

# EFICIÊNCIA DO PREENCHIMENTO DE ALVÉOLOS NA MELHORIA DA CAPACIDADE AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

## Efficiency of the filled cores in improving the shear capacity of prestressed hollow core slabs

Bruna Catoia<sup>1</sup>, Marcelo de Araújo Ferreira<sup>2</sup>



### PALAVRAS CHAVE:

Lajes alveolares;  
 Concreto reforçado com fibras;  
 Cisalhamento;  
 Resistência;  
 Ensaios experimentais.

### KEYWORDS:

Hollow core slabs;  
 Fiber reinforced concrete;  
 Shear;  
 Strength;  
 Experimental tests.

**RESUMO:** As lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas. Seu emprego na construção civil representa um razoável progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras. Com o intuito de melhorar a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares protendidas é comum o preenchimento dos alvéolos na região de sua extremidade. Entretanto, isso corresponde a uma atividade complexa, não existe uma técnica padronizada que viabilize um adequado preenchimento, e quando deficiente impede o trabalho da seção como composta, afetando o ganho de resistência considerado em projeto. Este artigo apresenta um estudo da eficiência dos preenchimentos de alvéolos quanto a melhoria da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas com 200 mm de altura. Para isso, foram realizados 23 ensaios com o emprego de dois tipos de concreto para o preenchimento: concreto simples e concreto reforçado com fibras (SFRC). Além disso, foram analisadas lajes com dois e quatro alvéolos preenchidos. Os valores teóricos foram determinados de acordo com as recomendações da NBR 14861:2022. A partir deste estudo, foi possível observar que o preenchimento de dois alvéolos com SFRC garantiu um aumento de 46% da resistência ao cisalhamento quando comparado com peças sem qualquer preenchimento. Assim, constatou-se que maior número de preenchimento não garante um acréscimo de resistência proporcional ao aumento da área de concreto.

**ABSTRACT:** Hollow core slabs correspond to one of the most advanced precast unit types. Its use in civil construction represents a reasonable progress in constructive terms, allowing the rationalization and technical improvement of the works. To ensure some improvement of the shear strength of prestressed hollow core slabs it is common to fill the cores in the slab end region. However, this corresponds to a complex activity, there is no standardized technique that enables an adequate filling, and when deficient, it prevents the work of section as composite, affecting the improvement of strength considered in the design. This article presents a study of the efficiency of the filled cores with related to the improvement of the shear capacity considering hollow core slabs with 200 mm height. So, an experimental study was carried out with the use of two types of concrete: plain concrete and fiber reinforced concrete (SFRC). Furthermore, slabs with two and four filled cores were analyzed. the theoretical values were determined according to NBR 14861:2022. From this study, it was possible to observe that the filling of two cores with SFRC improved the shear strength by 46% when compared with slabs without fillings. Thus, it was found that a greater number of filled cores was not guarantee an increase of strength proportional to the increase of the concrete area.

\* Contato com os autores:

Publicado em 12 de maio de 2023

<sup>1</sup> e-mail: [bcatoia@yahoo.com.br](mailto:bcatoia@yahoo.com.br) ( B. Catoia )

Doutora em Engenharia de Estruturas, Profa. do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

<sup>2</sup> e-mail: [netpre@ufscar.br](mailto:netpre@ufscar.br) ( M. A. Ferreira )

Professor, Doutor, Professor do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

## 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. A utilização 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, a utilização 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.

O emprego de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil representa um razoável progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras.

Os elementos pré-fabricados podem ser utilizados nos mais variados setores da construção civil, tais como: edificações industriais, comerciais e residenciais, construção pesada e infraestrutura urbana, rodoviária e ferroviária.

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.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Os novos desafios enfrentados pela Indústria da Construção Civil, principalmente no setor de edificações, podem ser resumidos pela necessidade de se conjugar a redução de custos com a elevação dos níveis de qualidade de processos e de produtos, com a adoção de procedimentos gerenciais mais eficientes e da racionalização das técnicas construtivas. A pesquisa sistemática e a difusão do conhecimento podem proporcionar o desenvolvimento tecnológico exigido pelo setor.

O estudo se justifica plenamente pelo crescente emprego no Brasil das estruturas pré-moldadas para edifícios de múltiplos pavimentos, sendo grande o emprego de elementos pré-moldados na composição de pisos.

O painel alveolar corresponde a um elemento pré-moldado extremamente versátil, que pode ser aplicado nos principais tipos de sistemas construtivos encontrados no país, seja em edificações de alvenaria, de concreto ou de metal. Entretanto, atualmente não existe uma padronização de método e de materiais para o preenchimento adequado dos alvéolos com o intuito de garantir o funcionamento da seção como composta (laje e alvéolos preenchidos), visando a melhoria do desempenho ao cisalhamento desses painéis. Dessa forma, o presente trabalho se justifica principalmente pela falta de padronização desses procedimentos técnicos no Brasil.

### 1.2 OBJETIVO

No projeto das lajes alveolares protendidas, é de extrema importância garantir o trabalho da seção efetivamente como composta (laje mais alvéolos preenchidos) quando da sua consideração como uma alternativa para aumentar a resistência ao cisalhamento das unidades alveolares.

