

Utilização de ensaios destrutivos em ambiente de fábrica para avaliação da resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas de concreto

Use of destructive tests at precast factory facilities to evaluate the shear strength of precast prestressed hollow core slabs

Gregory Lee Pinheiro¹

Fernando Menezes de Almeida Filho^{2}*

Marcelo de Araújo Ferreira³

Roberto Chust Carvalho⁴

Recebido: jul.2020 | Aceito: out.2020

Resumo

As lajes alveolares protendidas, geralmente, não possuem armadura transversal, dessa forma, requerendo cuidados quanto a consideração da sua resistência à força cortante em um projeto estrutural. Para não restringir o seu uso, a ausência de armadura transversal pode ser compensada por meio de técnicas que melhorem seu desempenho, tais como: o preenchimento de alvéolos e o uso da capa estrutural. O trabalho desenvolveu um estudo sobre os processos de produção por extrusão, preenchimento de alvéolos, e controle tecnológico de lajes alveolares por meio de ensaios destrutivos realizados dentro de uma fábrica de elementos pré-fabricados, avaliando a sua resistência à força cortante segundo as normas nacionais. Os resultados do estudo mostraram a conformidade com os valores normativos e a viabilidade da execução do preenchimento de alvéolos, atendendo a utilização prevista em projeto; entretanto, os modelos com mais de 2 alvéolos preenchidos mostraram resultados inferiores aos previstos, o que pode ter sido acarretado pela aderência entre a superfície de contato entre o alvéolo e o concreto de preenchimento, demonstrando a necessidade de mais estudos sobre a sua utilização.

Palavras-chave: Lajes alveolares protendidas, preenchimento de alvéolo, concreto pré-fabricado, ensaio, força cortante.

Abstract

The prestressed hollow core slabs, usually, do not have transverse reinforcement, thus, they need care about its consideration of their shear strength in a structural design. In order not to restrict its use, the absence of transverse reinforcement can be compensated by techniques that improve its performance, such as the core filling and the use of the structural topping. This paper developed a study about the procedure of extrusion production, core filling, and technological control of hollow core slabs through destructive tests performed within a concrete precast factory, evaluating its shear strength according to the national standards. The results showed agreement with the normative values and the feasibility of performing the core filling, meets the intended use in design, however, models with more than 2 cores filled showed lower than expected results, which could be made by the bond between the core surface of hollow core slab and surface of the concrete filling material, which demonstrates the need for further studies on its use.

Keywords: Prestressed Hollow core slab, core filling, precast concrete, test, shear strength.

^{1,2,3,4} Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – São Carlos - SP

*Professor Associado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, almeidafilho@ufscar.br

INTRODUÇÃO

O emprego de estruturas pré-fabricadas tem crescido diante do aumento da demanda por obras, tanto no setor comercial quanto residencial. O uso deste sistema vem se tornando amplo em virtude da necessidade de uma maior velocidade de produção e montagem de estruturas. Em meio a isso, surge a necessidade de se aprimorar os elementos que constituem o sistema, (PINHEIRO, 2014).

De acordo com Ferreira (2003), o uso de estruturas em concreto pré-moldado em edificações está amplamente relacionado à uma forma de construir econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A indústria de pré-fabricados vem fazendo esforços para se adequar as demandas da sociedade, no que diz respeito a: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e de sustentabilidade.

Um dos principais elementos em questão são as lajes alveolares pré-fabricadas protendidas (LAP), apresentando-se como uma solução estrutural avançada para piso e forro, devido ao seu baixo peso próprio e melhor uso dos materiais, tornando-a economicamente viável.

Em função do seu processo de fabricação, as LAP's comumente possuem apenas armadura longitudinal protendida, que dificulta a inserção de armaduras transversais, tais como estribos, para resistir à força cortante (PALMER & SCHULTZ, 2010). Desse modo, a resistência à força cortante de uma laje alveolar protendida será resistida somente pelo concreto utilizado e a protensão aplicada.

O Manual de Qualidade para Lajes Alveolares da FIP (1992), escreveu que a resistência à tração do concreto está diretamente relacionada com a forma geométrica dos alvéolos, dosagem do concreto e o seu método de produção. Segundo Pinheiro (2014), diversas pesquisas mostraram que o principal parâmetro que influencia no projeto das lajes alveolares protendidas é a resistência à tração do concreto, tendo em vista que ele é considerado no cálculo da resistência à força cortante, onde a armadura transversal é ausente.

De acordo com França (2012), quando o engenheiro de estruturas se depara com a situação em que as lajes alveolares resistem ao momento fletor, entretanto, não resistem ao esforço cortante calculado por meio das equações normativas, tem-se como solução, o preenchimento dos alvéolos com concreto nas extremidades da laje, aumentando a resistência à força cortante por meio do aumento da área e da largura mínima da seção transversal de concreto da laje na região próxima aos apoios, evitando o emprego de um elemento de maior altura.

Logo, nota-se que mesmo se tratando de um elemento tecnologicamente avançado e com vasto uso, as LAP's apresentam limitações quanto a sua resistência à força cortante, fazendo com que técnicas que melhorem seu desempenho, tais como o preenchimento de alvéolos sejam empregados.

Assim, o principal objetivo desta pesquisa foi o de estudar a influência do processo produtivo em LAP's moldadas por extrusão no seu controle tecnológico com ensaios de caracterização em ambiente de fábrica, comparando o resultado experimental com os valores estabelecidos em projeto de acordo com a NBR 14861 (ABNT, 2011).

Diante do exposto, este estudo aborda os processos de: produção por extrusão de LAP's; preenchimento de alvéolos na pista e fora da pista de concretagem; e controle tecnológico das lajes por meio de ensaios realizados dentro de um ambiente fabril, visando a racionalização do sistema construtivo pré-fabricado.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Lajes alveolares protendidas pré-fabricadas de concreto

O sistema de lajes alveolares possui fabricação e montagem rápidas além de custo competitivo. A técnica de protensão faz com que o elemento adquira uma seção de altura reduzida, contribuindo para a diminuição do peso próprio do elemento e, tornando a estrutura mais eficiente (STANTON, 1992).

Conforme Palmer e Schultz (2010), os vazios gerados pelos alvéolos são contínuos ao longo da laje e o concreto que preencheria o espaço gerado não possui contribuição significativa para a resistência a flexão, justificando assim sua seção transversal. Além de reduzir o peso do elemento, os vazios fornecem um espaço físico para a passagem das instalações elétricas, hidráulicas e de aquecimento. Ainda, as lajes alveolares possuem ainda uma boa resistência ao fogo e um bom isolamento acústico (MONES; BREÑA, 2013).

As primeiras lajes alveolares surgiram na década de 50, junto ao aumento significativo no uso de estruturas pré-fabricadas em concreto, como consequência da industrialização, da demanda por estruturas e da necessidade de se obter um elemento estrutural que possuísse uma melhor utilização dos materiais com expressiva redução do desperdício, em outras palavras com maior grau de otimização, (PINHEIRO, 2014).

