com as peças semelhantes sem capa. Esses resultados indicaram que foi eficaz a ação conjunta laje-capa para a maioria das unidades. Esse comportamento foi alcançado devido à realização do tratamento da interface, que consistiu na execução da rugosidade e posterior limpeza da face superior da laje, antes da concretagem da capa.

Também foi constatada uma melhoria no desempenho das lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos, comparando com peças sem qualquer preenchimento. Entretanto, as lajes com 4 alvéolos preenchidos alcançaram resistências próximas às das peças com 2 preenchimentos, indicando que dois alvéolos extras não afetaram o mecanismo de resistência real. Nos dois casos os alvéolos foram preenchidos juntamente com a moldagem das peças.

Devido ao arranjo utilizado nos ensaios, e a carga aplicada a 2,5 h do apoio, pode ocorrer mecanismo de cisalhamento com possibilidade de fissuras de flexão. A Figura 10 mostra a configuração de fissuração durante os ensaios de cisalhamento dos modelos sem a presença de capa estrutural. Como pode ser observado, para as lajes sem capa houve uma influência mais significativa das fissuras de flexão na capacidade ao cisalhamento. Além disso, após o fendilhamento do concreto na região próxima às cordoalhas ocorreu uma falha de ancoragem final, evidenciada pelo escorregamento das cordoalhas.



a)

b)

Figura 10 – Mecanismos de comportamento das lajes sem capa estrutural a) Interação dos mecanismos de cisalhamento, flexão com falha de ancoragem devido ao escorregamento da armadura; b) Laje com influência do mecanismo de torção.

Para lajes com capa e telas, a interferência de outros mecanismos (como a torção e a flexão) foi menos significativa (Figura 11). Isso ocorreu devido à mudança do mecanismo de ruptura causada pelo aumento da altura da laje, estando próximo ao mecanismo de ruptura quando as tensões de tração nas nervuras ultrapassam a resistência à tração do concreto, ou seja, cisalhamento puro. No entanto, observou-se que, juntamente com o aumento da capacidade ao cisalhamento, as peças com maiores alturas tenderam a apresentar ruptura frágil.



Figura 11 – Mecanismos de comportamento das lajes com capa estrutural.

A configuração de fissuração apresentada pelas lajes com dois alvéolos preenchidos pode ser observada na Figura 12. A partir dessa ilustração, é possível observar a presença da interação de flexão e cisalhamento, com o escorregamento das cordoalhas (identificado pelo fendilhamento do concreto na região das armaduras), resultando em uma perda de ancoragem da armadura ativa.



Figura 12 – Configuração de fissuração das lajes com dois alvéolos preenchidos.

A partir da configuração ilustrada na Figura 13, é possível observar que a laje apresentou a interação de flexão e cisalhamento, com perda de ancoragem da armadura ativa, podendo ser observado o fendilhamento do concreto. Além disso, nas lajes com quatro alvéolos preenchidos, foi constatada a fissuração da nervura central, localização entre os alvéolos sem preenchimento, como pode ser observado na indicação da Figura 13.



Figura 13 – Configuração de fissuração das lajes com quatro alvéolos preenchidos.

◆ Comparação teórica e experimental

As comparações entre os resultados experimentais e os valores teóricos obtidos pelas Eqs. de 1 a 3, de acordo com FIB (2000), estão apresentadas na Tabela 2. Os valores previstos foram obtidos considerando as propriedades reais dos materiais (ver Tabela 1). As perdas referentes à força de protensão foram calculadas e correspondeu a 12% para a data dos ensaios. Como pode ser observado na Tabela 2, nos casos de lajes sem capa o resultado médio real foi 5% maior do que a resistência ao cisalhamento prevista. Para os casos de lajes com capas, considerando telas soldadas, os resultados médios reais foram 29% maior do que a resistência ao cisalhamento prevista. No entanto, os valores reais foram menores do que as capacidades previstas para os casos, com 2 e 4 alvéolos preenchidos.

Além disso, pode-se observar que as lajes com capas estruturais, armadas com telas soldadas, apresentaram aumento de 37% na capacidade ao cisalhamento, em comparação com a capacidade das lajes sem capa. As lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos apresentaram aumentos de 42% e 50%, respectivamente, com relação às lajes sem preenchimentos. Assim, diferentemente do previsto, as lajes com 4 alvéolos preenchidos apresentaram um aumento da capacidade ao cisalhamento semelhante ao das peças com 2 alvéolos preenchidos, correspondendo a um aumento de apenas 6% devido ao preenchimento de mais 2 alvéolos.