Diante desse contexto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência dos preenchimentos de alvéolos quanto a melhoria da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas com 200 mm de altura. Para isso, foi realizado um estudo experimental com o emprego de dois tipos de concreto para o preenchimento: concreto simples e concreto reforçado com fibras. Para o cálculo das lajes com alvéolos preenchidos, os valores teóricos foram determinados de acordo com as recomendações da NBR 14861 (ABNT, 2022).

Assim, será apresentado o estudo experimental ao cisalhamento de 23 unidades alveolares com variações no preenchimento dos alvéolos de forma a verificar a eficiência dos preenchimentos realizados com concreto normal e com concreto reforçado com fibras. Além disso, também será verificada a eficiência do preenchimento de dois e quatro alvéolos.

### 1.3 PESQUISAS REALIZADAS

Inúmeras pesquisas foram realizadas com relação às lajes alveolares em todo mundo. Na Europa foi desenvolvido um projeto de pesquisa denominado HOLCOTORS. Esse projeto tinha como objetivo desenvolver métodos numéricos para a análise e métodos simplificados para o projeto de lajes alveolares pretendidas submetidas ao cisalhamento e à torção. Os modelos de cálculo foram desenvolvidos pela Universidade de Tecnologia de Chalmers, na Suécia. Os ensaios usados para a verificação dos modelos foram realizados e documentados pelo Centro de Pesquisa Técnica (VTT), da Finlândia. Parte das pesquisas desenvolvidas pelo VTT estão descritas em Pajari (1989), Pajari (2004) e Pajari (2005).

Uma das pesquisas desenvolvidas nesse Centro (VTT), relacionadas com o preenchimento de alvéolos, está apresentada em Pajari e Yang (1994), que ensaiaram ao cisalhamento diversas unidades de laje alveolar. O objetivo dos ensaios era estudar o efeito do preenchimento dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento vertical de lajes alveolares submetidas a forças verticais e horizontais. Esse tipo de situação ocorre quando as lajes são apoiadas em vigas flexíveis. Os pesquisadores concluíram que quando não houve preenchimento dos alvéolos, a força horizontal reduziu consideravelmente a capacidade resistente vertical ao cisalhamento. Por comparação com modelos sem preenchimento dos alvéolos, um pequeno preenchimento (30 mm), juntamente com a extremidade da viga, garantiu, para a laje, um reforço considerável contra a força horizontal. Com preenchimento médio (185 mm e 320 mm), a força vertical e a horizontal na ruptura foram, ambas, no mínimo tão altas quanto a capacidade resistente ao cisalhamento obtida nos ensaios de referência. Em outras palavras, nenhuma redução da capacidade resistente vertical ao cisalhamento foi observada, apesar da elevada força horizontal. Um longo preenchimento (700 mm) dos alvéolos pareceu trabalhar melhor para lajes de 265 mm. Para as de 400 mm ocorreu uma ruptura local devida a uma reação concentrada do apoio horizontal. A área de distribuição da força horizontal nesses ensaios foi menor do que em estruturas de piso reais.

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 naquela época superestimavam a resistência à força cortante para o caso de alvéolos preenchidos.

Pinheiro et al (2017) abordou a influência do momento e número de alvéolos preenchidos no ganho de resistência à força cortante em lajes alveolares pré-fabricadas. Ao comparar os instantes de preenchimento, os resultados conduziram a valores superiores de capacidade resistente à força cortante quando o preenchimento de alvéolos foi realizado após a liberação da protensão, já o estudo experimental apontou valores superiores de resistência quando o procedimento foi realizado antes da liberação da protensão. Dados teóricos apontaram para uma diminuição da resistência ao esforço cortante ao se aumentar a resistência do concreto de preenchimento e também ao se preencher um maior número de

alvéolos, não sendo esse fato observado em todos os modelos estudados. Os autores ressaltaram a necessidade de maiores investigações.

## 2. PREENCHIMENTO DOS ALVÉOLOS

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

Esse preenchimento pode ser realizado com o intuito de melhorar a resistência da laje alveolar ao cisalhamento. Por meio de pesquisas realizadas junto a fabricantes, foi constatado que a adoção da prática de preenchimento de alvéolos é corrente e considerada como eficiente para até dois alvéolos.

Eles podem ser preenchidos na pista, juntamente com a moldagem das peças, ou na obra. Quando o preenchimento é realizado na pista, geralmente é empregado o mesmo concreto usado na fabricação dos elementos, e esse procedimento é feito antes da liberação da protensão. Assim, nesse caso, a seção transversal composta, ou seja, laje junto com os alvéolos preenchidos receberá a protensão quando da liberação dos cabos.

Quando o preenchimento é realizado em obra, os concretos são diferentes, tanto na idade quanto na resistência e, nesse caso, a liberação da protensão é realizada quando a seção ainda é simples.

Para o caso em que os alvéolos são preenchidos em obra, maiores cuidados são necessários para garantir boa aderência entre o concreto de preenchimento e o da laje.

Os procedimentos de corte das lajes com serra promovem o acúmulo de pó nas peças, que precisa ser retirado antes do preenchimento dos alvéolos, caso contrário esse pó comprometerá a aderência entre os concretos.

Além disso, como são empregados concretos com diferentes idades, para a laje e para os alvéolos, pode acontecer a perda de água do concreto de menor idade, devido a outra superfície estar muito seca, comprometendo a resistência de aderência entre esses dois concretos.

