

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Data de submissão: 29/06/2023

Data de aceite: 01/09/2023

Herbert Medeiros Torres Lopes

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/7034927727844327>

Luís Philipe Ribeiro Almeida

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/4965036934315787>

Lucas da Mata Rocha Menezes

Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), Departamento de Engenharia de Estruturas
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/8177329687046734>

Ray Calazans dos Santos Silva

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/5372629655559184>

considerando o comprimento de transferência, protensão efetiva na região de extremidade, comparando as cargas de ruptura obtidas em alguns ensaios experimentais [Pajari (2005), Catoia (2011) e França (2012), Araújo *et al.* (2020)], com as equações disponíveis na literatura, para identificar qual das equações melhor representa a resistência ao cisalhamento em lajes de espessura reduzida. Para isso, desenvolveu-se um estudo teórico com o emprego do equacionamento analítico disponível na literatura técnica, além de identificar análise paramétrica das variáveis que mais interferem nas previsões do comportamento das lajes alveolares protendidas. Verificou-se que para as estruturas particulares avaliadas, em geral, a espessura laje, a força de protensão aplicada e o preenchimento de alvéolos com concreto são parâmetros que interferem diretamente no modo de ruptura à força cortante de lajes alveolares protendidas. Já para painéis alveolares de espessura reduzida a contribuição do preenchimento de alvéolos na resistência ao cisalhamento foi insignificante do ponto de vista estatístico. Com relação aos os códigos normativos, a NBR 14861:2011 foi que melhor representou o comportamento

RESUMO: O objetivo deste trabalho é avaliar o estado limite último de força cortante de lajes alveolares protendidas

ao cisalhamento em lajes alveolares de espessura reduzida. Caso diferente, foi observado para lajes de espessura reduzida que possuem núcleos preenchidos por concreto, em que os códigos normativos aplicados para o cálculo teórico não obtiveram uma boa correlação com os valores experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto Pré-moldado; Lajes Alveolares; Resistência ao Cisalhamento.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria de pré-fabricados de concreto tem avançado na aplicação, conhecimento e viabilidade técnico-econômica de solução estrutural frente às edificações e pontes. Atualmente, o atendimento às demandas da sociedade decorre de soluções fundamentadas na sustentabilidade, ou seja, construir com economia, desempenho técnico, segurança e rapidez são premissas de estruturas pré-fabricadas de concreto. Além disso, a utilização destas estruturas permite obter significativa eficiência estrutural, com o emprego de elementos mais esbeltos, a partir do uso otimizado dos materiais, reduzindo o desperdício de recursos.

As lajes ou painéis alveolares estão entre os produtos pré-moldados mais empregados no mundo, em especial na América do Norte e Europa Ocidental. As primeiras lajes alveolares foram desenvolvidas na década de 1950, na Alemanha, quando evoluiu a tecnologia de produção do concreto e também da protensão em pistas longas de concretagem (El Debs, 2017). Esse tipo de elemento possui uma concepção arrojada, podendo ser usado nos mais variados sistemas estruturais, funcionando como laje de piso ou como painéis de fechamento. No Brasil, a utilização de lajes alveolares tem sido crescente e tem se mostrado competitiva em relação aos sistemas convencionais. Pode-se citar diversas obras que utilizam esse tipo de sistema, como: o shopping *Midway Mall*, em Natal (RN) e na recente construção do estádio do Atlético-MG (Arena MRV).

As lajes alveolares protendidas têm ganhado bastante importância e competitividade em todo o mundo, permitem minimizar o consumo de concreto e maximizar os vãos, convergindo para uma solução otimizada. Isso é justificado pelo efeito da protensão associada a uma seção transversal estruturalmente eficiente. Além disso, a facilidade de manuseio, transporte e armazenamento; adequado isolamento acústico; característica de alcançar grandes vãos em decorrência do baixo peso próprio, com elevada capacidade de carga e pequenos deslocamentos; apresenta uma espessura média reduzida devido ao emprego de concreto de mais alta resistência e protensão, quando comparada aos sistemas estruturais moldados *in loco* (CATOIA, 2011).

Os vazios longitudinais denominados alvéolos são responsáveis pela seção complexa da laje alveolar protendida, sendo fabricada basicamente por dois métodos: moldagem com fôrmas deslizantes (concreto com *slump* mais elevado) e moldagem por extrusão (concreto com baixo *slump*), em longas pistas de concretagem. As armaduras utilizadas são cordoalhas, e até mesmo fios protendidos longitudinalmente na borda

inferior, podendo ser utilizados também na borda superior. Em decorrência do processo de fabricação, não é usual a introdução de armadura de cisalhamento, em função disso, as lajes alveolares são compostas exclusivamente de armadura ativa (SANTOS, 2014).