No Brasil, segundo Antunes (2011), o início da utilização das LAP's data do início de 1980 e, por causa de sua automação no processo produtivo, foi favorecida a sua consolidação no mercado da construção civil após 2001.

Melo (2004) escreveu que, por as LAP's serem produtos industrializados e o número de horas/homem envolvido em sua produção ser baixo, sua produção aumenta consideravelmente, e o controle de qualidade durante o processo torna-se elevado por causa do seu nível de industrialização.

A NBR 14861 (ABNT, 2011) definiu a LAP como: *“peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento”*.

Basicamente, as lajes alveolares são fabricadas por dois processos distintos: extrusão ou moldagem (forma deslizante). Em ambos os casos o concreto seco com baixo *slump* é extrudado ou moldado, conforme os processos anteriormente descritos, de modo a conferir forma à laje sua seção transversal (EL DEBS, 2017; ELLIOTT, 2002).

Em ambos os processos de produção, as LAP's são produzidas em pistas de concretagem que podem ser constituídas tanto de formas metálicas quanto de concreto, possuindo trilhos para o apoio da máquina de extrusão e equipamento de corte. Na pista de protensão é possível posicionar os cabos que são protendidos e desprotendidos (corte das cordoalhas) ao início e fim do processo produtivo, respectivamente.

Controle tecnológico

As normas brasileiras sobre estruturas e lajes de concreto pré-fabricado recomendam a execução de ensaios para controle tecnológico dos materiais utilizados para a fabricação elementos de laje, mas não do produto acabado.

Segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017), no processo de inspeção e no controle da qualidade dos elementos pré-moldados produzidos em uma fábrica, devem ser utilizados as especificações e os métodos de ensaios das Normas nacionais pertinentes, e na eventual falta

destas, permite-se utilizar uma metodologia aprovada em consenso entre: proprietário, fabricante, fiscalização e construtor.

A norma nacional vigente sobre lajes alveolares, a NBR 14861 (ABNT, 2011), apontou que caso exista a necessidade de uma caracterização mais rigorosa das propriedades mecânicas das lajes alveolares, na ausência de Norma Brasileira específica, podem ser realizados ensaios de desempenho estrutural ou de controle, com base em literatura técnica consagrada, tais como normas estrangeiras.

O número de variáveis envolvidas no processo de produção das LAP's é elevado, e nem todas são necessariamente analisadas por meio dos ensaios de controle tecnológico dos seus componentes. Assim sendo, muitas vezes as empresas que produzem o elemento pré-fabricado bem como suas contratantes, executam ensaios não destrutivos, tais como: provas de carga e ensaios destrutivos, em elementos isolados em ambiente de laboratórios, para garantir o desempenho requerido à laje.

Especificamente para o caso de ensaios destrutivos, estes podem fornecer informações cruciais sobre o comportamento de uma LAP, indicando sua capacidade máxima de suporte de carga, sua deformação quando solicitada, seu modo de ruína, dentre outros. Os ensaios podem sinalizar, caso existam, falhas em alguma etapa produtiva ou concepção estrutural.

A realização dos ensaios destrutivos é normalmente restrita a poucos centros de pesquisa e laboratórios privados. Os custos envolvidos em sua execução são elevados principalmente em decorrência de sua magnitude, exigindo grandes equipamentos de transporte, içamento e ensaio.

O transporte e içamento podem ser grandes barreiras à realização dos ensaios tendo em vista que os centros de pesquisa e laboratórios normalmente não se deparam com esse tipo de produto. Em contrapartida, a indústria de pré-fabricados possui uma estrutura mais próxima da necessária para a realização dos ensaios em LAP's.

Essa pesquisa propôs em parceria com uma empresa de pré-fabricados a execução de ensaios de controle tecnológico dentro de uma de suas fábricas, fazem uso apenas de recursos já existentes no local.

Projeto de LAP's segundo NBR 14861 (ABNT, 2011)

No Brasil, até 2011, a resistência ao esforço cortante era calculada segundo o item de lajes sem armadura para resistir à força cortante da NBR 6118 (ABNT, 2007). Assim, por causa da carência de informações pertinentes a produção e projeto, neste mesmo ano foi publicada a revisão da norma brasileira NBR 14861 (ABNT, 2011), que passou a tratar de projeto, produção e montagem de lajes alveolares.

Segundo a NBR 14861 (ABNT, 2011) o preenchimento dos alvéolos pode ocorrer tanto anteriormente à liberação da protensão dos cabos na pista de concretagem, ou seja, em fábrica (mais comum), quanto posterior à liberação da protensão, ocorrendo na fábrica ou no local da obra (menos comum).

Esta norma contempla lajes com dois alvéolos preenchidos, e sugere que para casos onde exista consideração em projeto de mais do que dois alvéolos preenchidos haja uma base de amparo em evidência científica, literatura técnica, normalização internacional, ou validação experimental. A Figura 1 mostra o posicionamento recomendado pela norma para os alvéolos preenchidos, para acréscimo da força cortante.

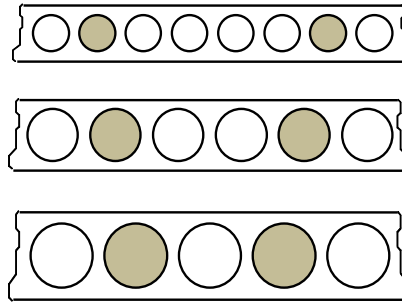


Figura 1 - Recomendação para preenchimento de concreto em dois alvéolos (ABNT NBR 14861, 2011)

Para o preenchimento dos alvéolos deve ser usado concreto adequado com mesma resistência e durabilidade do concreto do elemento a ser preenchido. A seção pode ser considerada como única desde que seja garantida a aderência entre o concreto de preenchimento e a superfície do alvéolo da laje.

Estudos publicados por Ferreira et al. (2008), Costa (2009), Catoia (2011) e Pinheiro et al. (2013) demonstraram que o preenchimento dos alvéolos com concreto aumenta a resistência à força cortante das LAP's em uma proporção significativamente menor do que o valor calculado na equação fornecida pela NBR 6118 (ABNT, 2007) e, o mesmo valendo para a versão da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A verificação da resistência à força cortante deve ser feita na região da seção transversal mais crítica ao longo da laje, a partir de uma distância de $0,5h$ de seu apoio, sendo h a altura da laje (quando houver capa estrutural, esta deve ser somada à altura da seção).

A resistência à força cortante deve satisfazer simultaneamente as condições apresentadas pela Equação 1 e Equação 2.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (1)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \text{ ou } V_{Sd} \leq V_{Rd2\text{capa}} \quad (2)$$

Sendo:

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo na seção;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{Rd2\text{capa}}$ é a força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto da laje alveolar com capa e alvéolos preenchidos;

Os valores de V_{Rd2} e $V_{Rd2\text{capa}}$ são obtidos pela Equação 3 e Equação 4, respectivamente.