Diferentemente dos países da Europa, no Brasil geralmente os alvéolos são preenchidos nas fábricas, juntamente com a moldagem das lajes. Isso ocorre pois como as peças possuem menores alturas, os alvéolos contribuem para resistir às tensões de tração provenientes da transferência da protensão ao longo da seção, após a liberação dos cabos pré-tracionados. Com isso, o preenchimento dos alvéolos corresponde a um procedimento capaz de impedir o aparecimento de fissuras na região de transferência, causadas pela força de protensão.

O concreto simples, não armado, corresponde a um material frágil, com baixa resistência à tração e baixa capacidade de alongamento na tração. Assim, quando fibras são acrescentadas ao concreto de forma aleatória e descontínua, o concreto apresentará maior ductilidade após a fissuração. Isso acontece pois as fibras atravessam as fissuras que se formam no concreto, devido a forças externas ou a variações de temperatura ou umidade, mantendo reduzida a abertura das fissuras.

Além disso, se as fibras empregadas se apresentarem em grande quantidade e bem aderidas à matriz cimentícia, elas permitirão ao concreto resistir a elevadas tensões de tração.

Assim, diante das vantagens do emprego de fibras, este trabalho apresenta um estudo de lajes alveolares pretendidas, visando a eficiência do emprego do preenchimento de alvéolos com Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC).

### 3. CAPACIDADE DE LAJES ALVEOLARES AO CISALHAMENTO

Na prática corrente de projeto, são definidas as forças de protensão e a geometria da laje de tal modo que elas conduzam 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 cortantes. No entanto, quando essas forças cortantes são significativas, o que pode ser agravado pela 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.

Com o aumento da área da seção, tem-se uma diminuição do efeito da protensão no concreto, havendo a tendência de aparecer fissuras antes, quando se comparado com a seção simples.

Entretanto, com o preenchimento de alguns alvéolos, tem-se um aumento da nervura (os alvéolos preenchidos contribuem com a nervura), melhorando o mecanismo de resistência do concreto à tração, o que torna a seção mais resistente, pois não é constituída apenas pelas estreitas nervuras.

### 4. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM REGIÃO FISSURADA POR FLEXÃO

Para a situação de laje alveolar com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista, a NBR 14861 (ABNT, 2022) recomenda que a resistência à força cortante seja calculada considerando a contribuição de 50% da largura do alvéolo, da seguinte forma.

$$V_{Rd,fl} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad \text{Eq. [1]}$$

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

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2c} \cdot d \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

$\sum b_{w,2}$ : Somatório das larguras das nervuras (internas e externas) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos, expressos em metros;

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

$V_{Rd,fl}$ : Força cortante resistente a flexo-cortante de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão, expressa em kN;

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

$k$ : Coeficiente em metros -  $k = 1,6 - d \geq 1$ ;

$\rho_2$ : Taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com alvéolos preenchidos;

$$\rho_2 = \frac{A_s}{\sum b_{w,2} \cdot d}$$

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

$n$ : Quantidade de alvéolos preenchidos quando transformados em uma seção retangular equivalente;

$b_{alv}$ : Largura horizontal do alvéolo a ser preenchido, expresso em metros;

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

$A_s$ : Área da seção transversal da armadura longitudinal inferior tracionada, expressa em  $m^2$ , podendo também ser considerada a armadura passiva no alvéolo e na chave de cisalhamento;

$\sigma_{cp,2}$ : Tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso de laje com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão, expressa em MPa;

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}}$$

$N_p$ : Força de protensão final, depois de todas as perdas, expresso em kN;

$A_{c,2}$ : Área da seção transversal da laje alveolar considerando a contribuição dos alvéolos preenchidos;

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv}$$

$A_c$ : Área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada sem a contribuição da capa, expressa em  $m^2$ ;

$n$ : Quantidade de alvéolos preenchidos;

$A_{alv}$ : Área da seção transversal do alvéolo, expressa em  $m^2$ , conforme sua geometria. Para alvéolo com seção circular, a área da seção deve ser calculada pela seguinte equação:

$$A_{alv} = \frac{\pi \cdot b_{alv}^2}{4}$$

No Brasil, geralmente as peças fabricadas de pequena altura necessitam de um acréscimo adicional de resistência no instante da liberação da pré-tração dos cabos. Assim, é comum no Brasil a realização do preenchimento dos alvéolos antes da liberação dos cabos, juntamente com a moldagem das lajes.

Quando as lajes forem empregadas em locais onde a situação crítica corresponde ao cisalhamento, é importante a realização de ensaios para verificar a qualidade das peças analisadas e a eficiência dos preenchimentos, devido às incertezas de produção.

Tendo em vista isso, foram realizados alguns ensaios experimentais com o intuito de verificar a qualidade das peças e analisar o comportamento de unidades alveolares com alvéolos preenchidos.

## 5. ESTUDO EXPERIMENTAL

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 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 resistente. Tal ensaio padrão foi inicialmente indicado no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN 1168 (2005) e posteriormente foi incorporado na norma brasileira NBR 14861.

O ensaio ao cisalhamento, além de avaliar a resistência a esse tipo de solicitação, 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 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.

## 5.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

O esquema de ensaio pode ser observado na Figura 1.

