

AVANÇOS DOS ESTUDOS DA CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Andrey Monteiro Maciel¹

Roberto Chust Carvalho²

Marcelo de Araújo Ferreira³

Bruna Catoia Periotto⁴

Antônio de Faria⁵

RESUMO

Este trabalho trata da investigação do comportamento das lajes alveolares no cisalhamento à luz das normas brasileira NBR6118:2014 e NBR14861:2011, aplicando o modelo normativo para análise de lajes de espessura nominal 265/260mm ora com alvéolos circulares e ora com alvéolos oblongos, de modo a avaliar a adequação deste aos resultados obtidos experimentalmente. Tal abordagem se faz necessária considerando resultados de ensaios recentes realizados no NETPRÉ-UFSCar, em que, para lajes com espessura da ordem de 260mm com elevado nível de protensão, os valores obtidos foram inferiores àqueles calculados pelo modelo normativo. Desta forma, a finalidade principal desta pesquisa é apresentar uma análise comparativa para lajes de espessura nominal 260/265mm com elevado nível de protensão, avaliando a adequabilidade do modelo com os resultados experimentais, considerando também o efeito de possíveis distorções geométricas inerentes do processo produtivo. Com efeito, foram estudados dois protótipos sendo o primeiro com espessura nominal de 265mm (alvéolos circulares), e o segundo protótipo com espessura nominal de 260mm (alvéolos oblongos). Após o término dos ensaios e de posse dos valores obtidos analiticamente, ficou evidente que para esta tipologia de laje, o modelo normativo

¹Engenheiro Civil (UFSCar) e pós-graduando no PPGE Civ-UFSCar. E-mail: andrey@pretec.com.br

²Doutor em Engenharia de Estruturas (EESC-USP). Professor Sênior (Titular Aposentado) no PPGE Civ-UFSCar. Vice-Coordenador do laboratório NETPRE-UFSCar. E-mail: chust@ufscar.br

³Doutor em Engenharia de Estruturas (EESC-USP). Professor Associado no PPGE Civ-UFSCar. Coordenador do laboratório NETPRE-UFSCar. E-mail: marcelof@ufscar.br

⁴Doutora em Engenharia de Estruturas (EESC-USP). Responsável pelo laboratório NETPRE-UFSCar. E-mail: bcatoia@yahoo.com.br

⁵Mestre em Engenharia de Estruturas (PPGE Civ-UFSCar). Professor no Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS). E-mail: faria@unis.edu.br

utilizado não teve bom desempenho, especialmente quanto ao elemento com alvéolos oblongos, onde a relação entre a cortante experimental e a calculada chegou a 0,92.

Palavras-chave: Cisalhamento em lajes alveolares. Tração diagonal. Flexo-cortante.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existem dois modos de ruptura consagrados no meio acadêmico e que foram descritos em diversas publicações nacionais e internacionais recentes, sendo eles: *tração diagonal* e *flexo-cortante*. O primeiro trata de cisalhamento em regiões com pouca ou nenhuma influência da flexão, cujos modelos analíticos tem por base a Resistência dos Materiais. O segundo modo de ruptura trata de regiões com grande influência da flexão, e devido a sua complexidade, os modelos analíticos utilizados são em geral, baseados em conceitos teóricos, mas calibrados por parâmetros extraídos experimentalmente.

A norma brasileira apresenta em seu texto apenas uma expressão que, por sua vez, foi fundamentada em estudos realizados para vigas protendidas retangulares sem armadura transversal, e que consideram a ruptura por cisalhamento em zonas fissuradas. Porém, sabe-se que, especialmente em lajes altas (maiores que 250mm), onde normalmente as fissuras por flexão são improváveis, o cálculo das lajes alveolares à força cortante pode estar com segurança exagerada, o que conduz o projetista a soluções mais onerosas para a obra.

No NETPré – UFSCar, alguns ensaios de cisalhamento de lajes alveolares com espessura de 260mm, com alvéolos não-circulares, tem sido realizados e, em alguns casos, tem-se observado resultados contra a segurança considerando a equação apresentada na norma brasileira, o que tem colocado em dúvida a confiabilidade do modelo.

Neste contexto, o presente trabalho vem contribuir na investigação do comportamento das lajes alveolares no cisalhamento, considerando para tanto, lajes de espessura nominal 265/260mm ora com alvéolos circulares e ora com alvéolos oblongos, de modo a avaliar a compatibilidade do modelo normativo com os resultados obtidos experimentalmente.

Para atingir o objetivo do trabalho deve-se coletar as informações dos ensaios realizados em laboratório, como: esquema estático do ensaio, características geométricas dos protótipos e

características físicas dos materiais. Posteriormente, a partir de uma planilha de cálculo, almeja-se reproduzir as seções transversais dos elementos e calcular as propriedades geométricas com boa aproximação considerando a seção transversal de projeto e a seção transversal real, antes do ensaio. De posse dessas informações pretende-se calcular as capacidades resistentes ao cisalhamento considerando o modelo analítico normativo e levando-se em consideração possíveis distorções de seção dos protótipos estudados. Por fim, deve-se realizar comparações dos resultados experimentais com aqueles obtidos pelo modelo analítico de maneira a avaliar se há aderência entre os resultados obtidos analiticamente e experimentalmente, considerando lajes com características geométricas diferentes, porém com mesma espessura semelhante.