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d \cdot \sum b_{w,1} \quad (3)$$

$$V_{Rd2\text{capa}} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d_{tot} \cdot \sum b_{w,2} \quad (4)$$

Sendo:

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

$\sum b_{w,1}$ e $\sum b_{w,2}$ é o somatório das nervuras (interna e externa) da laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos preenchidos, respectivamente;

d é a altura útil da seção transversal da laje alveolar;

d_{tot} é a altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto usada no projeto, conforme a NBR 9062 (ABNT, 2017).

O modelo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e preenchimento de alvéolos dado pela NBR 14861 (ABNT, 2011) é apresentado na Figura 2.

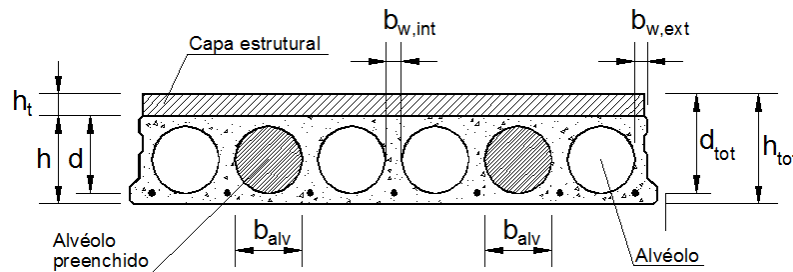


Figura 2 - Exemplo de seção transversal de laje alveolar com capa estrutural e preenchimento de alvéolos (ABNT NBR 14861, 2011)

Para lajes com o preenchimento dos alvéolos tem-se:

i) Resistência à força cortante de lajes alveolares com ou sem capa estrutural (Eq. 6):

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (6)$$

Sendo:

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (7)$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (8)$$

$$\sum b_{w,1} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} \quad (9)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1} \cdot d} \quad (10)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \cdot \alpha \quad (11)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1, \text{ com } d \text{ em metros (m)} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{I_x}{I_{pt2}} \leq 1 \quad (13)$$

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

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

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

A_s : área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

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

d : altura útil total da seção transversal, considerando a altura da laje d alveolar ou da laje alveolar mais a altura da capa na seção composta $d=d_{tot}$;

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

N_p : força de protensão final, depois de todas as perdas;

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

I_x : distância da seção x a partir do final da laje;

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

ii) Resistência à força cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista (preenchimento na fábrica):

$$V_{Rd1,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (14)$$

Sendo:

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (15)$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \sum b_{w,2} \cdot d \quad (16)$$

$$\sum b_{w,2} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} + 0,5 \cdot n \cdot b_{alv} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (17)$$

$$\rho_2 = \frac{A_s}{\sum b_{w,2} \cdot d} \quad (18)$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \cdot \alpha \quad (19)$$

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{alv} \quad (20)$$

$$A_{alv} = \pi \cdot \frac{b_{alv}^2}{4} \quad (21)$$

$V_{Rd1,a1}$: força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural, com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão;

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

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

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

n : quantidade de alvéolos preenchidos;

A_{alv} : área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

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

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

iii) Resistência à força cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista (preenchimento na obra):

$$V_{Rd1,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (22)$$

Sendo:

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

Para o caso de preenchimento de mais do que dois alvéolos, a NBR 14861 (ABNT, 2011) recomenda que exista fundamentação em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental. Quando for adotada comprovação experimental, sugere-se a utilização dos métodos de ensaio apresentados pela EN 1168 (EN, 2005).

METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa se baseou em um estudo experimental com o ensaio de LAP's, moldados por extrusão, com o ensaio de resistência à força cortante feito com base nas recomendações da EN 1168 (EN, 2005). Todos os elementos possuíam a mesma tipologia e pertenciam ao mesmo lote de fabricação.

Procedimentos adotados para os ensaios

Tendo em vista a ausência de um texto específico nas normas nacionais, a metodologia de ensaio utilizada foi o consagrado método de ensaio apresentado pelo manual FIP (1992) e a EN 1168 (EN, 2005), com apoios e aplicação de carga conforme a Figura 3.

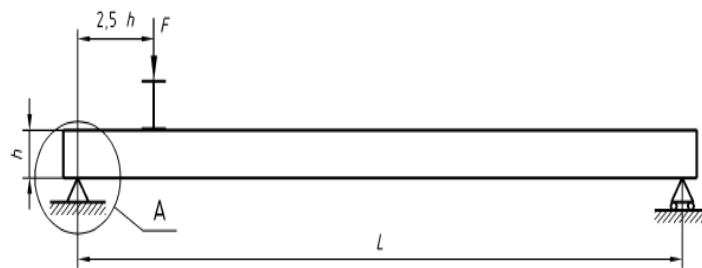


Figura 3 - Modelo de ensaio de resistência à força cortante (FIP, 1992; EN 1168, 2005)

Na Figura 4 mostra-se o layout do ensaio realizado no ambiente de fábrica.

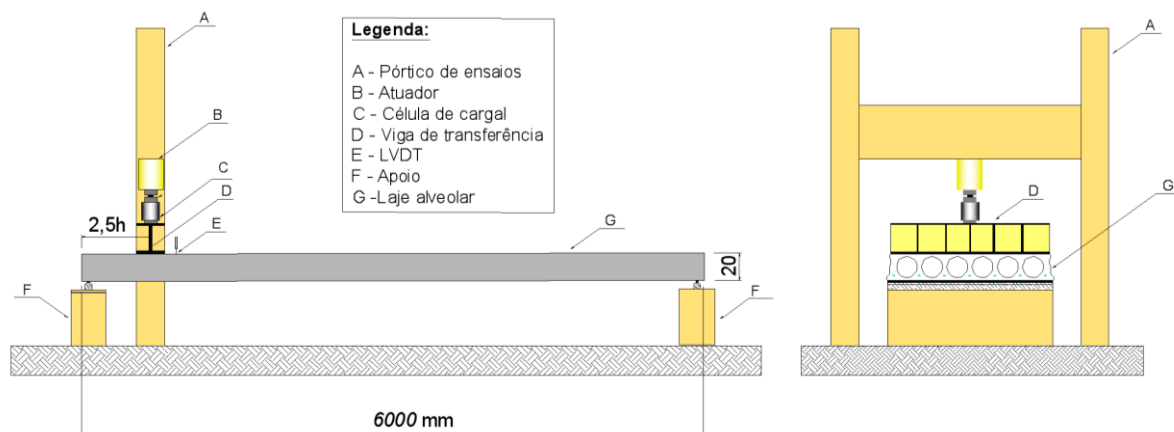


Figura 4 - Esquema de ensaio de resistência à força cortante (Pinheiro, 2014)

Os equipamentos utilizados para os ensaios das lajes foram: Pórtico de ensaio de fabricação própria, com capacidade de 400 kN, regulagem de altura e posição de aplicação do carregamento, e atuador hidráulico de acionamento manual; Célula de carga com capacidade de 500 kN; Módulo de aquisição de dados com quatro canais e captação de dados a cada 1 segundo; LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) com precisão de 0,01mm; Prensa para ensaio com capacidade de 1000 kN; Extensômetros para ensaios de módulo de elasticidade do concreto com precisão de 0,01mm; Tanque para cura de corpos de prova; Equipamento para retífica de corpos de prova de concreto.