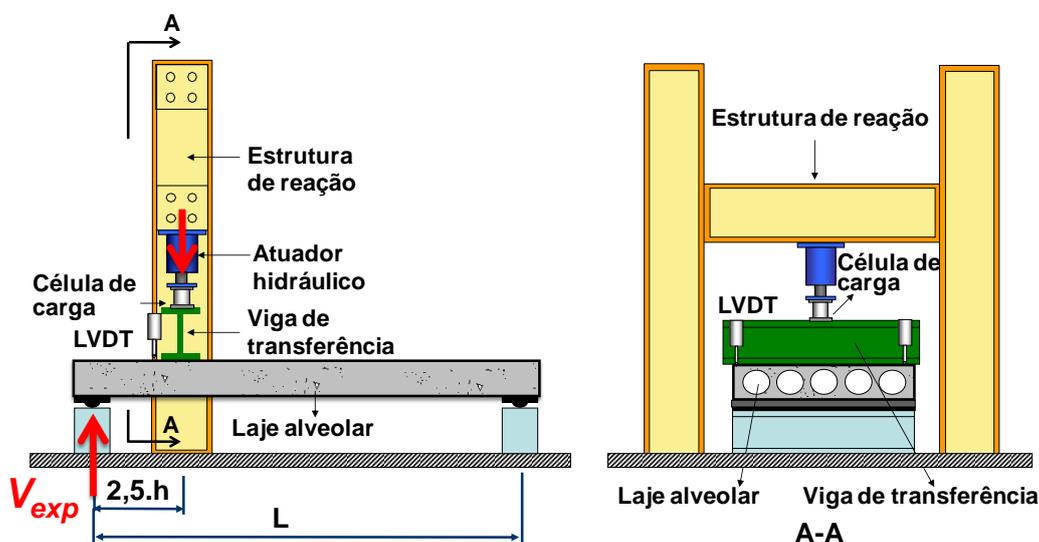


FIGURA 1: Esquema de ensaio de acordo com FIP e EN 1168.

FONTE: Adaptado de NBR 14861 (ABNT, 2022).

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 pela NBR 14861 (ABNT, 2022), com monitoramento por meio 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.

Esses 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 3,10 m e 4,15 m de comprimento, apresentando vãos de 3,0 m e 4,05 m, respectivamente.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

A fim de verificar o comportamento das lajes alveolares sem e com alvéolos preenchidos, avaliando a eficiência dos preenchimentos realizados com concreto normal e com concreto reforçado com fibras,

foram realizados 23 ensaios ao cisalhamento, variando algumas características das lajes. Os ensaios com as principais características dos modelos estão descritos na Tabela 1. As lajes foram divididas em dois lotes (A e B), pois foram produzidas por duas diferentes fábricas brasileiras, apresentando, assim, características distintas.

Optou-se por empregar concreto reforçado com fibras nos preenchimentos, justamente com o intuito de investigar um tipo de concreto capaz de fornecer melhores condições para o trabalho da seção como composta.

**TABELA 1: Caracterização dos modelos ensaiados sem e com alvéolos preenchidos.**

Especificação	Tipo de laje	Armadura	Nº de protótipos por lote
L-S-20-5D12,7_lote A	Sem preenchimentos; h=20 cm; L=3,1 m e $\sigma_{pi}=1140$ MPa	5 $\phi$ 12,7 mm	5
L-2PF-20-5D12,7_lote A	Dois alvéolos preenchidos com SFRC; h=20 cm; L=3,1 m e $\sigma_{pi} = 1140$ MPa	5 $\phi$ 12,7 mm	6
L-4PF-20-5D12,7_lote A	Quatro alvéolos preenchidos com SFRC; h=20 cm; L=3,1 m e $\sigma_{pi}=1140$ MPa	5 $\phi$ 12,7 mm	6
L-2P-20-6D12,7_lote B	Dois alvéolos preenchidos; h=20 cm; L=4,15m e $\sigma_{pi} =1429,98$ MPa)	6 $\phi$ 12,7 mm	3
L-2P-20-7D9,5_lote B	Dois alvéolos preenchidos; h=20 cm; L=4,15m e $\sigma_{pi}=1351,35$ MPa)	7 $\phi$ -9,5 mm	3

h: altura da laje; L: comprimento da laje;  $\sigma_{pi}$ =tensão de protensão inicial; P: preenchimentos com concreto simples; PF: preenchimentos com concreto reforçado com fibras; SFRC: Steel Fiber Reinforced Concrete.

**FONTE:** Autoria Própria.

O comprimento de preenchimento dos alvéolos, a partir da extremidade da laje, foi de 100 cm, para o lote A e 80 cm, para o lote B.

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 corpos de prova cilindros ensaiados no mesmo dia dos ensaios das lajes.

Os resultados reais para o concreto utilizado nas unidades alveolares e nos alvéolos preenchidos estão apresentados na Tabela 2.

**TABELA 2 Propriedades dos materiais reais na data dos ensaios.**

Laje	$f_{cj}$ laje (MPa)	$f_{cj}$ alv. (MPa)	$E_c$ laje (GPa)	$f_{ij}$ laje (MPa)
Sem AP – lote A	40	-----	28,5	4,09
2APF – lote A	40	40	28,5	4,09
4APF – lote A	40	40	28,5	4,09
2AP – lote B	53,50	53,50	36,6	4,20

AP: alvéolos preenchidos com concreto simples; APF: alvéolos preenchidos com SFRC; alv: alvéolos.