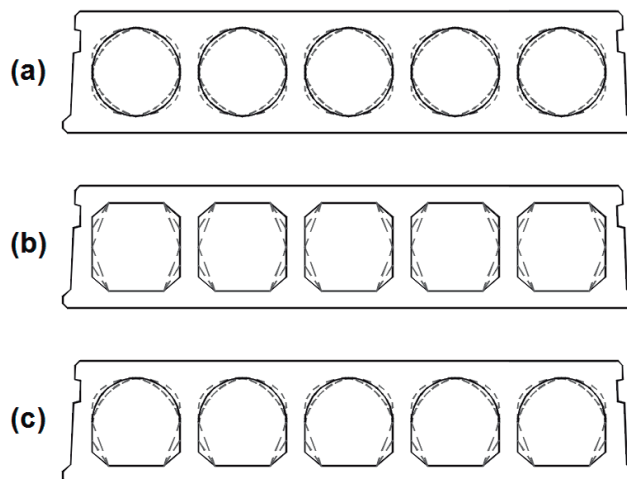
2 CARACTERÍSTICAS DOS PROTÓTIPOS ENSAIADOS

Diversas são as tipologias de laje encontradas no mercado. Em geral a produção de lajes é feita por meio de equipamentos, sendo que os processos mais comuns são: *extrusão* e *formas deslizantes*. Ambos os processos produtivos têm por base a compactação e vibração do concreto.

A título de classificar os alvéolos quanto à forma, foram definidos três grupos, sendo eles: *alvéolos curvos*, *alvéolos poligonais* e *alvéolos mistos*. No grupo dos alvéolos curvos, estão presentes os alvéolos circulares e os oblongos curvos. Os alvéolos poligonais são aqueles formados por segmentos de reta que podem ser ou não paralelos. Os alvéolos mistos, por sua vez, incorporam parte da forma dos alvéolos curvos e parte da forma dos alvéolos poligonais. A

Figura ilustra estes três grupos distintos.

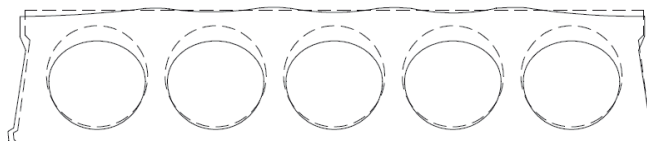
Figura 1: Variações geométricas dos alvéolos – a) Alvéolos curvos; b) Alvéolos poligonais; c) Alvéolos mistos.



Fonte: O autor

Após a compactação e vibração do concreto, produzidas pelos equipamentos distorções de seção podem ser observadas após o corte dos elementos na fábrica. Este efeito pode ser maior ou menor conforme as características físicas do concreto fresco. Isto pode ser observado na Figura 2.

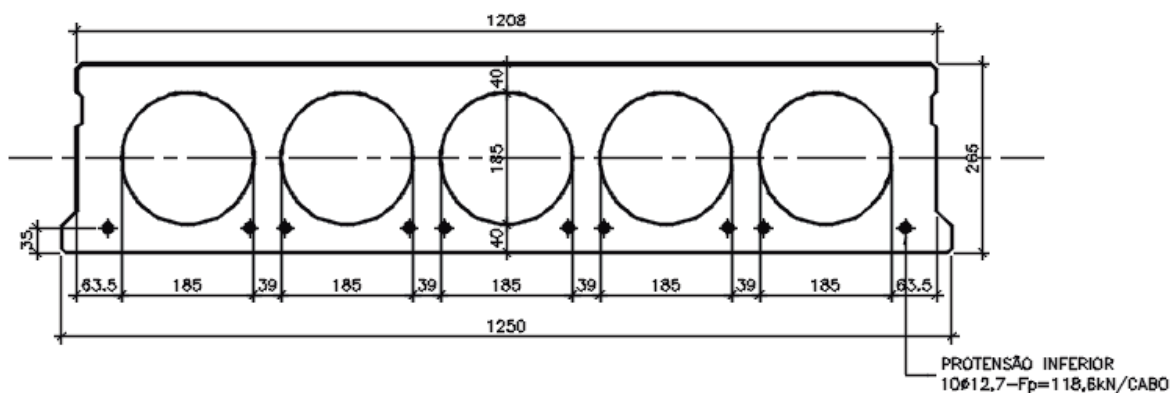
Figura 2: Distorções da seção transversal comuns decorrentes do processo produtivo.