O objetivo deste trabalho é avaliar o estado limite último de força cortante de lajes alveolares protendidas considerando o comprimento de transferência, protensão efetiva na região de extremidade, comparando as cargas de ruptura obtidas em alguns ensaios experimentais [Pajari (2005), Catoia (2011), França (2012) e Araújo *et al.* (2020)], com as equações disponíveis na literatura, para identificar qual das equações melhor representa a resistência ao cisalhamento. Para isso, será desenvolvido um estudo teórico com o emprego do equacionamento analítico disponível na literatura técnica, além de identificar análise paramétrica das variáveis que mais interferem nas previsões do comportamento das lajes alveolares protendidas.

2 | REVISO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lajes alveolares protendidas

A norma brasileira NBR 14861:2011 (ABNT, 2011) define laje alveolar como peça de concreto com alvéolos produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigoroso 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. A seção transversal é alveolar (Figura 1), com altura constante e presença de almas de concreto e alvéolos longitudinais (responsáveis pela redução do peso próprio da estrutura). Esta definição, apresentada na norma brasileira, representa o tipo de laje alveolar mais utilizado no Brasil que é a pré-fabricada em concreto protendido.

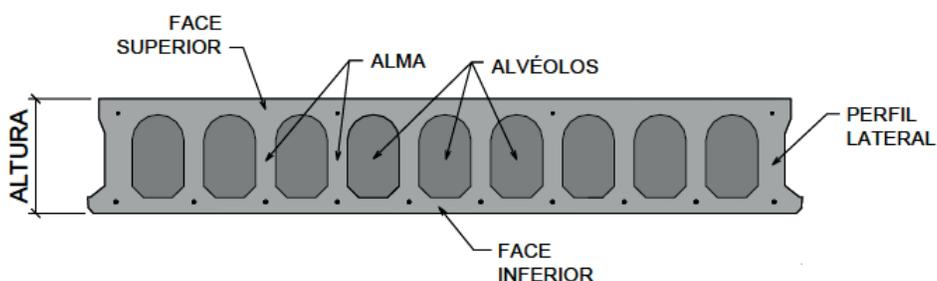


Figura 1 – Seção transversal de um painel alveolar.

Como a laje alveolar não possui armadura transversal, a resistência ao cisalhamento depende inteiramente da resistência à tração do concreto, por isso, a qualidade do concreto, bem como o controle da produção desse elemento estrutural devem ser constantemente certificados em todos os estágios.

O sistema de lajes alveolares obteve um grande sucesso no mercado da construção

civil devido as condições de manuseio, transporte, armazenagem e aplicação em grandes vãos, facilitando o *layout* e a otimização, com redução da espessura média da estrutura e ganho nas fundações.

2.2 Processo de fabricação dos painéis alveolares

A padronização e a racionalização do projeto, a fim de conferir uma maior eficiência estrutural das lajes, e, conseqüentemente, um menor custo do empreendimento, são parâmetros almejados na construção civil. Nessa linha, os processos de fabricação de lajes alveolares protendidas comumente utilizados são: por fôrma deslizante ou por extrusão (mais utilizado). A manufatura das lajes alveolares está constantemente ligada a um processo de automatização, que emprega concreto de alta resistência, cordoalhas de protensão, máquina para corte, além de sistemas de içamento (pontes rolantes, balancins, garras e cabos de aço). A Figura 2 ilustra, de forma resumida, o processo de fabricação de painéis alveolares:



Figura 2 – Fabricação de painéis alveolares, Clube de concreto (2021).

Segundo El Debs (2017), uma das etapas críticas do projeto dos painéis alveolares é a sua resistência à força cortante, pois, via de regra, não se coloca armadura transversal na alma da peça, em virtude do processo de produção de lajes alveolares. Quando é necessário vencer vãos com maiores dimensões ou suportar cargas mais elevadas, alguns mecanismos são avaliados 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.

O preenchimento dos alvéolos pode ser realizado com o intuito de melhorar a resistência da laje alveolar ao cisalhamento. Os alvéolos longitudinais podem ser preenchidos na pista de concretagem, juntamente com a moldagem das peças ou na obra,

caso em que os concretos empregados possuem diferentes idades (perda de água do concreto de menor idade) comprometendo a aderência entre os dois concretos (CATOIA, 2011). Assim, maiores cuidados são necessários para garantir boa aderência entre o concreto de preenchimento e o da laje.

2.3 Comportamento de lajes alveolares ao cisalhamento

As unidades de lajes alveolares são normalmente constituídas por cordoalhas protendidas, posicionadas em uma ou mais camadas na região inferior das nervuras, e, em alguns casos, também podem ser inseridas na região superior. A força de protensão é introduzida por aderência, e o valor de cálculo do comprimento de transferência depende do nível de protensão e do tipo de cordoalhas utilizadas.