**FONTE:** Autoria Própria.

Foram utilizadas fibras metálicas com comprimento de 50 mm, na dosagem especificada pelo fabricante, com 30 kg de fibra por metro cúbico de concreto. Todos os preenchimentos foram realizados na medida em que as lajes foram moldadas, ou seja, antes da liberação da pré-tração dos cabos.

As tipologias das lajes sem e com preenchimentos podem ser observadas na Figura 2.

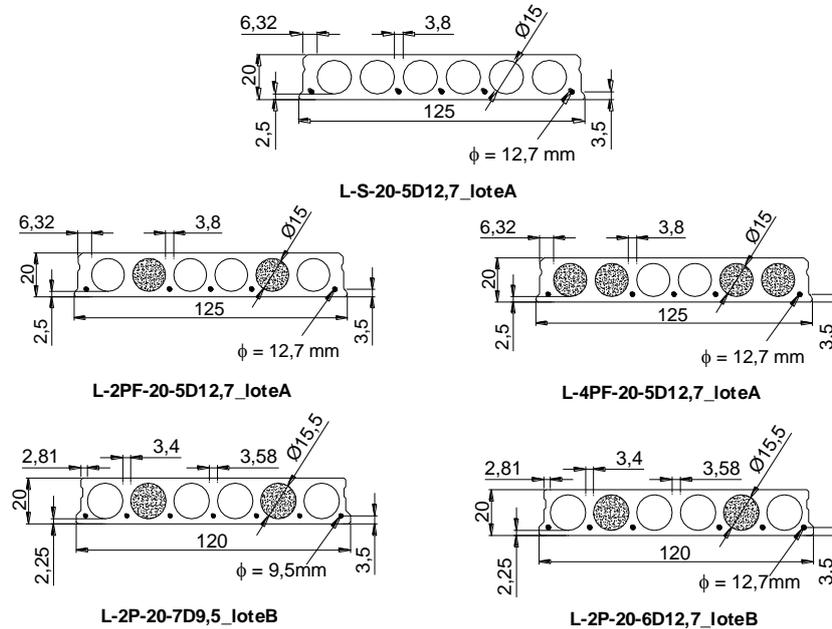


FIGURA 2: Tipologias das lajes com alvéolos preenchidos, com suas respectivas identificações.

FONTE: Autoria própria.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

As Figuras 3, 4 e 5 mostram as curvas experimentais de força cortante no apoio versus deslocamento (a 2,5 h do apoio) para as unidades ensaiadas, sendo os resultados das lajes sem preenchimento tomados como referência.

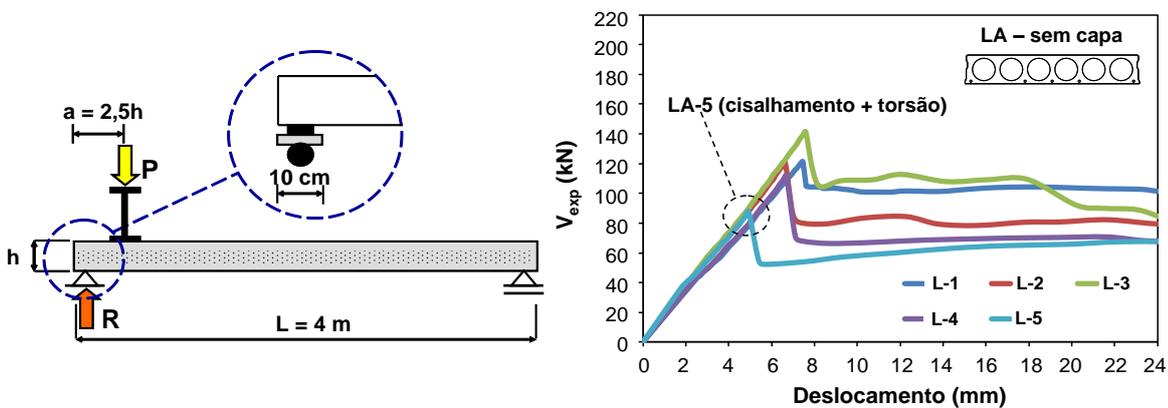
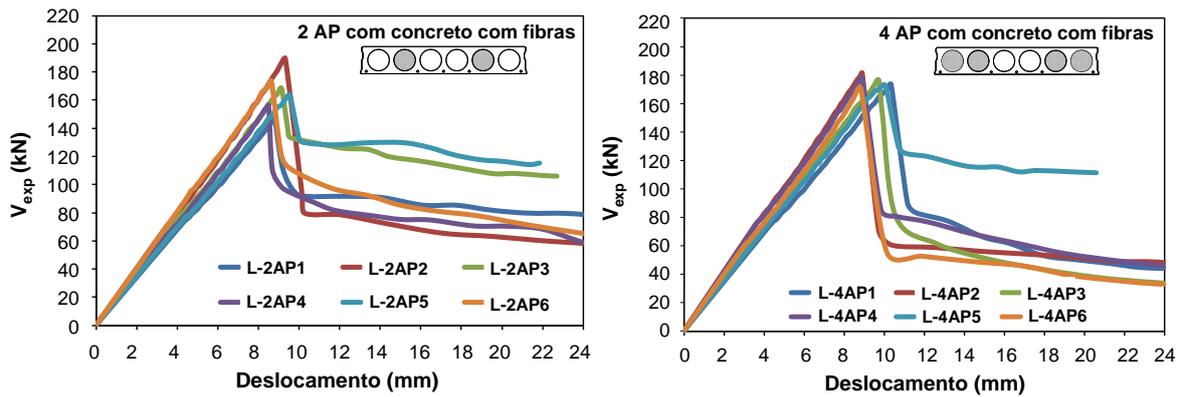