Fonte: Marquesi (2014)

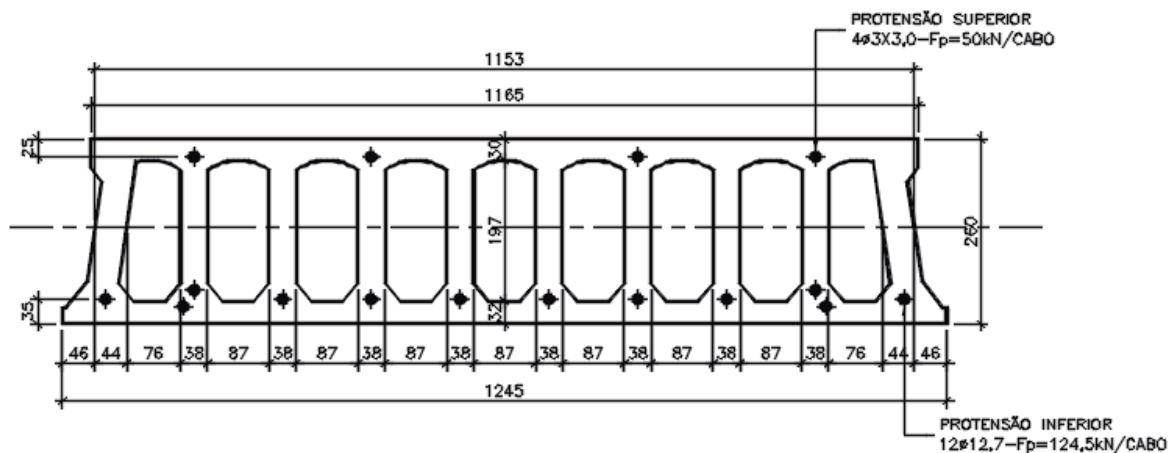
Para o estudo em questão foram escolhidos dois protótipos, cujas geometrias são bastante frequentes no mercado nacional. O primeiro protótipo foi denominado *Protótipo A*, com espessura nominal de 265mm e alvéolos circulares, o que está ilustrado na Figura 2. O segundo protótipo foi denominado *Protótipo B*, com espessura nominal de 260mm e alvéolos mistos, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3: Seção transversal de projeto – Protótipo A



Fonte: O autor

Figura 4: Seção transversal de projeto – Protótipo B



Fonte: O autor

A Tabela 1 ilustrada a seguir apresenta as características das seções transversais dos protótipos ensaiados, considerando a seção transversal de projeto e a seção real (considerando as distorções inerentes do processo de fabricação).

Tabela 1: Propriedades geométricas da seção transversal

PROPRIEDADES MECÂNICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL														
Protótipo	h (mm)		d' (mm)		S _{b,w} (mm)		A _c (mm ²)		I _y (mm ⁴)		S (mm ³)		z _{cg} (mm)	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Protótipo A	265	266,3	35	43,4	283	314,1	185917	190382	1587158122	1611094546	7974136	8095407	132,5	133,2
Protótipo B	260	264	35/25	38,4	392	405,6	155661	174126	1253238080	1443562998	6317203	7218884	128,3	131,7

Protótipo A - Alvéolo Circular (LA02-C-A) Protótipo B - Alvéolo misto (LA05-B) (1) Seção transversal de projeto (2) Seção transversal real

Fonte: O autor

A Tabela 2, por sua vez, apresenta as características dos materiais mais importantes e que foram consideradas no cálculo analítico.

Tabela 2: Propriedades dos materiais

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS												
Protótipo	h _{nominal} (mm)	S _{b,w, nominal} (mm)	Protensão		Protensão Inicial (kN)		Perdas de Protensão		Protensão Inicial (kN)		f _{c, protensão} (MPa)	f _{ck} (MPa)
			Inferior	Superior	Inf./Cabo	Sup./Cabo	Inicial	Final	Inf./Cabo	Sup./Cabo		
Protótipo A	265	283	10φ12.7	-	118,6	-	4,5%	14,0%	118,6	-	25	45
Protótipo B	260	392	12φ12.7	4φ7.0	124,5	50,0	5,0%	15,0%	124,5	50,0	30	50

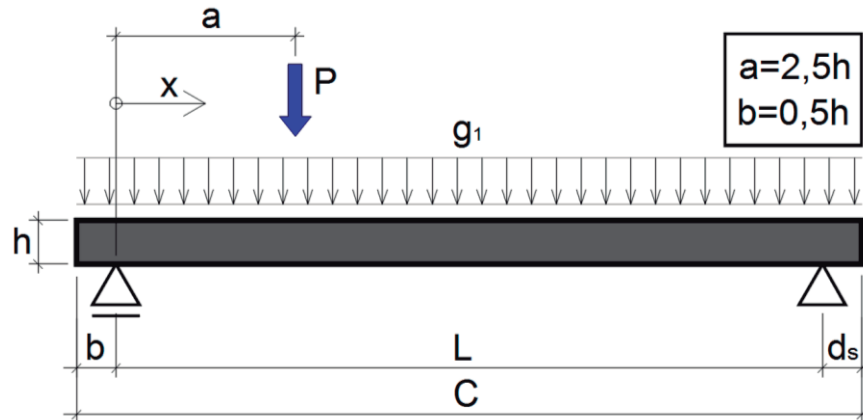
Protótipo A - Alvéolo Circular (LA02-C-A) Protótipo B - Alvéolo Misto (LA05-B)

Fonte: O autor

2.1 Esquema de ensaio

Com base no que foi discutido até aqui, o CEB-FIP em sua versão publicada em 1992 e a BS EN1168:2005 publicaram em seu texto um modelo de ensaio padrão para avaliação de desempenho de lajes alveolares ao cisalhamento, considerando para tanto a aplicação de uma carga concentrada posicionada a uma distância de $2,5h$ (ou 600mm ; o maior deles). Este procedimento de ensaio é o que tem sido praticado nos ensaios realizados no Brasil. A Figura 5 ilustra o esquema de ensaio descrito, já adaptado às condições dos protótipos ensaiados, cujos dados estão apresentados na Tabela 3 apresentada a seguir.