Para cada elemento realizou-se o ensaio em nas duas extremidades, com o objetivo de se obter prova e contraprova, totalizando assim 18 ensaios, além da caracterização do concreto e aço usados na confecção das lajes.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os modelos foram nomeados em função do parâmetro que seria avaliado, sendo mostrada a nomenclatura na Figura 5.

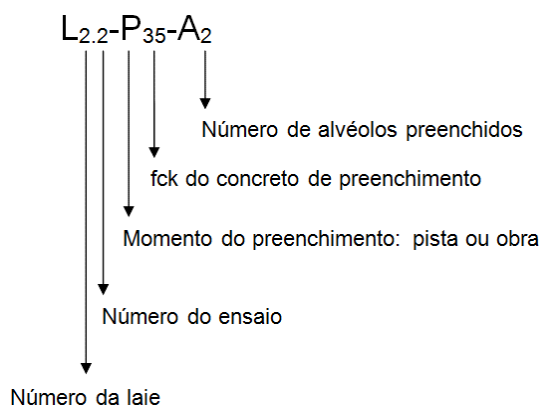


Figura 5 - Nomenclatura para identificação dos modelos (Pinheiro, 2014)

A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram os parâmetros estudados e a sua variação com relação à geometria e as propriedades dos materiais, respectivamente.

Tabela 1 - Dimensões dos modelos de laboratório

Modelo	Ensaio por modelo	Armadura ativa	Alvéolos preenchidos	$f_{\text{Alvéolo}}$ (mm)	L_{lajeA} (mm)	L_{lajeB} (mm)	h_{laje} (mm)	Sb_w (mm)
L1-A0	2		0					315
L2-P35-A2	2		2					410
L3-O35-A2	2		2					410
L4-P45-A2	2		2					400
L5-O45-A2	2	7 ϕ 12,7mm	2	150	6000	5450	200	400
L6-P35-A4	2		4					505
L7-O35-A4	2		4					505
L8-P45-A4	2		4					484
L9-O45-A4	2		4					484

Sendo:

$L_{\text{laje,A}}$: comprimento da laje para ensaio do lado A;

$L_{\text{laje,B}}$: comprimento da laje para ensaio do lado B;

h_{laje} : altura da laje;

$f_{\text{Alvéolo}}$: diâmetro dos alvéolos;

$\sum b_w$: somatório das nervuras internas e externas da laje mais a parcela de contribuição da seção com alvéolos preenchidos.

Vale salientar que o valor de Sb_w na Tabela 1 consiste no valor de Sb_w das nervuras sem preenchimento dos alvéolos e para as lajes com o preenchimento, foi considerada a Eq. 17. A resistência do concreto à compressão, aos 28 dias, para as LAP's foi de 50 MPa.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais dos modelos de laboratório

Modelo	Concreto LAP's		Concreto alvéolos		Cordoalhas		
	$f_{c,laje}$ (MPa)	$E_{c,laje}$ (GPa)	$f_{c,alv}$ (MPa)	$E_{c,alv}$ (GPa)	F_P (kN)	E_p (GPa)	$f_{t,aço}$ (MPa)
L1-A0			0,00	0,00			
L2-P35-A2			33,75	19,52			
L3-O35-A2			33,75	19,52			
L4-P45-A2			38,88	17,41			
L5-O45-A2	56,83	30,86	38,88	17,41	1026,37	202,0	1955,00
L6-P35-A4			33,75	19,52			
L7-O35-A4			38,88	17,41			
L8-P45-A4			33,75	19,52			
L9-O45-A4			38,88	17,41			

Sendo:

$f_{c,laje}$: resistência a compressão do concreto de fabricação da laje;

$E_{c,laje}$: módulo de elasticidade do concreto de fabricação da laje;

$f_{c,alv}$: resistência a compressão do concreto para preenchimento do alvéolo;

$E_{c,alv}$: módulo de elasticidade do concreto de preenchimento dos alvéolos da laje;




$f_{t,aço}$: resistência a tração da cordoalha de fabricação da laje;

F_P : força de protensão nas cordoalhas;

E_p : módulo de elasticidade da cordoalha de protensão.

De acordo com o a Tabela 2, o concreto utilizado nos alvéolos não atingiu o valor previsto de resistência à compressão do concreto de 35 MPa e de 45 MPa, sendo os módulos de elasticidade apresentaram valores abaixo do previsto, inclusive de acordo com o valor previsto pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Esse valor do módulo de elasticidade do concreto de preenchimento dos alvéolos fez com que houvesse uma redução do valor para o S_{b_w} das nervuras considerando a Eq. 17. A Tabela 3 mostra a disposição da seção transversal dos modelos no apoio.

Tabela 3 - Seção transversal dos modelos estudados (Pinheiro, 2014)

Seção transversal	Descrição
	L1-A0
	L2-P35-A2 / L3-O35-A2 / L4-P45-A2 / L5-O45-A2
	L6-P35-A4 / L7-O35-A4 / L8-P45-A4 / L9-O45-A4

Produção dos modelos

A primeira etapa da produção das lajes tratou-se da preparação da pista de concretagem para o processo de extrusão. Inicialmente realizou-se a limpeza da pista, eliminando qualquer tipo de resíduo sólido ou líquido que pudesse comprometer a qualidade visual e estrutural do elemento, com posterior aplicação de um agente desmoldante a base vegetal (Figura 6).



Figura 6 - Preparação da pista de concretagem (Pinheiro, 2014)

Após a limpeza, as cordoalhas das lajes foram posicionadas sobre a pista, ancoradas por meio de cunhas de ancoragem na cabeceira da pista, e finalmente protendidas por um equipamento hidráulico, constituído por um macaco automático de protensão (MAP) ligado a uma unidade motriz (UM), que possui um indicador de pressão para o controle exato da carga aplicada a cada cabo (Figura 7).



Figura 7 - Etapa de protensão das cordoalhas (Pinheiro, 2014)

No processo de fabricação por extrusão de lajes alveolares, os cabos são inicialmente tensionados e mantidos sob tensão até que todo o concreto da laje passasse pelo processo de extrusão e adquira resistência suficiente para que seja executada a liberação de sua ancoragem, transferindo ao elemento produzido a protensão, garantida pela aderência entre o concreto e os cabos.