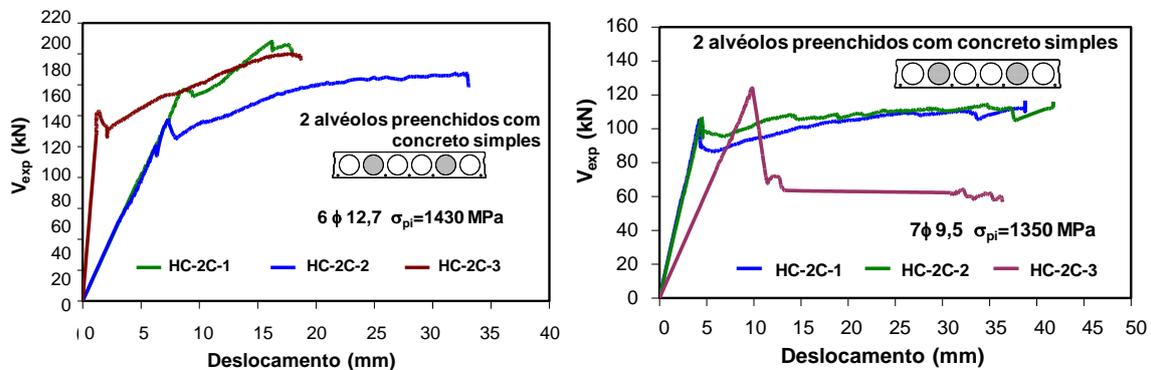
FIGURA 3: Resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento para laje sem preenchimentos do lote A.

FONTE: Autoria própria.



**FIGURA 4:** Resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento para laje com dois e quatro alvéolos pertencentes ao lote A.

**FONTE:** Autoria própria.



**FIGURA 5:** Resultados dos ensaios de cisalhamento considerando as lajes com dois alvéolos preenchidos, pertencentes ao lote B.

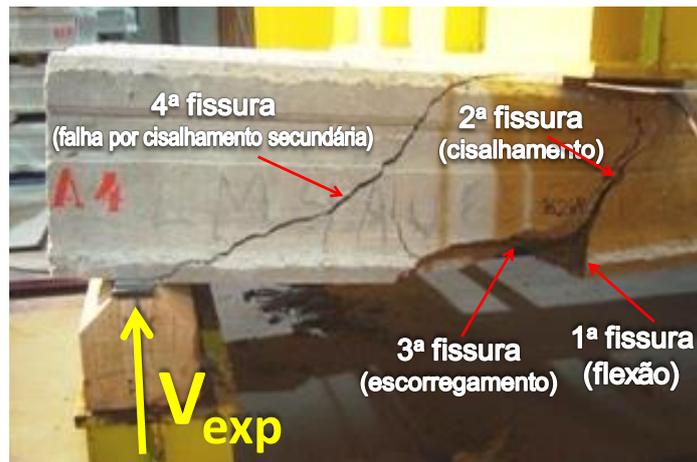
**FONTE:** Autoria própria.

Em uma das lajes sem qualquer preenchimento, observou-se a presença de torção, que prejudicou seu desempenho. Esse efeito não foi observado no caso das peças com preenchimentos.

Devido ao arranjo utilizado nos ensaios e à carga aplicada a 2,5 h do apoio, pode ocorrer mecanismo de cisalhamento com possibilidade de fissuras de flexão.

Com os gráficos ilustrados nas Figuras 4 e 5, pode-se observar que as lajes cujos preenchimentos foram feitos com SFRC alcançaram valores de resistência superiores aos obtidos com as peças com preenchimentos de concreto simples. A Figura 6 mostra a configuração de fissuras dos ensaios de cisalhamento dos modelos sem a presença de preenchimentos.

Como pode ser observado, para as lajes sem alvéolos preenchidos, houve uma influência mais significativa das fissuras de flexão na capacidade ao cisalhamento, sendo que o mecanismo de ruptura dessas peças foi governado por tensões de tração normais às cordoalhas, ou seja, pela falha de ancoragem. Após o fendilhamento do concreto na região próxima às cordoalhas, ocorreu uma falha final de ancoragem.



**FIGURA 6:** Mecanismos de comportamento das lajes sem capa.

**FONTE:** Autoria própria.

De uma forma geral, nos ensaios das lajes com dois alvéolos preenchidos, foi observado que houve a tendência de ocorrer a fissuração nos alvéolos de extremidade e na nervura central da laje, além da interação dos mecanismos de cisalhamento, flexão e falha de ancoragem, como pode ser observado na Figura 7. Dessa forma, ficou constatado que a posição dos alvéolos preenchidos permitiu a concentração de tensões em pontos localizados, caracterizando pontos fracos.