Figura 5: Esquema de ensaio (CEB FIP:1992/ EN 1168:2008)



Fonte: O autor]

Tabela 3: Características dos esquemas dos ensaios

CARACTERÍSTICAS DOS ESQUEMAS DOS ENSAIOS						
Protótipo	h_{nominal} (mm)	C (mm)	L (mm)	a (mm)	b (mm)	d_s (mm)
Protótipo A	265	6000	5467,5	662,5	132,5	400
Protótipo B	260	6500	6280	660	110	110

Protótipo A - Alvéolo Circular (LA02-C-A)

Protótipo B - Alvéolo Misto (LA05-B)

Fonte: O autor

2.2 Geração da geometria das seções – Processo de cálculo

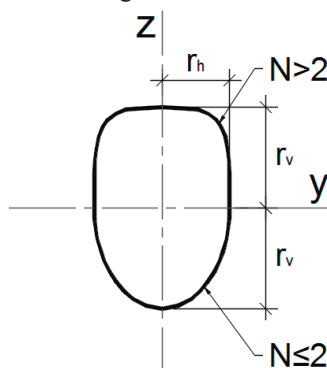
LINDSTROM (2007) define em seu trabalho uma expressão geral para determinação das formas dos alvéolos curvos a qual foi reescrita na Equação 1.

$$y = \sqrt{r_h \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{r_v} \right)^N \right]}; y \geq 0 \text{ e } z \geq 0 \quad (1)$$

Os parâmetros r_h e r_v são medidas da semi-distância horizontal e vertical do centro geométrico do alvéolo até os extremos horizontais e verticais, respectivamente.

Para melhor ilustrar a aplicação desta equação na definição geométrica dos alvéolos curvos apresenta-se a seguir a Figura 6 que denota inclusive o efeito que o fator de forma N tem sobre a curvatura, interferindo no grau de abatimento desta. Ou seja, quanto maior o parâmetro N , mais “achatada” é a curva. Cada par de coordenadas (y,z) define um ponto do primeiro quadrante, onde $y \geq 0$ e $z \geq 0$. Quando $N = 2$ a Equação 2 passa a ser a equação geral da elipse e se, além disso, $r_h = r_v$, obtém-se a equação da circunferência.

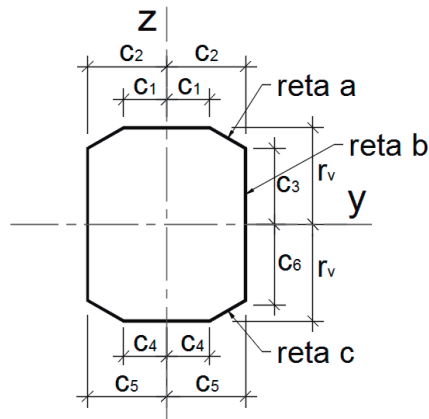
Figura 6: Características geométricas dos alvéolos curvos.



Fonte: O autor

Para a determinação das formas dos alvéolos poligonais, foram definidos três segmentos de reta denominados “retas a, b e c” ilustradas conforme Figura 7.

Figura 7: Características geométricas dos alvéolos poligonais.



Fonte: O autor

A “reta a” é definida pela Equação 2, bem como as Equações 3 e 4 definem as “retas b e c”, respectivamente.

$$c_3 \leq z \leq r_v \quad y = \frac{(z - r_v) \cdot (c_2 - c_1)}{(c_3 - r_v)} + c_1 \quad (2)$$

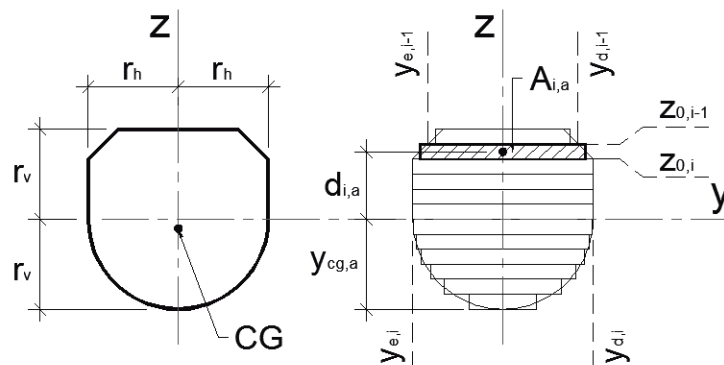
$$-c_6 < z < c_3 \quad y = \frac{(z + c_6) \cdot (c_2 - c_5)}{(c_3 + c_6)} + c_5 \quad (3)$$

$$-r_v \leq z \leq -c_6 \quad y = \frac{(z + r_v) \cdot (c_5 - c_4)}{(-c_6 + r_v)} + c_4 \quad (4)$$

Para o cálculo das propriedades geométricas da seção transversal como: área (A), momento de inércia (I_y) e posição do centroide (z_{cg}) foi adotada uma discretização por faixas

tanto na obtenção das propriedades dos alvéolos (cujos parâmetros recebem o índice a) quanto para a seção transversal final da laje. A Figura 8 a discretização dos alvéolos.