A segunda etapa de produção das lajes foi o processo de extrusão, onde a máquina extrusora era alimentada com um concreto de baixo abatimento, com valores próximos a zero e baixa relação água/cimento (aproximadamente 0,30), que era forçado por meio de um sistema de roscas para a pista, incorporando em sua seção as cordoalhas previamente posicionadas, e tendo seus alvéolos formados pela compactação do concreto através de tubos localizados após o sistema de roscas, conforme apresenta a Figura 8.



Figura 8 - Sistema de produção de laje alveolares por extrusão: (a) França (2012) e (b) Pinheiro (2014)

O processo de preenchimento de alvéolos deste trabalho foi dividido em duas etapas, sendo: i) Preenchimento de alvéolos antes da liberação da protensão na pista de concretagem (preenchimento em fábrica) e, ii) Preenchimento de alvéolos após a liberação da protensão na pista de concretagem (preenchimento em obra).

Imediatamente após o processo de extrusão, com o concreto ainda no estado fresco, foram abertos nichos para o preenchimento dos alvéolos através do rompimento do bordo superior da laje, na região localizada entre as almas dos alvéolos, com o uso de uma régua de madeira, evitando a danificação da estrutura do elemento, conforme mostrado na Figura 9. Vale salientar que o comprimento de preenchimento nos alvéolos foi de 80 cm.



Figura 9 - Preparação para o preenchimento de alvéolos (Pinheiro, 2014).

Para lajes que tiveram seus alvéolos preenchidos após a liberação da protensão na pista de concretagem (preenchimento em obra), o preenchimento foi executado ao término da cura das lajes, sendo realizado com o uso de um concreto similar ao usado no preenchimento em fábrica. A Figura 10 mostra o procedimento para preenchimento dos alvéolos.



Figura 10 - Procedimento para preenchimento dos alvéolos (Pinheiro, 2014)

O procedimento de cura adotado para as lajes produzidas foi o de cura a vapor, que tem como objetivo acelerar o processo de liberação da protensão da pista e permitir uma nova etapa de produção. Dado a liberação da pista de concretagem pelo laboratório, foi executado o corte das lajes por meio de uma serra.

Com as lajes cortadas e identificadas, estas foram transportadas e armazenadas em ambiente coberto e sem a incidência de intempéries, para minimizar efeitos de fluência e de retração, até que atingisse a idade de 28 dias para a execução dos ensaios. A Figura 11 mostra os modelos armazenados para ensaio.



Figura 11 - Detalhe do transporte e do armazenamento dos modelos (Pinheiro, 2014)

As lajes foram posicionadas sobre apoios dispostos de modo a funcionarem como apoios fixo e móvel, respectivamente. Entre o apoio e a laje foi utilizado um anteparo de madeira e neoprene para melhor distribuição das reações de apoio, conforme a Figura 12.



Figura 12 - Detalhe dos apoios utilizados no ensaio (Pinheiro, 2014)

Após o posicionamento do modelo, instalou-se a viga de transferência, utilizando uma fina camada de areia entre a viga e a laje para a distribuição do carregamento (Figura 13).



Figura 13 - Camada de regularização para apoio da viga de transferência (Pinheiro, 2014)

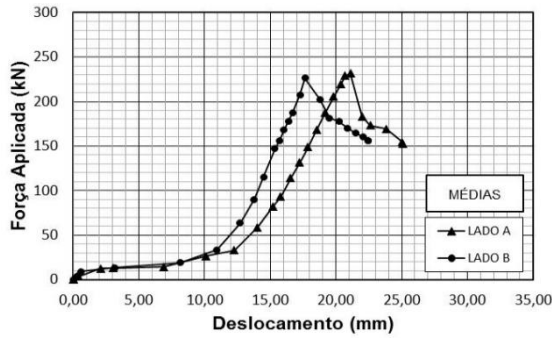
A última fase da preparação para o ensaio consistiu em instalar os transdutores e célula de carga ligando-os ao módulo de aquisição de dados (Figura 14).



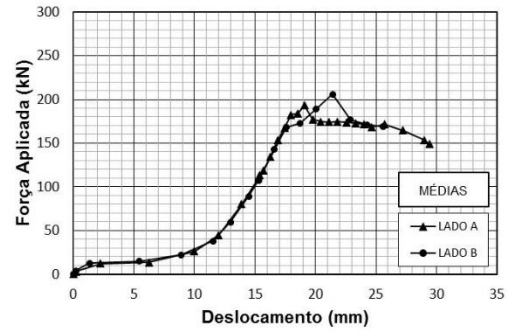
Figura 14 - Arranjo final de ensaio (Pinheiro, 2014)

Resultados dos ensaios

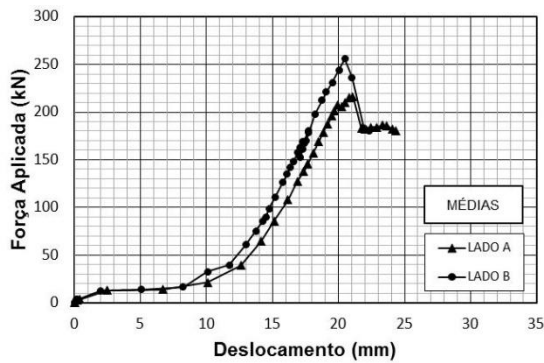
A Figura 15 mostra os resultados para os ensaios dos modelos de LAP's com e sem preenchimento de alvéolos. Vale salientar que o ensaio do modelo de referência L1-A0 houve problema de comunicação entre a célula de carga com o módulo de aquisição de dados, sendo que o valor aferido foi o somente o de ruptura; portanto, não foi possível apresentar a curva força vs. deslocamento deste ensaio.