**FIGURA 7:** Mecanismos de comportamento das lajes com dois alvéolos preenchidos.

**FONTE:** Catoia (2011).

Para as lajes com quatro alvéolos preenchidos, a forma de preenchimento possibilitou que a nervura central permanecesse crítica, resultando em fissuração no centro da peça, como pode ser observado na Figura 8.



**FIGURA 8:** Mecanismos de comportamento das lajes com quatro alvéolos preenchidos.

**FONTE:** Catoia (2011).

As comparações entre os resultados experimentais e os valores teóricos, obtidos pela equação recomendada pela NBR 14861 (ABNT, 2022), para as lajes sem preenchimentos e para os casos com alvéolos preenchidos (equação 3), estão apresentadas na Tabela 3.

Os valores previstos foram obtidos considerando as propriedades reais dos materiais (ver Tabela 2). As perdas referentes à força de protensão foram calculadas e corresponderam a: 12% para as lajes sem preenchimentos, 10% e 9% para as peças com dois e quatro preenchimentos, pertencentes ao lote A, respectivamente e 19% e 15% para os dois tipos de lajes do lote B, peças com maior e menor taxa de armadura, respectivamente. Como pode ser observado na Tabela 3, nos casos de lajes sem qualquer preenchimento, o resultado médio experimental foi 14% maior do que a resistência prevista.

No caso das lajes com dois alvéolos preenchidos com SFRC, foi obtido valor experimental superior ao previsto teoricamente, apresentando um aumento de 46% da resistência ao cisalhamento quando comparado com peças sem qualquer preenchimento (na Tabela 3). Já os casos com quatro preenchimentos, não houve um acréscimo de resistência proporcional ao aumento da área de concreto. As lajes com quatro preenchimentos apresentaram crescimento de apenas 3% na resistência ao cisalhamento, em comparação com as peças com dois alvéolos preenchidos, indicando que dois alvéolos extras afetaram muito pouco o mecanismo real de resistência.

**TABELA 3:** Comparação entre valores experimentais e teóricos, considerando formulações da FIB (2000) e algumas modificações para o cálculo das peças com alvéolos preenchidos.

Especificação	Tipo de laje	$V_{R,exp}$ (kN)	$V_{Rk}$ (kN)	$\frac{V_{R,exp}}{V_{Rk}}$
L-S-20-5D12,7_A	Sem AP - lote A	116,54	102,47	1,14
L-2PF-20-5D12,7-A	2 APF - lote A	170,27	137,76	1,23
L-4PF-20-5D12,7_A	4 APF - lote A	175,49	171,68	1,02
L-2P-20-6D12,7_B	2AP - lote B	131,18	158,60	0,83

$V_{R,exp}$  – capacidade média ao cisalhamento dos ensaios;  $V_{Rk}$  – resistência ao cisalhamento calculada usando as resistências características inferiores à tração.

**FONTE:** Autoria Própria.

Esse comportamento está relacionado com a posição dos quatro alvéolos preenchidos, em que a nervura central se tornou a região crítica. A concentração de tensões nessa região acabou por limitar a resistência global do modelo. Tal comportamento pode ser comprovado a partir da configuração de fissuração dos modelos ensaiados, que apresentaram, em sua maioria, fissuração da nervura central, como pode ser observado na Figura 8.

Assim, novos estudos são necessários para obter uma melhor compreensão desses efeitos e identificar a melhor maneira de distribuir os alvéolos preenchidos na seção transversal desse tipo de laje.

Com os resultados das lajes com alvéolos preenchidos com concreto simples, pode-se notar que a seção não trabalhou efetivamente como composta. Não houve uma adequada aderência entre os alvéolos e a laje, o que prejudicou o desempenho do elemento, impossibilitando que eles alcançassem suas

máximas capacidades. Para esse caso estudado observou-se que os preenchimentos com concreto simples não apresentaram desempenho satisfatório, como as peças com preenchimentos com SFRC.

Com os ensaios realizados, observou-se que o preenchimento dos alvéolos corresponde a uma atividade complexa, não existe uma técnica padronizada que viabilize um adequado preenchimento. Então, quando for considerada a contribuição dos alvéolos preenchidos, no cálculo da resistência ao cisalhamento, deve-se atribuir atenção especial a esse procedimento e, de preferência, empregar nos preenchimentos um concreto com características capazes de favorecer a aderência, como o concreto reforçado com fibras.

## 7. CONCLUSÕES

Tendo em vista o fato da laje alveolar corresponder a um elemento pré-moldado extremamente versátil, com a possibilidade de aplicação nos mais variados tipos de sistemas construtivos encontrados no país, e pelo fato de atualmente não existir uma padronização de método e de materiais para o preenchimento adequado dos alvéolos com o intuito de garantir o funcionamento da seção como composta (laje e alvéolos preenchidos), visando a melhoria do desempenho ao cisalhamento desses painéis, buscou-se o desenvolvimento deste trabalho.

Como mencionado anteriormente, quando a consideração do preenchimento de alvéolos é empregada no projeto como uma alternativa para aumentar a resistência ao cisalhamento das unidades alveolares, é imprescindível que a seção trabalhe efetivamente como composta, ou seja, laje juntamente com os preenchimentos.