Figura 8: Discretização dos alvéolos em faixas.



Fonte: O autor

Com base na Figura 8 foram calculadas as propriedades de cada faixa do alvéolo (índice “ i ”) que somadas, posteriormente, compõem as propriedades do alvéolo integral, conforme passos algébricos definidos a seguir.

$$A_{i,a} = \frac{1}{2} \cdot [(y_{d,(i-1)} - y_{e,(i-1)}) + (y_{d,i} - y_{e,i})] \cdot |z_{(i-1)} - z_i| \quad (5)$$

$$A_a = \sum_{i=1}^k A_{i,a} \quad (6)$$

$$d_{i,a} = z_{(i-1)} - \frac{1}{2} \cdot (z_{(i-1)} - z_i) \quad (7)$$

$$S_{i,a} = A_{i,a} \cdot d_{i,a} \quad (8)$$

$$S_a = \sum_{i=1}^k S_{i,a} \quad (9)$$

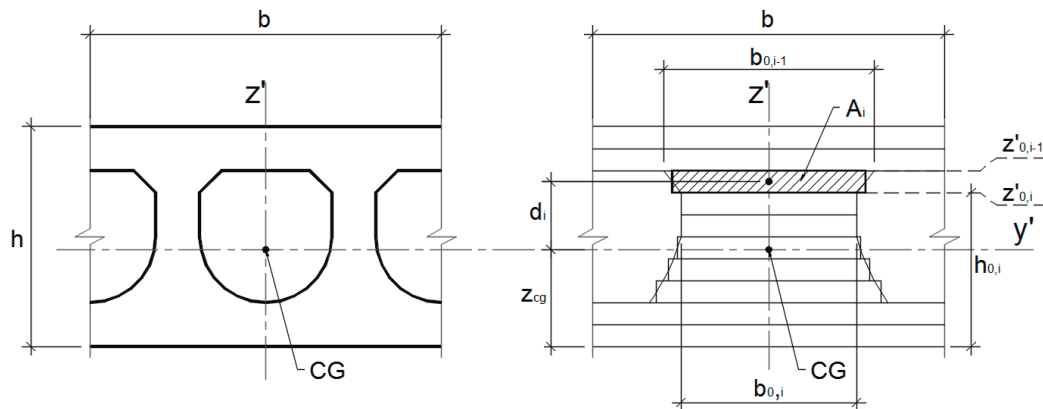
$$I_{y,i,a} = A_{i,a} \cdot (d_{i,a})^2 \quad (10)$$

$$I_{y,a} = \sum_{i=1}^k I_{y,i,a} \quad (11)$$

$$z_{cg,a} = \frac{S_a}{A_a} + r_v \quad (12)$$

A discretização da seção transversal pode ser representada pela Figura 9. Nela é possível perceber que a origem dos eixos cartesianos foi deslocada para o centroide da seção transversal (no cruzamento entre os eixos), a fim de simplificar os cálculos posteriormente. Desta maneira, foi necessário fazer a mudança de coordenadas a partir daquelas definidas para o cálculo das propriedades geométricas dos alvéolos. Ou seja, os eixos de referência outrora chamados y e z , passaram a ser chamados y' e z' .

Figura 9: Discretização da seção transversal em faixas.



Fonte: O autor

$$z' = z + r_v + t_i - z_{cg} \quad (13)$$

$$z_{cg} = \frac{b \cdot - n \cdot A_a \cdot (z_{cg,a} + t_i)}{b \cdot - n \cdot A_a} \quad (14)$$

Com base na Figura e seguindo a mesma lógica do cálculo das propriedades dos alvéolos, são calculados todos os parâmetros que caracterizam a seção transversal analisada.

$$b_{0,i} = b - n \cdot (y_{d,i} - y_{e,i}) \quad (15)$$

$$z_{0,i} = z_{0,i} + z_{cg} \quad (16)$$

$$A_i = \frac{1}{2} \cdot (b_{0,(i-1)} + b_{0,i}) \cdot |z_{0,(i-1)} - z_{0,i}| \quad (17)$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^k A_i \quad (18)$$