Palmer e Schultz (2009), sobre cisalhamento em lajes alveolares, citam que as formas rupturas mais comuns são flexo-cortante e por tração diagonal (Figura 3). Segundo os autores, a tração diagonal é frequente em elementos com nervura pouco espessa, com consideráveis níveis de protensão e com carregamento concentrado aplicado próximo ao apoio, ao passo que a ruptura por flexo-cortante ocorre em situações contrárias as mencionadas.

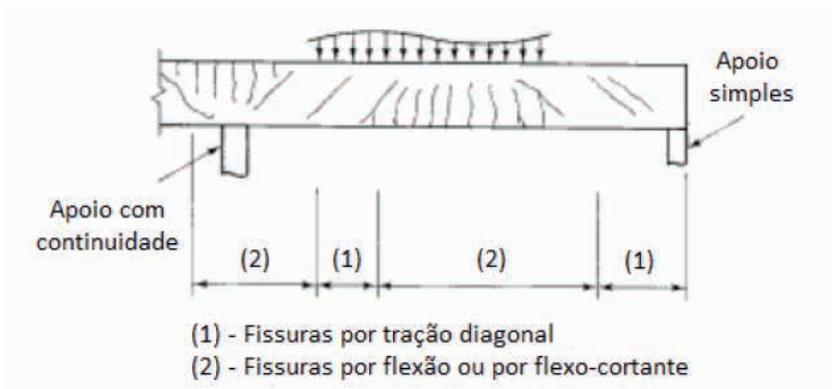


Figura 3 – Tipos de fissura em uma laje, Nawy (1996).

O mecanismo de ruptura por tração diagonal (Figura 4) ocorre em regiões de lajes alveolares não fissuradas por flexão, ou seja, quando a tensão principal atinge o valor da resistência à tração concreto. A fissura inclinada ocorre repentinamente e próxima ao apoio, sendo uma forma de caracterizar esse processo. Dessa maneira, este mecanismo é denominado como “ruptura por cisalhamento em elementos não fissurados”, uma vez que, próximo ao colapso, não existe fissura na região do apoio.



Figura 4 – Ruptura por tração diagonal de uma laje alveolar, Santos (2014).

O mecanismo flexo-cortante (Figura 5) ocorre quando as tensões de cisalhamento e de flexão são elevadas, fazendo com que a ruptura por cisalhamento sofra influência da flexão. As tensões de flexão ocasionam fissuras ao longo do vão, sendo tal mecanismo denominado como “ruptura por cisalhamento em elementos fissurados”.



Figura 5 – Ruptura por flexo-cortante de uma laje alveolar, Santos (2014).

A dificuldade em analisar a capacidade resistente da peça envolve uma análise de redistribuição de esforços após a fissuração e dado a inexistência de armaduras transversais, a propagação das fissuras no concreto ultrapassam a linha neutra, atingindo o banzo comprimido. Os principais mecanismos de influência pontuados por Wight e Mecgregor (2012) são devidos a resistência à tração do concreto; taxa de armadura longitudinal (efeito pino); fator de escala; relação entre a distância de aplicação da força concentrada e a altura útil da seção; esforço axial (por exemplo, protensão) e tipo /tamanho do agregado.

2.4 Dimensionamento ao cisalhamento - prescrições normativas e empíricas

A seguir são apresentadas algumas recomendações normativas para o cálculo da resistência à força cortante em elementos estruturais sem armadura transversal. A norma brasileira de lajes alveolares, NBR 14861:2011, apresenta uma única formulação para cálculo desta verificação. Já o Eurocode 2 (CEN, 2004), o ACI 318 (ACI, 2019) e EN 1168 (norma europeia para lajes alveolares) fazem distinção no cálculo da resistência à força cortante em regiões fissuradas e não fissuradas por flexão.

2.4.1 NBR 14861:2011

A norma brasileira NBR 14861:2011 (ABNT, 2011) de lajes alveolares apresenta uma formulação para a verificação da resistência à força cortante, não fazendo distinção entre regiões fissuradas e não fissuradas por flexão. Esta formulação representa o mecanismo de ruptura por flexo-cortante, portanto relativa às regiões fissuradas por flexão.