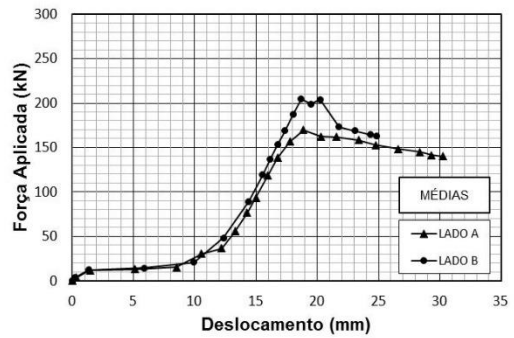
L2-P35-A2



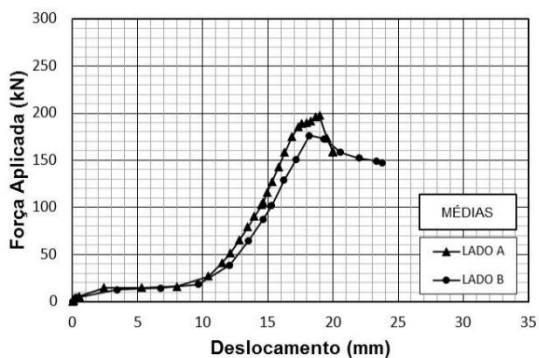
L3-O35-A2



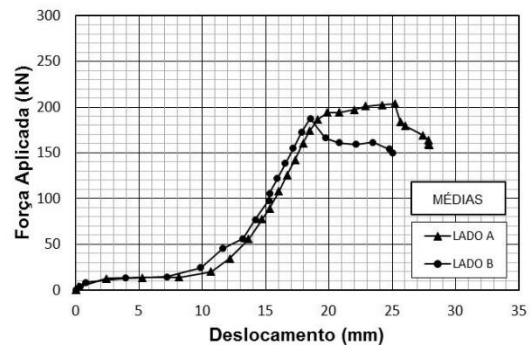
L4-P45-A2



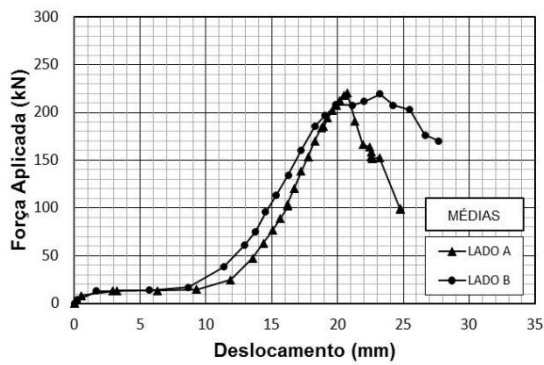
L5-O45-A2



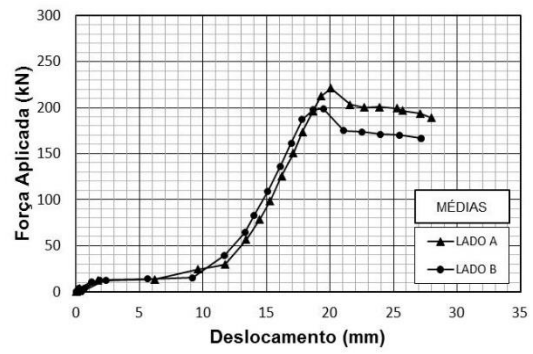
L6-P35-A4



L7-O35-A4



L8-P45-A4



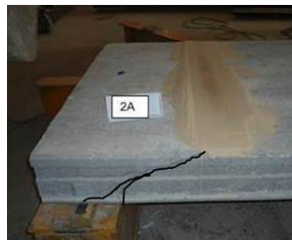
L9-O45-A4

Figura 15 - Comportamento dos ensaios (Pinheiro, 2014)

A Figura 16 mostra os modos de ruptura dos modelos ensaiados.



L1-A0



L2-P35-A2



L3-O35-A2



L4-P45-A2



L5-O45-A2



L6-P35-A4



L7-O35-A4



L8-P45-A4



L9-O45-A4

Figura 16 - Modos de ruptura dos modelos ensaiados (Pinheiro, 2014)

De acordo com os resultados obtidos, pode-se ver que, com exceção dos modelos L7,A-O35-A4 e L8,B-P45-A4 que apresentaram escoamento da armadura, os modelos romperam por força cortante com ou sem escorregamento da cordoalha junto ao apoio.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados será feita entre os resultados medidos nos ensaios e os resultados do modelo normativo, levando em consideração a presença de alvéolos preenchidos.

Comparação dos resultados dos ensaios

Para a comparação entre os resultados, foram considerados ambos os valores medidos (F_u) nos lados A e B de cada modelo e utilizado para o cálculo o maior valor medido e, depois disso, foi calculado o valor da força cortante experimental (V_{exp}), considerando o peso próprio do elemento (F_{laje}) e o peso próprio de cada alvéolo preenchido (F_{alv}), conforme a Tabela 4. Vale salientar que no caso do ensaio dos lados A e B, o comprimento do vão teórico é diferente, pois é o apoio para o ensaio do lado B desconsidera o lado com ruptura do lado A, ou seja, há a redução do comprimento da laje para 545 cm.

Tabela 4 – Valores de força de ruptura (F_u) para os ensaios e o valor correspondente da força cortante.

Modelo	$F_{u,A}$ (kN)	$F_{u,B}$ (kN)	F_u (kN)	F_{alv} (kN)	F_{laje} (kN)	$V_{exp,A}$ (kN)	$V_{exp,B}$ (kN)	V_{exp} (kN)
L1-A0	181,10	207,80	207,80	0,00	20,25	175,70	200,10	200,10
L2-P35-A2	231,70	226,40	231,70	0,34	20,25	222,68	217,88	222,68
L3-O35-A2	193,40	206,00	206,00	0,34	20,25	187,68	199,18	199,18
L4-P45-A2	216,40	256,10	256,10	0,34	20,25	208,68	245,08	245,08
L5-O45-A2	169,90	204,40	204,40	0,34	20,25	166,18	197,68	197,68
L6-P35-A4	197,40	176,10	197,40	0,34	20,25	191,96	172,46	191,96
L7-O35-A4	203,60	183,80	203,60	0,34	20,25	197,65	179,56	197,65
L8-P45-A4	220,60	219,20	220,60	0,34	20,25	213,26	211,96	213,26
L9-O45-A4	221,30	198,80	221,60	0,34	20,25	213,86	193,26	213,86

A Figura 17 mostra a comparação entre os ensaios feitos nos lados A e B dos modelos ensaiados.

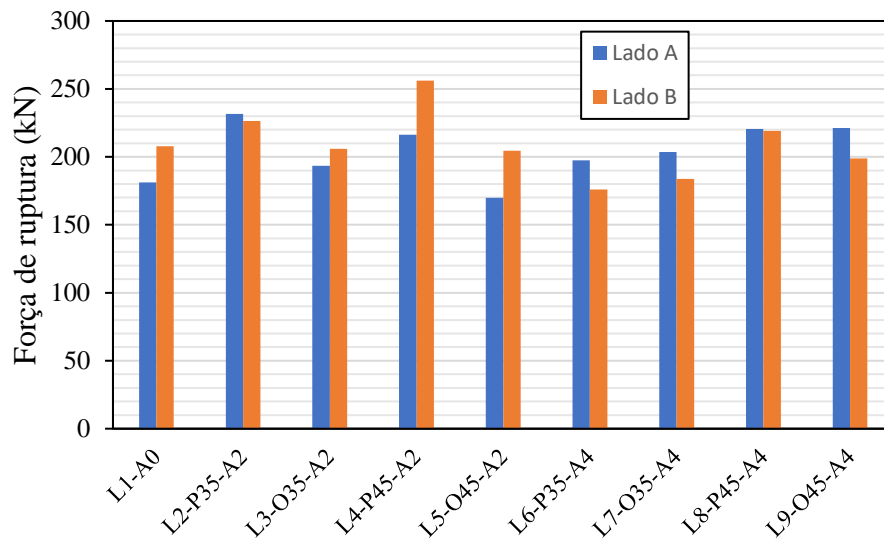


Figura 17 - Comparativo entre os resultados de força de ruptura nos ensaios

De acordo com os resultados obtidos, pode-se ver que houve uma boa aproximação dos resultados para força de ruptura para os lados A e B, com exceção dos modelos L4-P45-A2 e L5-O45-A2. Durante os ensaios dos modelos L4-P45-A2 e L5-O45-A2 foi constatada uma fissuração entre na interface entre a superfície do alvéolo da LAP e o material de preenchimento, o que, conseqüentemente, interferiu no comportamento do alvéolo preenchido e acarretou a oscilação do resultado para a força de ruptura.