$$d_i = z_{0,(i-1)} - \frac{1}{2} \cdot |z_{0,(i-1)} - z_{0,i}| \quad (19)$$

$$S_i = A_i \cdot d_i \quad (20)$$

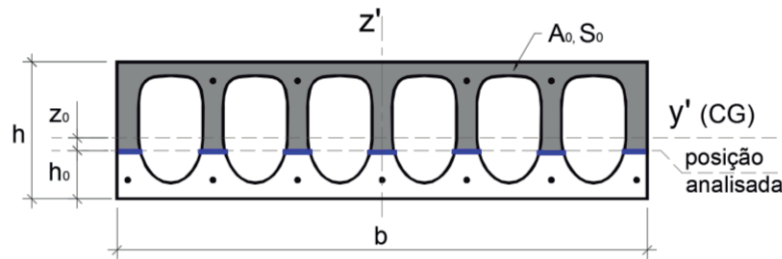
$$S_0 = \sum_{i=1}^k S_i \quad (21)$$

$$I_{y,i} = A_0 \cdot (d_i)^2 \quad (22)$$

$$I_y = \sum_{i=1}^k I_{y,i} \quad (23)$$

O índice θ é adotado para definir a posição da seção analisada em relação a fibra inferior, onde é calculada a área acumulada (A_0) e o momento estático acumulado (S_0), como ilustrado na Figura . Este último por sua vez atinge seu valor máximo quando a coordenada z coincide com o centroide da seção e assim passa a receber a notação S . Estes parâmetros serão úteis para o cálculo da cortante resistente que será visto no próximo capítulo.

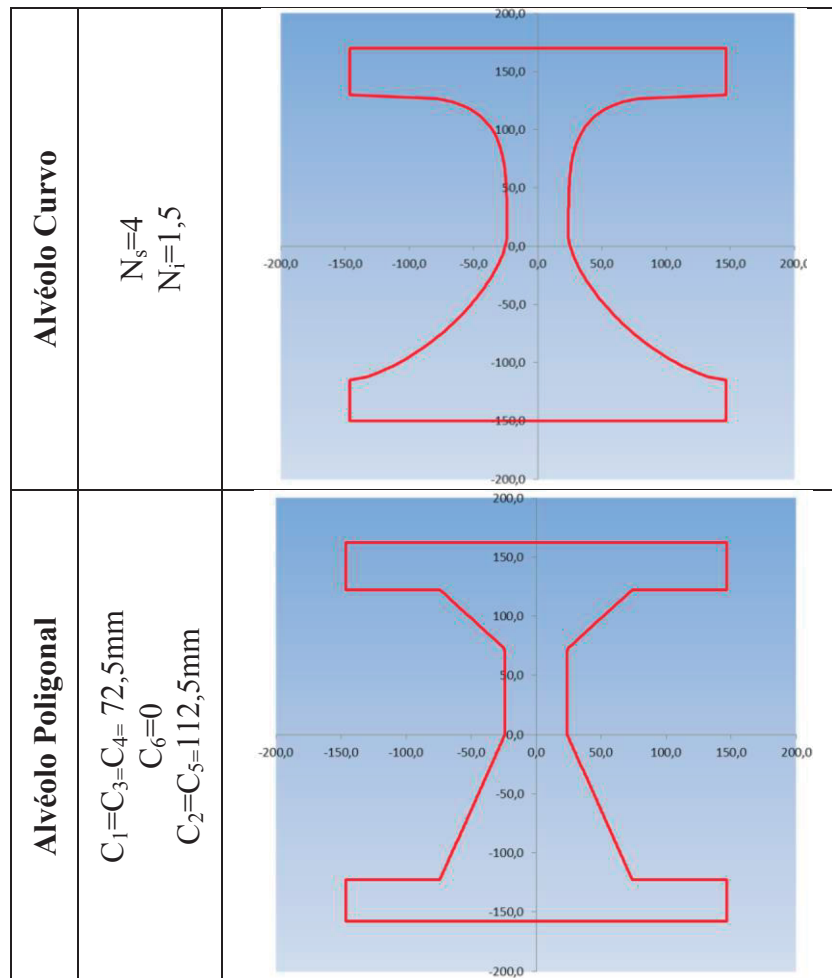
Figura 10: Parâmetros considerados da seção transversal.

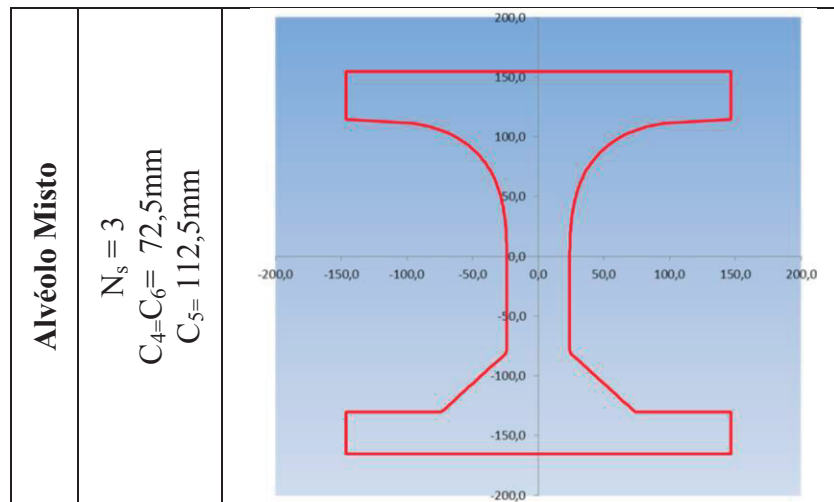


Fonte: O autor

Na Figura 11 apresentada a seguir ilustra-se algumas das possibilidades de formas de alvéolos geradas a partir da rotina de cálculo apresentada anteriormente.