A NBR 14861:2011 (ABNT, 2011) para lajes alveolares protendidas sem preenchimento de alvéolos recomenda para o cálculo da resistência ao cisalhamento a Equação 1:

$$V_c = 0,25 \cdot f_{ctk,0,05} (1,6 - d)(1,2 + 40 \cdot \rho_1) b_w \cdot d + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{Equação 1})$$

em que,

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A_c} \quad (\text{Equação 5})$$

onde,

V_c é a resistência ao cisalhamento fornecida pelo concreto (kN);

$f_{ctk,0,05}$ é a resistência característica à tração inferior do concreto (5% da produção) (MPa);

d é profundidade efetiva da seção transversal (mm);

ρ_1 é a taxa de armadura longitudinal;

b_w é a largura da alma interna da laje (mm);

A_c é a área da seção transversal de concreto (mm²);

σ_{cp} é a tensão normal do concreto no ponto crítico (MPa).

Para lajes alveolares com núcleo preenchidos, a norma brasileira recomenda que a resistência ao cisalhamento pode ser estimada pela Equação 6. Interessante mencionar que a principal diferença entre as Equações 1 e 6 é que esta leva em conta a contribuição do concreto que preenche os alvéolos, contribuindo na rigidez do elemento estrutural e,

consequentemente, gerando acréscimo na resistência ao cisalhamento.

$$V_c = 0,25 \cdot f_{ctk,0,05} (1,6 - d) (1,2 + 40 \cdot \rho_2) b_{w,2} \cdot d + 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot b_{w,2} \cdot d \quad (\text{Equação 6})$$

em que,

$$b_{w,2} = b_{w,ext} + b_{w,int} + 0,5 \cdot n \cdot b_{core} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\rho_2 = \frac{A_{st}}{b_{w,2} \cdot d} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\sigma_{cp,2} = \frac{N_p}{A_{c,2}} \quad (\text{Equação 9})$$

$$A_{c,2} = A_c + n \cdot A_{core} \quad (\text{Equação 10})$$

onde,

$b_{w,2}$ é a largura total das almas da laje alveolar, incluindo os núcleos preenchidos (mm);

$b_{w,ext}$ é a largura da alma externa da laje (mm);

$b_{w,int}$ é a largura da alma interna da laje (mm);

$A_{c,2}$ é a área da seção transversal de núcleos preenchidos de concreto (mm²).

2.4.2 EN1192-1-1:2004

De acordo com a Norma Europeia EC2-1-1, a capacidade resistente ao cisalhamento em região fissurada por flexão para elementos sem armadura transversal é determinada pela Equação 11:

$$V_c = [0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (\text{Equação 11})$$

em que,

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (\text{Equação 12})$$

$$\rho_1 = \frac{A_{st}}{b_w \cdot d} \leq 0,002 \quad (\text{Equação 13})$$

Vale salientar que da análise perfunctória das Equações 1 e 11 constata-se grande similaridade entre seus componentes, haja vista inspiração na norma europeia EN 1192-1-1:2004 para criação da norma brasileira.

2.4.3 EN1168:2005

A Norma Europeia EN 1168:2005, apresenta um equacionamento para as lajes que rompem por cisalhamento à tração. Recomenda-se a Equação 14, onde α representa a relação entre a distância do ponto crítico do suporte e da parte superior valor limite do comprimento de ancoragem do elemento de protensão:

$$V_c = 0,25.0,8. \frac{b_w \cdot I}{S_c} \sqrt{f_{ctk,0,05}^2 + 0,9. \alpha. f_{ctk,0,05} \cdot \sigma_{cp}} \quad (\text{Equação 14})$$

sendo,

I o momento de inércia da seção transversal (mm^4);

S_c o momento estático da área da seção transversal acima do ponto crítico (mm^3).

O preenchimento dos núcleos longitudinais do painel alveolar pode ser feito na fábrica, antes da aplicação da protensão, ou *in loco*. Quando o preenchimento dos alvéolos é realizado *in situ*, a resistência ao cisalhamento da laje alveolar com vários núcleos preenchidos pode ser estimada pela Equação 15:

$$V_c = 0,8. \frac{b_w \cdot I}{S_{cp}} \sqrt{f_{ctk,0,05}^2 + 0,9. \alpha. f_{ctk,0,05} \cdot \sigma_{cp}} + \frac{2}{3} n. b_{core} \cdot d. f_{ct,filling} \quad (\text{Equação 15})$$

sendo,

b_{core} a largura dos alvéolos preenchidos com concreto (mm);

$f_{ct,filling}$ a resistência à tração do concreto do alvéolo preenchido (MPa);

n o número de alvéolos preenchidos.