Conforme comentado anteriormente, foi considerado o maior valor obtido pelo ensaio, pois representaria um valor potencial de ruptura para o ensaio.

Comparação dos resultados com a NBR 14861 (ABNT, 2011)

A Tabela 5 mostra a comparação dos resultados experimentais com os valores teóricos, conforme estabelecido na fundamentação teórica.

Tabela 5 – Valores de calculados para a resistência à força cortante (valores experimentais e de projeto) comparados com a força de cortante dos ensaios.

Modelo	Experimental		Valor de projeto		Experimental			Valor de projeto		
	$f_{c,laje}$ MPa	$f_{c,alv}$ MPa	$f_{ck,laje}$ MPa	$f_{ck,alv}$ MPa	$V_{c,exp}$ kN	$V_{p,exp}$ kN	$V_{Rd,exp}$ kN	$V_{c,proj}$ kN	$V_{p,proj}$ kN	$V_{Rd,proj}$ kN
L1-A0	56,83	0,0	50,0	0,0	114,41	62,87	177,28	105,5	62,87	168,37
L2-P35-A2	56,83	33,75	50,0	35,0	138,62	64,83	203,45	134,46	69,67	204,13
L3-O35-A2	56,83	33,75	50,0	35,0	148,87	62,87	211,74	146,9	62,87	209,77

L4- P45-A2	56,83	38,88	50,0	45,0	136,01	63,21	199,22	138,39	72,33	210,72
L5- O45- A2	56,83	38,88	50,0	45,0	145,15	62,87	208,02	152,51	62,87	215,38
L6- P35-A4	56,83	33,75	50,0	35,0	162,84	66,12	228,96	174,79	72,1	246,89
L7- O35- A4	56,83	33,75	50,0	35,0	183,34	62,87	246,21	188,76	62,87	251,63
L8- P45-A4	56,83	38,88	50,0	45,0	157,6	63,43	221,03	182,54	76,23	258,77
L9- O45- A4	56,83	38,88	50,0	45,0	175,89	62,87	238,76	199,97	62,87	262,84

A Tabela 6 mostra comparação com os resultados experimentais para a força cortante (V_{exp}) e a razão entre o cálculo da força cortante resistente utilizando os valores medidos experimentalmente ($V_{Rd,exp}$) e os valores de projeto ($V_{Rd,proj}$), cujo ponderador de esforços para ambos os casos foi de 1,4 ($g_f = 1,4$).

Tabela 6 – Valores de calculados para a resistência à força cortante (valores experimentais e de projeto) comparados com a força de cortante dos ensaios.

Modelo	$V_{Rd,exp}$	$V_{Rd,proj}$	V_{exp}	$\frac{V_{Rd,exp}}{V_{exp}}$	$\frac{V_{Rd,proj}}{V_{exp}}$
	kN	kN	kN	V_{exp}	V_{exp}
L1-A0	177,28	168,37	200,10	0,886	0,841
L2-P35-A2	203,45	204,13	222,68	0,914	0,917
L3-O35-A2	211,74	209,77	199,18	1,063	1,053
L4-P45-A2	199,22	210,72	245,08	0,813	0,860
L5-O45-A2	208,02	215,38	197,68	1,052	1,090
L6-P35-A4	228,96	246,89	191,96	1,193	1,286
L7-O35-A4	246,21	251,63	197,65	1,246	1,273
L8-P45-A4	221,03	258,77	213,26	1,036	1,213
L9-O45-A4	238,76	262,84	213,86	1,116	1,229

A Figura 18 mostra a comparação entre os resultados teóricos de força cortante calculada de acordo com a NBR 14861 (ABNT, 2011) utilizando valores medidos experimentalmente e os valores de projeto com os valores de força cortante experimental. A Figura 19 mostra a razão entre os valores teóricos e os experimentais.

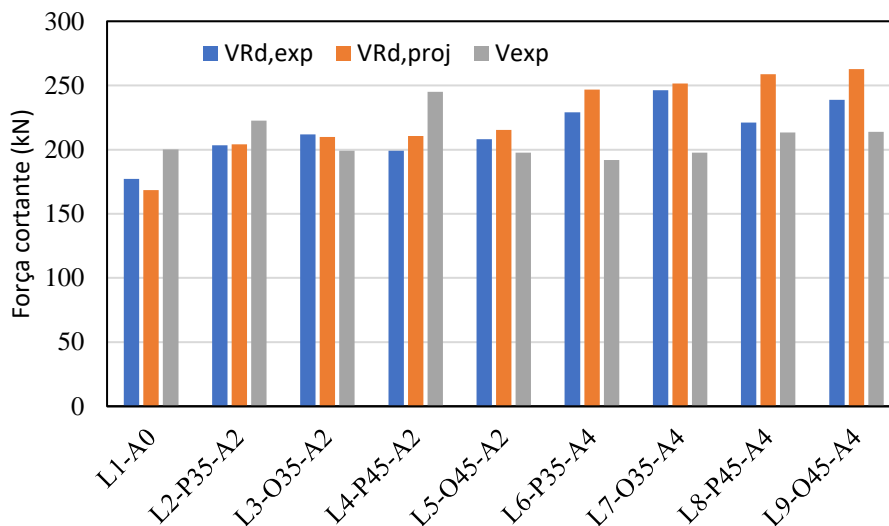


Figura 18 - Comparativo entre os resultados da força cortante experimental e de projeto

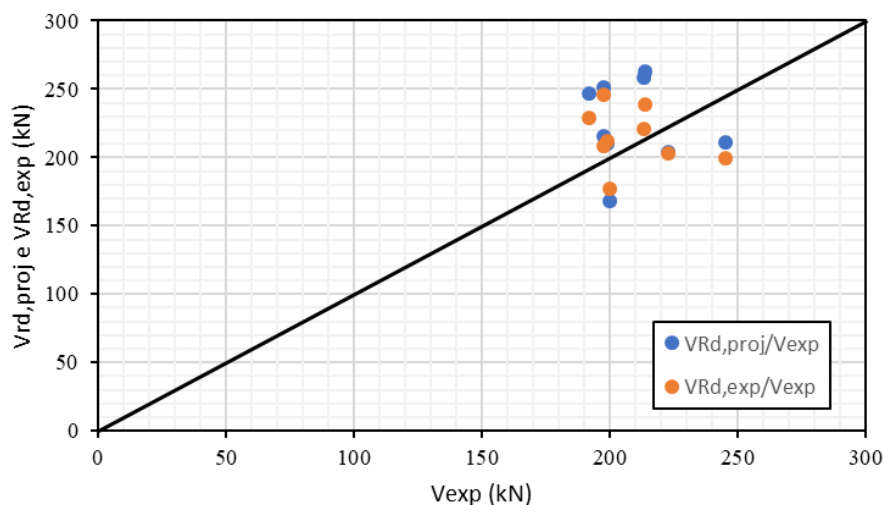


Figura 19 - Comparativo da razão entre os valores teóricos e os experimentais

De acordo com a Figura 18 e a Figura 19, pode-se ver que os resultados dos modelos apresentaram valores teóricos superiores aos experimentais, sendo que, todos os ensaios com 4 alvéolos preenchidos com valores com razão dos valores teóricos e experimentais superiores a 20%, com exceção do modelo L8-P45-A4, quando utilizado os valores medidos em laboratório e utilizadas as equações do item 2.