Figura 11: Variações geométricas dos alvéolos





Fonte: O autor

2.3 Modelo analítico normativo

Alguns códigos normativos apresentam duas equações distintas para o cálculo da força cortante resistente, considerando ou não a influência da fissuração. Porém a norma brasileira, ABNT NBR6118:2014 apresenta em seu texto apenas uma expressão que, por sua vez, foi fundamentada em estudos realizados para vigas protendidas retangulares sem armadura transversal, e que consideram a ruptura por cisalhamento em zonas fissuradas. A norma de lajes alveolares, ABNT NBR14861:2011 por sua vez, incorporou à mesma expressão apresentada na NBR6118 um parâmetro α de maneira inadequada, com o objetivo de considerar o efeito do comprimento de transferência que, a princípio, já havia sido contemplado no fator “0,15” da mesma equação. Esta duplicidade reduz significativamente o valor resistente calculado, conforme relatado por FRANÇA (2012). Assim, a título deste trabalho, será desprezado o fator α para o cálculo dos valores apresentados posteriormente. Também será adotado para o valor da resistência a tração do concreto o valor característico inferior ($f_{ctk,inf}$).

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (24)$$

Em que:

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

(25)

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (26)$$

Sendo:

$$\sum b_{w,1} = \sum b_{w,ext} + \sum b_{w,int} \quad (27)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (28)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{(\sum b_{w,1})} \quad (29)$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c} \cdot \alpha \quad (30)$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_{pt2}} \leq 1 \quad (31)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1; \text{ d em metros (m)} \quad (32)$$

Onde:

f_{ctd} : resistência a tração do concreto (minorada por γ_c); $\sum b_{w,1}$: somatório das nervuras internas e externas da seção transversal; A_s : área da armadura longitudinal tracionada; ρ_1 : taxa da armadura longitudinal; $\sigma_{cp,1}$: tensão de compressão no concreto devido à força de protensão; N_p : força de protensão final, depois de todas as perdas; A_c : área da seção transversal de concreto da laje; l_x : distância da extremidade da laje até a seção em análise; l_{pt2} : comprimento de transferência de protensão, fixado em 85 , como valor de cálculo; k : fator escala.

2.4 Verificação do mecanismo de ruptura a cortante

Como já apresentado anteriormente, existem basicamente dois mecanismos distintos de ruptura por cisalhamento para lajes alveolares: *tração diagonal* e *flexo-cortante*. Enquanto o

carregamento solicitante não é capaz de provocar fissuras de flexão na laje, o mecanismo de tração diagonal é determinante na resistência a força cortante, ou seja, conhecendo o valor do momento de fissuração (M_r) da laje na seção crítica em análise, e o momento atuante (M_a) na mesma seção, é possível descobrir qual o mecanismo resistente que representa o elemento analisado. Outro aspecto importante é a verificação da seção na situação em vazio, onde as perdas de protensão ainda não são totais e a peça não se encontra carregada. Neste momento podem surgir fissuras de flexão na fibra superior que poderão definir a seção de ruptura por cisalhamento. Este assunto, porém, será abordado em outro trabalho, assumindo aqui atendido este critério.

Para a situação de laboratório, conforme Figura 5, onde a ordem de grandeza da carga P do atuador é muito superior à carga distribuída de peso próprio, aqui representada pela notação g_1 , o momento atuante do comprimento da peça até a posição $x = a$, pode ser expresso por:

$$M_{at} = P \cdot x \cdot \frac{(L - a)}{2} + g_1 \cdot \frac{(L \cdot x - x^2)}{2} \quad (32)$$

Sendo assim, o modelo da norma brasileira só será representativo quando o momento solicitante supera o momento de fissuração $M_{at} \geq M_r$, o que configura o mecanismo de ruptura provável é o de *flexo-cortante*.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Para avaliar a aplicabilidade do modelo analítico normativo para as lajes analisadas neste trabalho, na Tabela 4, são apresentados os momentos atuantes e resistentes calculados para a seção crítica.

Tabela 4: Valores de cortante resistente calculados (conforme NBR6118) e valores de ensaios laboratoriais

MOMENTO ATUANTE E DE FISSURAÇÃO ($\gamma_c = 1,0$)					
Protótipo	$h_{nominal}$ (mm)	M_a (kN)		M_r (kN)	
		(1)	(2)	(1)	(2)
Protótipo A	265	132,3	138,2	212,6	203,4
Protótipo B	260	156,0	162,9	239,4	244,2

Protótipo A - Alvéolo Circular (LA02-C-A)
(1) Seção transversal de projeto

Protótipo B - Alvéolo Misto (LA05-B)
(2) Seção transversal real

Fonte: O autor

Da Tabela 4, para ambos os protótipos não deve ocorrer fissuração na seção crítica e, portanto, o modelo normativo brasileiro não é adequado na avaliação destes elementos. No entanto, resta saber também se esse modelo fornece valores que atendem os critérios de segurança. Para tanto foram calculadas as cortantes resistentes ($V_{R,cal}$) conforme NBR6118 e comparando os valores calculados com os respectivos valores obtidos nos ensaios ($V_{R,exp}$), para ambos os protótipos considerando ora dados geométricos de projeto, ora valores obtidos em laboratório.