2.4.4 ACI 318-19

Segundo a norma americana, American Concrete Institute Standard ACI 318-19, é recomendada uma equação empírica (Equação 16) para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares. Esta equação é baseada em dois termos: contribuição do concreto e contribuição da protensão (no caso de cordoalhas retas essa parcela é nula).

$$V_c = (0,29\sqrt{f_{ck}} + 0,3. \sigma_{cp}) b_w \cdot d + V_p \quad (\text{Equação 16})$$

2.4.5 Modelo de Yang (1994)

Na literatura, existem algumas equações analíticas disponíveis para estimar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares. O procedimento analítico mais conhecido foi apresentado por Yang (1994), baseado em suas modelagens numéricas e sugere a equação de tensões na região crítica da laje. As Equações a seguir resumem a formulação de Yang para lajes alveolares protendidas.

$$\sigma_c = -\frac{N_c}{A_c} + \frac{N_{p,inf} \cdot e_{inf}}{I} Z - \frac{N_{p,sup} \cdot e_{sup}}{I} Z - \frac{V_z \cdot L_x}{I} Z \quad (\text{Equação 17})$$

$$\tau_c = \frac{1}{b_w} \left[\left(\frac{A_{cp}}{A_c} - \frac{S_{cp} \cdot e_{inf}}{I} + \frac{S_{cp} \cdot e_{sup}}{I} \right) \frac{dN_p}{dx} \right] + \frac{V_z \cdot L_x}{I} Z \quad (\text{Equação 18})$$

$$f_{ct} = \frac{\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cp}}{2} \right)^2 + \tau_c^2} \quad (\text{Equação 19})$$

onde,

$N_{p,inf}$ é a força axial de protensão na borda inferior (N);

$N_{p,sup}$ é a força axial de protensão na borda superior (N);

e_{inf} é a distância entre a cordoalha de protensão inferior e a face inferior da laje (mm);

e_{sup} é a distância entre a cordoalha de protensão superior e a face superior da laje (mm);

V_z é a força de cisalhamento (kN);

A_{cp} é a área da seção transversal acima do ponto crítico (mm²);

Z é a distância do eixo do centroide à fibra onde está localizado o ponto crítico (mm);

L_x é a distância do final da laje até a seção crítica (mm);

t_c é tensão de cisalhamento.

3 | METODOLOGIA

Várias equações analíticas e empíricas têm sido propostas para estimar o valor de resistência ao cisalhamento teórico para lajes alveolares protendidas. Além disso, parâmetros como espessura da laje, força de protensão aplicada, presença de capa de concreto e preenchimento dos vazios longitudinais são fatores que podem influenciar no modo de ruptura deste tipo de laje. Dessa forma, o presente capítulo descreve a metodologia empregada (Figura 6), dividido-o em três etapas principais com a finalidade de atingir os objetos propostos para o trabalho.

A primeira etapa compreende a revisão bibliográfica para aprofundar-se no assunto e obter parâmetros físicos e geométricos de lajes ensaiadas experimentalmente. Os principais trabalhos escolhidos foram: (i) Pajari (2005), no qual analisou-se 49 lajes alveolares submetidas à esforços cisalhantes, com seções transversais diversas, e variando a espessura das lajes entre 200 mm a 500 mm; (ii) Catoia (2011), que desenvolveu um extenso programa experimental para avaliar o esforço resistente ao cisalhamento em regiões fissuradas por flexão em painéis alveolares; (iii) França (2012), no qual foram obtidos dados experimentais para comparação com os valores teóricos dos códigos normativos; (iv) Araújo *et al.* (2020), no qual estuda-se a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas de 160 mm de espessura, comumente utilizadas no Brasil.

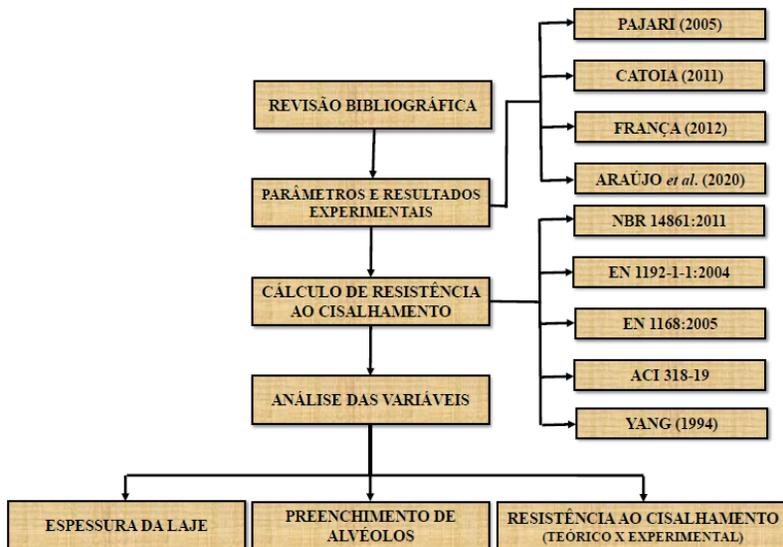


Figura 6 – Fluxograma das principais atividades desenvolvidas.