Tabela 2 – Comparação entre valores experimentais e teóricos, considerando formulações de FIB (2000)

Tipo de lajes ensaiadas	$V_{R,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\frac{V_{R,exp}}{V_{Rk}}$
Sem capa	119,98	114,5	1,05
Capa com tela	164,27	127,5	1,29
2 AP	170,21	193,2	0,88
4 AP	179,78	266,4	0,67

Nesta tabela: $V_{R,exp}$ – capacidade ao cisalhamento média dos ensaios; V_{Rk} – resistência ao cisalhamento calculada usando as resistências à tração e à compressão reais;

Na Figura 14 pode-se ter uma visão global dos ensaios, com os resultados médios de cada grupo.

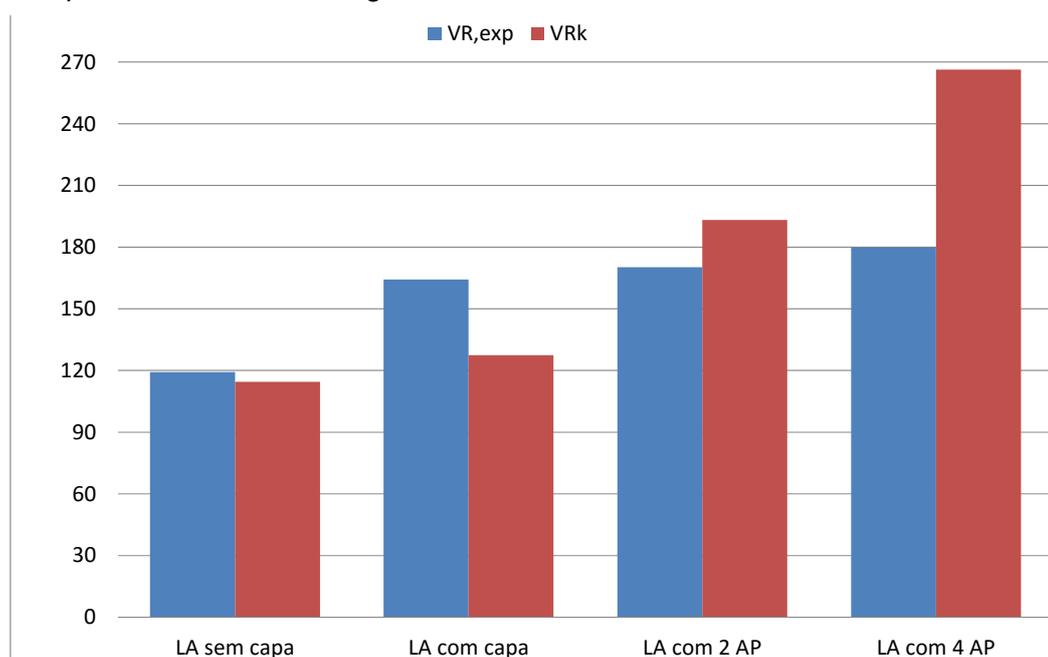


Figura 14 – Comparação entre valores experimentais e teóricos, considerando os quatro grupos analisados.

Esses resultados mostram que, embora os alvéolos tenham sido preenchidos logo após a moldagem das lajes, ou seja, antes que os cabos fossem liberados e as forças de protensão atuassem no elemento, os alvéolos preenchidos não foram capazes de aumentar a área total de concreto que contribuiu para receber as forças de protensão ou aumentar efetivamente a largura equivalente das lajes, considerada pela soma das larguras das nervuras. Além disso, o aumento da capacidade ao cisalhamento para as lajes com 4 alvéolos preenchidos foi relativamente menor do que o aumento obtido para as lajes com 2 preenchimentos.

Esse comportamento está relacionado com o posicionamento dos 4 alvéolos preenchidos, que possibilitou a existência de pontos de concentração de tensões na nervura central da laje, ou seja, pontos fracos, capazes de delimitar a capacidade global da peça (Figura 15).

As lajes sem capa possuem finas nervuras, o que faz com que esses elementos tenham comportamento crítico ao cisalhamento. Quando são executados preenchidos de alvéolos ocorre um reforço das finas nervuras próximas aos preenchimentos, entretanto, as nervuras adjacentes a alvéolos vazios tornam-se pontos fracos, ou seja, pontos de concentração de tensões.

Diante disso, novos estudos são necessários para obter uma melhor compreensão destes efeitos.

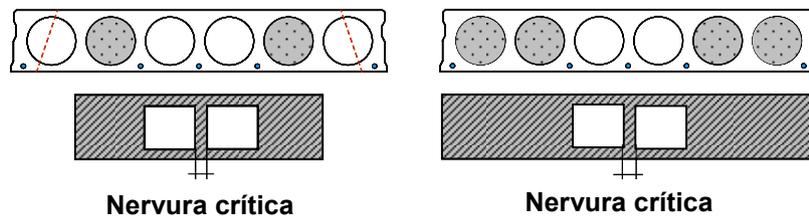


Figura 15 – Nervura crítica na laje alveolar com dois e quatro alvéolos preenchidos

Além disso, na Tabela 3 é apresentada uma comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos calculados a partir das equações recomendadas pela FIB (2000), EC2 (CNE, 2004) e ACI (2008), considerando a laje sem capa estrutural. Como pode ser observado, os resultados obtidos a partir das lajes produzidas no Brasil foi satisfatório para todas as equações, sendo que o melhor ajuste na previsão da capacidade ao cisalhamento foi obtido com as equações recomendadas pela FIB (2000).