Com relação ao uso dos valores de projeto, pode-se ver que os modelos teóricos apresentaram valores superiores aos medidos nos ensaios. Isso pode ser explicado pelo comportamento do concreto de preenchimento, que apresentou módulo de elasticidade inferior ao esperado e, pode ter acarretado que não houve aderência adequada na interface entre o concreto da LAP e do alvéolo.

Com relação aos modelos L3-035-A2 e L5-045-A2, os valores teóricos foram superiores aos valores experimentais e, isso pode ser consequência tanto do instante do preenchimento (também constatado nos modelos com 4 alvéolos preenchidos) quando do material, conforme explicado anteriormente.

CONCLUSÕES

O estudo apresentou os processos de produção, preenchimento de alvéolos antes da liberação da protensão (preenchimento em fábrica) e após a liberação da protensão (preenchimento em obra), e controle tecnológico de lajes alveolares em uma fábrica de elementos pré-fabricados em concreto, além de desenvolver a verificação da resistência à força cortante segundo as equações disponíveis na NBR 14861 (ABNT, 2011). Assim, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Modelos que fizeram uso do preenchimento de alvéolos com um material de maior resistência à compressão demonstraram-se com eficiência superior em comparação a preenchimentos de menor resistência a compressão;
- Lajes que obtiveram ruptura tipicamente à força cortante apresentaram valores de resistência superiores àquelas com ruptura combinada de flexão com escorregamento de cordoalha ou ruptura por torção;
- Em sua maioria, os modelos deste trabalho apresentaram indícios de ruptura por flexão combinada com escorregamento de cordoalha, possivelmente em consequência de suas características físicas (materiais), detalhamento da laje e/ou possíveis falhas em seu processo produtivo;
- Pode-se concluir, a partir do resultado da análise experimental, que os ensaios apresentaram valores de resistência ao esforço cortante condizentes com os valores obtidos por meio da equação proposta pela NBR 14861 (ABNT, 2011), com exceção dos modelos com 4 alvéolos preenchidos, que apresentaram valores teóricos superiores aos valores experimentais;
- A redução da capacidade resistente dos modelos com 4 alvéolos preenchidos por ter origem na aderência entre o concreto utilizado no preenchimento do alvéolo e a superfície do alvéolo da laje alveolar, pois, foi percebido, após os ensaios, uma fissuração nesta interface, podendo ter origem no deslizamento dos materiais ou em sua separação por conta da retração do concreto de preenchimento. Isso mostrou a importância da pesquisa e conclui que são necessários mais estudos sobre o comportamento da LAP com mais de 2 alvéolos preenchidos.

Cabe destacar que os ensaios foram realizados com o objetivo de se aferir a capacidade resistente do elemento estrutural e compará-los com o modelo de cálculo normativo para um controle de qualidade a ser realizado em ambiente de fábrica, sendo que se mostrou eficaz e possível de realização com as condições de ensaios requeridas de equipamentos e equipe técnica treinada para sua execução, a um custo reduzido diante da importância dos dados obtidos. Assim, pelos resultados obtidos foi possível comprovar a viabilidade da execução dos ensaios destrutivos de controle tecnológico de lajes alveolares em ambiente de fábrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Empresa CASSOL Pré-fabricados de concreto pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, C. F. M. Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória. 2011. 146f. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2007 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861 - Laje pré-fabricada: Painel alveolar de concreto protendido - Requisitos. Rio de Janeiro. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro. 2017.
- CATOIA, B. Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão. Tese de Doutorado, EESC-USP, 2011.
- CHENG, S.; WANG, X. Impact of interaction between adjacent webs on the shear strength of prestressed concrete hollow-core units. PCI journal, Vol. 55, N. 3, pp. 46-63, Summer 2010.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB-FIP – Model Code, 1990.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN 1168:2005 – Precast concrete products – Hollow core slabs. (English version) Brussels: CEN, 2005.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN1168:2005. Precast concrete products – Hollow core slabs (English version), Brussel: CEN.2005.
- COSTA, O. O. Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidos pré-fabricados. 2009. 132f. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 2017.
- ELLIOTT, K. S. Precast Concrete Structures. Oxford: Elsevier, 2002.
- FEDERATION INTERNATIONALE de la PRÉCONTAİNTE, FIP. Guide to good practice: quality assurance of Hollow core slabs. London, England. 1992.
- FERNANDES, N. Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido, ensaio padrão de apoio para controle de qualidade. 2007. 110f. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R.C.; ORTENZI, A.; DONIAK, I. L. O.; LIVI, L. O. B. Resistência de lajes alveolares pré-fabricadas ao cisalhamento. Revista Técnica - Revista de Tecnologia da Construção, v. 132, p. 62-66, 2008.
- FERREIRA, M. A. Manual de sistemas pré-fabricados de concreto (tradução). Autor do texto original: Arnold Van Acker (FIP-2002). Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto – ABCIC, São Paulo, 2003.
- FRANÇA, A. A. V. Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento. Dissertação de mestrado, UFPR, 2012.
- MELO, C. E. E. Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto. São Paulo: Pini, 2004.

MONES, R. M.; BREÑA, S. F. Hollow-core slabs with cast-in- place concrete toppings: A study of interfacial shear strength. PCI journal, Vol. 58, N. 3, pp. 124-141, Summer 2013.

PALMER, K. D.; SCHULTZ, A. E. Factors affecting web-shear capacity of deep hollow-core units. PCI journal, Vol. 55, N. 2, pp. 123-146, spring 2010.

PINHEIRO, G. L. Estudo da influência do preenchimento de alvéolos em lajes alveolares submetidas à força cortante. 2014. 114f. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

PINHEIRO, G. L.; FERREIRA, M. A.; ALMEIDA FILHO, F. M.; CARVALHO, R. C. Estudo preliminar sobre a influência do preenchimento dos alvéolos na resistência à força cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. 3º PPP, 2013, 10 pág., 2013.

STANTON, J. F. Response of hollow-core slab floors to concentrated loads. PCI journal, Vol. 37, N. 4, pp. 98-113, July-August 1992.