Assim, neste trabalho foi feita a avaliação da eficiência dos preenchimentos de alvéolos quanto a melhoria da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas com 200 mm de altura. Para isso, foi realizado um estudo experimental com o emprego de dois tipos de concreto para o preenchimento: concreto simples e concreto reforçado com fibras. Foram ensaiadas 23 unidades alveolares ao cisalhamento sendo: 5 ensaios de lajes sem qualquer preenchimento, tomada como referência; 6 ensaios de lajes com 2 alvéolos preenchidos com SFRC; 6 ensaios com 4 alvéolos preenchidos com SFRC; 6 ensaios com 2 alvéolos preenchidos com concreto comum.

Para o cálculo das lajes com alvéolos preenchidos, os valores teóricos foram determinados de acordo com as recomendações da NBR 14861 (ABNT, 2022).

Os principais resultados mostraram que o preenchimento de dois alvéolos com SFRC garantiu um aumento de 46% da resistência ao cisalhamento quando comparado com peças sem qualquer preenchimento. E para os casos de quatro alvéolos preenchidos, apesar dos resultados experimentais serem muito próximos aos previstos, não houve um aumento de resistência proporcional ao aumento área de concreto. A contribuição de mais dois alvéolos preenchidos garantiu um aumento de apenas 3% na resistência ao cisalhamento. Então conclui-se que, considerando as peças com a distribuição de preenchimentos empregada, o caso com dois alvéolos preenchidos com SFRC é o mais vantajoso, pois garante um elevado aumento da resistência ao cisalhamento sem grande aumento da área de concreto. Já o caso com quatro alvéolos preenchidos não apresentou grandes melhorias com relação à capacidade ao cisalhamento, sendo necessário um maior aumento da área de concreto, o que significa maior custo com material e mão de obra.

De maneira geral, ficou evidente a eficiência do emprego de concreto reforçado com fibras para o preenchimento dos alvéolos, pois as fibras garantem maior resistência do concreto à tração e o controle da

retração, fundamental para a obtenção de boas condições de aderência entre a laje e os alvéolos. O preenchimento realizado mostrou-se eficiente, possibilitando o trabalho da seção como composta.

Analisando a ruína das lajes sem preenchimentos, em uma delas foi observada a presença do mecanismo de torção. Para a realização do ensaio, empregou-se rótula somente na direção de um dos apoios, sendo possível a ocorrência de torção, ocasionando a interação de mecanismos, o que prejudicou o desempenho da peça. Com isso, é possível concluir que, além de observar resultados, é importante identificar os mecanismos presentes, a partir da configuração da fissuração.

Diante disso, conclui-se que 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 laje.

Dessa forma, para comparar resultados experimentais e teóricos, é importante observar se o comportamento da unidade alveolar atende às limitações relativas às equações empregadas.

Foi constatado que o modelo de cálculo recomendado pela NBR 14861 (ABNT, 2022) para determinar a resistência ao cisalhamento em região fissurada por flexão, para lajes sem capa, fornece valores coerentes com relação aos determinados experimentalmente. Além disso, constatou-se que no caso das unidades com alvéolos preenchidos, a consideração de 50% da contribuição dos preenchimentos garante maior segurança, se mostrando adequada às condições de produção típicas das fábricas brasileiras.

No caso das lajes ensaiadas, com altura de 200 mm e carga aplicada a 2,5 h do apoio, os resultados experimentais e suas análises revelaram que o mecanismo de resistência ao cisalhamento foi fortemente afetado pela presença de fissuras de flexão, e o mecanismo de ruptura na região do apoio foi governado pela falha de ancoragem. Portanto, esse mecanismo observado está de acordo com as equações recomendadas pela NBR 14861 (ABNT, 2022), para determinar a capacidade ao cisalhamento em regiões fissuradas por flexão.

Assim, de uma forma geral, com este trabalho fica evidente que quando existe a adequada aderência entre o preenchimento e a laje, de forma a garantir o trabalho da seção como composta, o preenchimento de alvéolos corresponde a uma providência satisfatória quanto ao ganho de resistência ao cisalhamento, pois os alvéolos reforçam as estreitas nervuras da laje alveolar.

Logo, este estudo contribui com o maior conhecimento em relação a consideração da melhoria da capacidade ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas mediante o preenchimento de alvéolos mostrando como tais preenchimentos podem favorecer o desempenho da laje e chama a atenção para a dificuldade em garantir o trabalho da seção como composta como de fato é considerada em projeto.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 14861. **Lajes Alveolares Pré-Moldadas de Concreto Protendido** – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2022.

CATOIA, B. **Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão**. 325p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION, CEN. EN 1168, **Precast Concrete Products Hollow Core Slabs**. Brussels, 2005.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, FIB (CEB-FIB). **Guide to Good Practice: Special Design Considerations for Precast Prestressed Hollow Core Floors**. Lausanne, 2000.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE, FIP. **Guide to Good Practice: Quality Assurance of Hollow Core Floors.** London, 1992.

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

PAJARI, M. (1989). **Design of prestressed hollow core slabs.** Technical Research Center of Finland, Espoo, Finland. Rep. 657.

PAJARI, M. (2004). **Pure torsion tests on single hollow core slabs.** VTT Technical Research Centre of Finland. Research Notes 2273.

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.

PINHEIRO, G. L.; CARVALHO, R. C.; ALMEIDA FILHO, F. M. **Lajes alveolares pré-fabricadas: estudo da influência do número e do instante de preenchimento de alvéolos no ganho de resistência à força cortante.** Revista Matéria. v22, n04, 2017.