Tabela 5: Valores de cortante resistente calculados (conforme NBR6118) e valores de ensaios laboratoriais

CORTANTE RESISTENTE ($\gamma_c = 1,0$)							
Protótipo	$h_{nominal}$ (mm)	$V_{R,exp}$ (kN)	$V_{R,cal}$ (kN)			$V_{R,exp}/V_{R,cal}$	
			(1)	(2)	Diferença	(1)	(2)
Protótipo A	265	233	163,4	172,2	5,4%	1,43	1,35
Protótipo B	260	244	264,2	259,7	1,7%	0,92	0,94

Protótipo A - Alvéolo Circular (LA02-C-A)
(1) Seção transversal de projeto

Protótipo B - Alvéolo Misto (LA05-B)
(2) Seção transversal real

Fonte: O autor

Na Tabela 5 é possível destacar que o modelo normativo apresenta desempenho satisfatório para o Protótipo A (alvéolos circulares), porém, para o Protótipo B (alvéolos mistos),

a segurança do modelo foi comprometida já que os valores calculados, seja para o perfil de projeto ($V_{R,cal} = 264,2kN$), ou para o perfil real ($V_{R,cal} = 259,7kN$), superam o valor de ensaio ($V_{R,exp} = 244kN$), o que torna o modelo não recomendável para lajes com características semelhantes.

A relação $V_{R,exp}/V_{R,cal}$ calculada para ambos os protótipos permitem afirmar que o desempenho do modelo analítico normativo varia com o tipo de elemento analisado, o que não é desejável para um modelo normativo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Das lajes estudadas neste trabalho, foi possível concluir que o modelo de cálculo preconizado pela normalização brasileira não é o mais adequado para avaliar a capacidade resistente, já que o modo de ruptura por cisalhamento identificado em laboratório foi o de tração diagonal para ambos os elementos ensaiados. Sugere-se para trabalhos futuros a consideração de um modelo específico para o mecanismo resistente de tração diagonal, como já apontado por MARQUESI (2014).

Para a laje com alvéolos mistos, os valores estimados da força cortante foram superestimados em 8,6% para seção de projeto e 6,4% para seção real, o que configura um problema de segurança, porém, devido a pequena quantidade de amostras ensaiadas, é recomendada uma continuidade na investigação a partir do ensaio de uma maior quantidade de elementos a fim de verificar se esta tendência se mantém. Já para a laje com alvéolos circulares, o modelo se mostrou seguro ($V_{R,exp} < V_{R,cal}$). Além disso, não é desejável que um modelo normativo tenha respostas numéricas diferentes considerando lajes com características diferentes, o que foi constatado neste trabalho a partir da relação $V_{R,exp}/V_{R,cal}$ calculada para os dois protótipos, objetos desta pesquisa.

Diferenças no valor da força cortante calculadas a partir do perfil de projeto e do perfil real chegaram a 5,4% para a laje com alvéolos circulares e 1,7% para a laje com alvéolos mistos. Sendo assim, sugere-se também uma maior investigação laboratorial para avaliar a influência do processo de fabricação na capacidade resistente ao cisalhamento.

Por fim, sugere-se para trabalhos posteriores, também, uma investigação mais aprofundada da influência da forma na capacidade resistente a força cortante de lajes alveolares com espessuras iguais ou superiores a 260mm.

DEVELOPMENTS IN THE STUDY OF SHEAR CAPACITY OF PRESTRESSED HOLLOW CORE SLABS

ABSTRACT

This paper deals with the investigation on the structural behaviour of prestressed hollow core slabs, focusing on the shear capacity according to the Brazilian codes of practice NBR6118:2014 and NBR14861:2011. In addition, two slabs 265/260 mm deep, with circular and non-circular voids, respectively, were studied comparing the predicted theoretical shear capacity (without safety factors) with experimental results from slabs recently tested at NETPRE-UFSCar. As a preliminary observation, the experimental results for the slabs with non-circular voids were lower than predicted according to the equations from the codes. Therefore, based the experimental results, the aim of this research is to present an analysis of the results for both slabs with circular and non-circular voids, under high initial prestressing forces, evaluating both the accuracy and consistency of the analytical models applied for slabs with non-circular voids. Considering the analytical models from the Brazilian codes, while the theoretical prediction was higher than the experimental results for slabs with circular voids, the theoretical prediction was just around 92% of the experimental results for the slabs with non-circular voids.

Key-words: *Hollow core slabs, Shear capacity, Tension Shear, Flexural-Shear*

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). **NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). **NBR 9062:2006 Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). **NBR 14861:2011 Lajes alveolares protendidas – Requisitos e procedimentos.**

CATOIA B. **Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Regiões Fissuradas por Flexão.** 325f. Tese – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – **EN 1168:2008. Precast concrete products – Hollow core slabs.**

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

FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE – FIP (1992). **Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab.** London, England.

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

LINDSTRÖM G. **Precast prestressed hollow core floors, FIB Draft Manual,** October; 2007.

MARQUESI M. L.G. **Contribuição ao Estudo dos Mecanismos Resistentes à Força Cortante em Lajes Alveolares Protendidas.** 144f. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.