Uma vez determinados os dados experimentais a segunda etapa consistiu no cálculo teórico da resistência ao cisalhamento por meio dos códigos normativos: (i) NBR 14861:2011; (ii) EN 1192-1-1:2004; (iii) EN 1168:2005; (iv) ACI 318-19; (v) Yang (1994). Por último, efetuou-se a análise dos principais parâmetros que influenciavam na resistência ao cisalhamento dessas lajes, e para um conjunto de lajes com espessura reduzidas foi verificado qual equação disponível na literatura melhor representava a resistência ao cisalhamento dele.

Os principais parâmetros das lajes alveolares ensaiadas experimentalmente por Pajari (2005) e Araújo *et al.* (2020) são apresentados na Tabela 1. Posteriormente, tais dados foram utilizados para avaliar a influência da espessura da laje na resistência à força cortante. No conjunto de lajes com espessura de 165 mm de Araújo *et al.* (2020) verificou-se também qual equação normativa ou empírica melhor representava a resistência ao cisalhamento de uma laje alveolar com espessura reduzida este espaço amostral. Por fim, calculou-se a resistência ao cisalhamento de forma analítica e, em seguida, comparou-se com os valores com os obtidos experimentalmente.

Laje	H (mm)	b _w (cm)	L (cm)	f _{cm} (MPa)	N _p (MPa)
Araújo <i>et al.</i> (2020)	165	124	400	42	1341
Pajari (2005)	200	116	548	60	1075
Pajari (2005)	265	116	551	61	995
Pajari (2005)	320	116	699	64	1039
Pajari (2005)	370	114	700	72	1000
Pajari (2005)	400	116	744	66	1044
Pajari (2005)	500	117	881	72	1000

Tabela 1 – Parâmetros geométricos e físicos das lajes alveolares protendidas ensaiadas com altura variável.

As lajes alveolares protendidas, de acordo com a realidade brasileira, possuem espessuras entre 150 mm a 250 mm, sendo particularizado o estudo para esse intervalo. Com a finalidade de avaliar a influência do preenchimento de alvéolos na resistência ao cisalhamento de lajes com espessura reduzida, selecionou-se um conjunto de lajes ensaiadas experimentalmente dos trabalhos de Araújo *et al.* (2020), Catoia (2011) e França (2012) identificando os principais parâmetros delas, conforme apresentado na Tabela 2.

Laje	H (mm)	b _w (cm)	L (cm)	f _{cm} (MPa)	f _{cm,alv} (MPa)	N _p (MPa)	Nº de alv. laje	Alv. preenchidos
Araújo <i>et al.</i> (2020)	165	124	400	42	48	1341	9	3-5
Catoia (2011)	200	125	310	50	50	1140	6	2-4
França (2012)	265	125	400	30	30	912	5	2-3

Tabela 2 – Parâmetros geométricos e físicos das lajes alveolares protendidas ensaiadas com e sem alvéolos preenchidos.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos no trabalho e as respectivas análises e discussões. Inicialmente, são apresentadas as análises de resistência à força cortante para lajes alveolares: (i) com espessura variável; (ii) com e sem alvéolos preenchidos. Por fim, realizou-se também o cálculo dos valores de resistência ao cisalhamento obtidos por meio uma análise experimental por cálculo analítico para um conjunto de lajes com espessura de 165 mm, verificando-se qual equação melhor representava o comportamento experimental.

4.1 Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares com espessura variável

Na Tabela 3, apresenta-se a resistência à força cortante obtida experimentalmente e calculadas analiticamente pelo Eurocode 2 e pela equação de Yang, bem como a correlação entre estes resultados.

Laje	H (mm)	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{EC2}}$	V_{YANG} (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{YANG}}$
Araújo <i>et al.</i> (2020)	165	152,99	106,99	1,43	215,49	0,71
Pajari (2005)	200	112,32	168,20	0,67	148,53	0,76
Pajari (2005)	265	193,92	205,96	0,94	202,16	0,96
Pajari (2005)	320	255,71	317,25	0,81	288,80	0,89
Pajari (2005)	370	294,20	399,15	0,74	377,37	0,78
Pajari (2005)	400	353,37	458,37	0,77	389,10	0,91
Pajari (2005)	500	468,87	710,70	0,66	544,28	0,86

Tabela 3 – Análise de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares com espessura variável.