Tabela 3 – Comparação teórico-experimental usando equações de FIB (2000), EC2 (2004) e ACI (2008)

Tipo de laje ensaiada	$V_{R,exp}$ (kN)	V_{Rk}^* (kN)	$\frac{V_{R,exp}}{V_{Rk}}$	V_{Rk}^{**} (kN)	$\frac{V_{R,exp}}{V_{Rk}}$	V_{Rk}^{***} (kN)	$\frac{V_{R,exp}}{V_{Rk}}$
Laje sem capa	119,98	114,5	1,05	93,87	1,28	107,58	1,12

*cálculo de acordo com FIB (2000); **cálculo de acordo com EC2 (2004); ***cálculo de acordo com ACI (2008)

5 CONCLUSÕES

Analisando a ruína das lajes sem capa, em uma das peças foi observada a presença do mecanismo de torção. Para a realização do ensaio, empregou-se rótula somente em uma direção, sendo possível a ocorrência de torção, ocasionando a interação de mecanismos, o que proporcionou um desempenho inferior à peça. A partir da comparação dos gráficos para o mesmo tipo de laje, observou-se que a torção foi capaz de alterar o comportamento da peça, prejudicando seu desempenho. Com isso, é possível concluir que, além de observar resultados, é importante a identificação dos mecanismos presentes, a partir da configuração da fissuração. Além disso, quando ocorre a combinação de mecanismos, não compatíveis com as considerações feitas nas equações empregadas, elas acabam não sendo válidas para representar o comportamento da unidade alveolar. Dessa forma, para realizar a comparação entre resultados experimentais e teóricos, é importante observar se o comportamento da unidade se encontra dentro das limitações das equações empregadas.

As comparações entre os valores teóricos e experimentais obtidos, considerando diferentes equações recomendadas pela FIB (2000), EC2 (CNE, 2004) e ACI (2008), para lajes sem capa estrutural, permitiram verificar que as equações da FIB (2000) e do ACI (2008) forneceram previsões próximas. Entretanto foi constatado que as equações da FIB (2000) fornecem valores mais precisos com relação aos determinados experimentalmente, para este tipo de laje analisada.

Foi observado que para as lajes com capa a equação da FIB (2000) subestimou a resistência experimental, apresentando uma diferença bem maior do que no caso das lajes sem capa. Vale ressaltar que nas equações da FIB (2000) não é considerada a diferença de resistência à tração entre a laje e a capa. Para os casos de 2 e 4 alvéolos preenchidos, os resultados experimentais foram menores que os valores previstos, sendo necessário o estudo de novas considerações para prever o comportamento desses elementos.

No caso de laje com altura de 200 mm, com a carga aplicada a 2,5h do apoio, os resultados experimentais e suas análises revelaram que o mecanismo de comportamento quanto ao cisalhamento pode ser afetado pela presença de fissuras de flexão, e o mecanismo de ruptura na região do apoio será governado pelas tensões de tração normais às cordoalhas (falha de ancoragem). Portanto, esse mecanismo observado justifica a boa aproximação entre a resistência teórica avaliada pelo FIB (2000) para regiões fissuradas pela flexão e o resultado experimental obtido.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa, à Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto (ABCIC), pelo auxílio e possibilidade de interação com as empresas fornecedoras das peças ensaiadas, ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, pelo suporte ao desenvolvimento do doutorado e ao Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE), pela possibilidade de realização dos ensaios.

7 REFERÊNCIAS

American Concrete Institute **ACI Committee 318**, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-2008) and Commentary, Farmington Hills, MI, 2008.

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

Comite Europeen de Normalisation, CEN **EN 1992-1-1**. Eurocode 2 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2004.

Comite Europeen de Normalisation, CEN. **EN 1168**, Precast Concrete Products Hollow Core Slabs. Brussels, 2005.

Fédération Internationale de La Précontrainte, FIP. **Guide to Good Practice: Quality Assurance of Hollow Core Floors**. London, 1992.

Fédération Internationale du Béton, FIB (CEB-FIB). **Guide to Good Practice: Special Design Considerations for Precast Prestressed Hollow Core Floors**. Lausanne, 2000.

FERREIRA, M.A.. **Curso de Especialização para Professores de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto**. São Carlos, EDUFSCar – NETPRE, 2007.