Percebe-se que os valores de resistência ao cisalhamento aumentam ao passo que a espessura da laje é elevada. Entretanto, uma exceção é observada entre as lajes de 165 mm e 200 mm de espessura, onde ocorreu uma redução de 36,2 % no valor da resistência ao cisalhamento. Apesar da laje de 200 mm de espessura possuir uma resistência à compressão 42,9% maior que a laje de 165 mm de espessura, esta apresenta uma maior força de protensão (19,8 %) quando comparada com a primeira. Assim, uma possível justificativa é que a força de protensão tem uma maior influência do que a elevação da espessura da laje para esse intervalo de espessuras de lajes.

O cálculo de resistência ao cisalhamento teórico foi aplicado para EN 1192-1-1:2004 e para equação proposta por Yang (1994), os quais foram comparados com os valores experimentais. Observa-se que tanto o Eurocode 2 como a equação de Yang possuem uma boa correlação com os resultados experimentais para lajes de 265 mm de espessura. Já para os demais casos, tais códigos normativos obtiveram resultados mais conservadores, salvo a laje de 165 mm de espessura, onde a formulação do Eurocode 2 subestimou os resultados experimentais em 43 %.

4.2 Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares com e sem preenchimento de alveólos

Segundo Pajari (2005), o preenchimento dos vazios longitudinais por concreto aumenta a rigidez desse elemento estrutural, ocasionando, assim, uma melhora substancial na resistência ao cisalhamento das lajes alveolares. A Tabela 4 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento obtidos experimentalmente e de forma analítica

pela NBR 14861:2011 para lajes alveolares com a presença ou não de vazios longitudinais preenchidos.

Laje	H (mm)	Nº de alv. Preenchido	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{NBR,preenchido}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{NBR,preenchido}}$
Araújo <i>et al.</i> (2020)	165	0	152,99	152,99	1,00
		3	156,19	188,22	0,83
		5	133,61	210,45	0,63
Catoia (2011)	200	0	121,39	102,17	1,19
		2	166,52	170,97	0,97
		4	175,49	234,68	0,75
França (2012)	265	0	201,68	142,50	1,42
		2	304,51	192,39	1,58
		3	284,97	217,18	1,31

Tabela 4 – Análise de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares com e sem núcleos preenchidos.

Observa-se que a laje alveolar de 265 mm de espessura apresentou um incremento de 51% no valor de resistência ao cisalhamento, com preenchimento de dois alvéolos em relação a laje sem preenchimento. Entretanto, para o caso em que ocorreu o preenchimento de três alvéolos, o incremento foi apenas de 41,3 % em relação a laje de referência. Dessa forma, conclui-se que, para uma laje alveolar protendida de 265 mm de espessura é recomendado que o número máximo de alvéolos preenchidos seja de dois, visto que a eficiência acima desse número diminui, tendo assim um gasto com material e mão de obra.

Para a laje alveolar de 200 mm de espessura com dois alvéolos preenchidos, é visto uma ótima correlação com a NBR 14861:2011, valor bem próximo de 1. Percebe-se, também, que a resistência à força cortante não acompanhou de forma proporcional o incremento de resistência teórica à medida que aumentava a área de concreto que preenche a seção transversal da laje.

Por fim, a laje alveolar de 165 mm de espessura não apresentou um ganho de resistência ao cisalhamento significativo ao preencher os alvéolos. Como a laje de 200 mm de espessura, a resistência à força cortante obtida nos ensaios experimentais também não acompanhou o aumento de resistência calculada de forma analítica pela NBR 14861:2011. Assim, a correlação entre valores experimentais e teóricos possui uma boa aproximação para lajes alveolares de 165 mm que não possuem núcleos preenchidos, porém, à medida que ocorre o preenchimento dos vazios longitudinais, esta correlação cai drasticamente.

4.3 Comportamento à força cortante de lajes alveolares de 165 mm de espessura

Na última etapa, selecionou-se o conjunto de lajes alveolares com 165 mm de espessura com valores experimentais de força cortante com e sem alvéolos preenchidos e determinou-se, de forma analítica, os valores de resistência ao cisalhamento por meio das principais equações disponíveis na literatura, conforme exposto na Tabela 5 e 6.

Elemento	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_{EC2} (kN)	V_{EN1168} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{YANG} (kN)
Laje alveolar sem alvéolo preenchido	152,99	152,99	106,99	119,52	196,14	215,49
Laje alveolar com alvéolo preenchido	138,51	200,74	-	251,84	-	206,73

Tabela 5 – Valores de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de ensaio experimental e por cálculo analítico.

Elemento	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,exp}}{V_{NBR}}$	$\frac{V_{u,exp}}{V_{EC2}}$	$\frac{V_{u,exp}}{V_{EN1168}}$	$\frac{V_{u,exp}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{u,exp}}{V_{YANG}}$
Laje alveolar sem alvéolo preenchido	1,00	1,00	1,43	1,28	0,78	0,71
Laje alveolar com alvéolo preenchido	1,00	0,69	-	0,55	-	0,67

Tabela 6 – Análise da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas com espessura reduzida com e sem preenchimentos dos alvéolos.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6 para lajes alveolares sem alvéolos preenchidos, observa-se que a NBR 14861:2011 é o código normativo que melhor representa o comportamento experimental de lajes alveolares com 165 mm de espessura. Já os valores de resistência ao cisalhamento determinados pela EN 1192-1-1:2004 e pela EN 1168:2005, subestimaram os resultados experimentais, ou seja, os valores teóricos são inferiores aos determinados experimentalmente, nesse caso, esses dois códigos normativos são considerados conservadores para aquele tipo de laje. Já a equação de Yang e ACI 318-19 superestimam os resultados experimentais, isto é, os valores teóricos calculados são superiores aos determinados experimentalmente, não sendo indicados para aquele tipo de laje.

Por fim, quanto as lajes alveolares protendidas com alvéolos preenchidos com 165 mm de espessura, diante dos códigos normativos aplicados, nenhuma foi capaz de simular, com boa correlação, a resistência ao cisalhamento, sendo necessário o aprimoramento de tais normas para contemplar, de forma mais precisa, essa situação, visto que, no Brasil, lajes com espessuras reduzidas são frequentes em obras civis.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões deste trabalho são:

- Parâmetros como a espessura da laje, força de protensão aplicada e preenchimento de alvéolos influenciam diretamente na resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas;
- Nas lajes alveolares protendidas com espessura reduzida a contribuição realizada pelo preenchimento dos vazios longitudinais com concreto é insignificante quando comparada as lajes mais espessas, devido o acréscimo de rigidez ser muito baixo.
- O código normativo a NBR 14861:2011 foi o que melhor representou o comportamento experimental à força cisalhante em lajes alveolares protendidas com espessura reduzida sem alvéolos preenchidos;
- Os códigos normativos estudados neste trabalho não apresentam uma boa correlação com os valores experimentais obtidos para lajes alveolares protendidas de espessura reduzida com presença de alvéolos preenchidos.

Dessa maneira, é importante o aprimoramento contínuo desses códigos normativos, a fim de contemplar todas as peculiaridades daquele tipo de elemento estrutural, principalmente para as lajes alveolares protendidas com espessura reduzida, visto que tais peças possuem uma grande aplicabilidade no Brasil, e ainda possuem poucos trabalhos desenvolvidos na literatura técnica/científica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 318**. Building code requirements for structural concrete. Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19). Farmington Hills, MI: ACI Committee 318, 2019.

ARAÚJO, D. L.; SALES, M. W. R.; SILVA, R. P. M.; ANTUNES, C. F. M.; FERREIRA, M. A. Shear strength of prestressed 160 mm deep hollow core slabs. **Engineering Structures**, v. 218, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14861**: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2011. 36p.

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. 2011. 325p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1992-1-1:2004** – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium, 2004.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION– CEN. **EN 1168:2005**. Precast Concrete Product – Hollow Core Slabs. Brussels, Belgium, 2005

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. São Paulo, Oficina de textos, 2017. 456p.

FERREIRA, M. A. Cisalhamento em Lajes Alveolares. Disponível em: <http://www.netpre.ufscar.br/index.php/recursos/textos-e-publicacoes/>. Acesso em: 03 maio 2021.

FRANÇA, A. A. V. **Estudo das lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido submetidas a ensaios de cisalhamento**. 2012. 136p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

NAWY, E. G. **Reinforced concrete: a fundamental approach**. 3.ed. New Jersey, U.S.A Prentice Hall, 1996.

PAJARI, M. **Resistance of Prestressed Hollow Core Slabs Against Web Shear Failure**. Research Notes 1292, VTT Technical Research Centre of Finland, 2005. 69p.

PALMER, K. D; SCHULTZ, A. E. **Web shear strength of precast, prestressed concrete hollow core slab units: a final report**. Department of Civil Engineering. University of Minnesota. Minneapolis, MN, U.S.A. 2009.

PETRUCELLI, N. S. **Considerações sobre projeto e fabricações de lajes alveolares protendidas**. 2009. 106f. Dissertação (Mestrado) - - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

SANTOS, A. P. **Análise da continuidade em lajes alveolares: estudo teórico e experimental**. 2014. 370p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

TESSARI, F. L. **Análise numérica de cisalhamento em lajes alveolares protendidas**. 2019. 112f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Espírito Santo, Vitória, 2019.

WIGHT, J. K; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics & design**. 6 ed. New Jersey, U.S.A. Pearson, 2012.

YANG, L. Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure. **Journal of Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, VA, U.S.A. v. 120, n.9, p. 2675-2696. 1994