

## **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**

Sérvio Túlio Teixeira e Silva<sup>(1)</sup>; Daniel de Lima Araújo<sup>(2)</sup>; Cristina de Fátima Mattos Antunes<sup>(3)</sup>

*Escola de Engenharia Civil (UFG), Rua Universitária, nº 1488, Qd 86, Lt Área, Setor Universitário. Goiânia – GO.  
CEP 74605-220. Tel: (62) 3209-6084*

*Palavras-Chave: Pré-moldados de concreto. Lajes alveolares. Cisalhamento*

### **1 Introdução**

As lajes alveolares são elementos pré-fabricados não maciços de concreto que possuem cordoalhas de protensão em todo o seu comprimento e são utilizados para vencer vãos de 5 a 15 metros. Esses elementos possuem vazios longitudinais, os chamados alvéolos, que visam diminuir a quantidade de concreto utilizado em comparação com elementos de laje maciços e, assim, reduzir o peso próprio da estrutura. Esses vazios podem, também, contribuir para facilitar o transporte dessas lajes, ajudar na passagem de conduções elétricas e hidráulicas e, ainda, podem atuar como isolante térmico.

Em geral, e principalmente no Brasil, as lajes alveolares necessitam do acréscimo de uma capa estrutural de concreto feita na própria obra (com cerca de 5 centímetros) que normalmente é reforçada com uma tela de aço eletrossoldada. Feita na parte superior da laje, essa capa de concreto visa garantir o comportamento monolítico do pavimento sujeito às ações horizontais. Ela pode, porém, aumentar a resistência à flexão e a resistência ao cisalhamento da laje caso seja garantida uma boa aderência entre a capa e a laje.

Existem basicamente dois tipos de métodos de fabricação de lajes alveolares protendidas, podendo ocorrer variações de detalhes de acordo com cada indústria de pré-fabricado: o processo por extrusão ou por formas deslizantes.

### **2 Objetivos**

Nesta pesquisa, é proposto o estudo da resistência de lajes alveolares quando submetidos à força cortante. Como objetivos específicos dessa pesquisa, têm-se:

---

*Revisado pelo orientador*

*(1) Aluno PIBIC, graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail:stu\_silva@hotmail.com*

*(2) Orientador, Professor Doutor, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail:dlaraujo@eec.ufg.br*

*(3) Mestranda em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail:eng.crisantunes@gmail.com*

- Avaliar a influência da capa de concreto estrutural e do preenchimento dos alvéolos na resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas por meio de ensaios físicos;
- Caracterizar a superfície de lajes alveolares quanto ao nível de rugosidade;
- Verificar a aplicação de formulações desenvolvidas para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes maciças às lajes alveolares.

### **3 Fundamentação teórica**

Neste item é descrito o ensaio recomendado na literatura para determinação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas, bem como são apresentadas algumas pesquisas correlatas ao assunto deste trabalho. Também são apresentadas as recomendações da literatura técnica acerca do nível de rugosidade em juntas de concreto submetidas a tensões de cisalhamento.

#### **3.1 Ensaio para avaliação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**

São vários os fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas, como, por exemplo, a geometria dos alvéolos. Porém, o fator mais importante é a resistência à tração do concreto, uma vez que esse tipo de laje não possui reforço, como uma armadura transversal, para esse tipo de solicitação.

Devido às particularidades desse tipo de laje, muitas vezes a aplicação das fórmulas existentes em diversas normas para o cálculo da capacidade resistente ao cisalhamento de lajes maciças é questionada. Dessa forma, um ensaio padrão foi desenvolvido para se obter o valor da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares (FIP, 1992).

Sendo "h" a altura do elemento completo de laje, o ensaio prevê a aplicação da força a uma distância de  $2,5h$  de um dos apoios. É recomendável que pelo menos o apoio mais próximo da aplicação da força seja do tipo rolete, capaz de distribuir uniformemente a força ao longo da largura da peça e, também, de evitar o surgimento de forças longitudinais capazes de mover a laje sobre o apoio. É recomendável, também, que seja colocada uma viga de aço entre a laje e a o módulo de aplicação da força vertical (com altura entre 150 a 250 mm) com rigidez apropriada de modo a permitir a transferência uniforme do carregamento por toda largura da laje. Além disso, é necessária a utilização de algum material (pode ser chapa de madeira, neoprene, argamassa ou até

mesmo gesso) para melhorar a distribuição da força entre a viga de aço e a laje, tendo em vista eventual falta de nivelamento entre os dois elementos. O esquema básico desse ensaio é mostrado na Figura 1. Na Figura 2 é mostrado o detalhe do apoio tipo rolete com as dimensões sugeridas pelo Tkalčić et al. (2007).

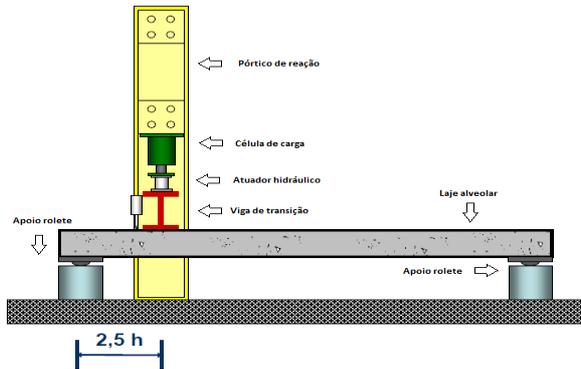


Figura 1– Esquema básico do ensaio padrão em laje alveolar para determinação da sua resistência ao cisalhamento. (CATOIA, 2008)

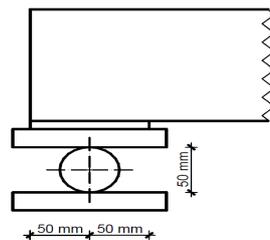


Figura 2 - Detalhe do apoio tipo rolete (TKALČIĆ et al., 2007).

O resultado da resistência ao cisalhamento de laje alveolares obtido por meio desse ensaio pode, então, ser comparado com os valores recomendados pelos equacionamentos analíticos existentes na normatização nacional. Por exemplo, a norma brasileira sobre projeto de estruturas de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2004), recomenda que a resistência ao cisalhamento de lajes maciças de concreto sem armadura para força cortante seja obtida por meio da Eq.(1):

$$V_{Rd1} = [ \tau_{Rd} k (1,2 + 40 \rho_1) + 0,15 \sigma_{cp} ] b_w d \quad \text{Eq.(1)}$$

onde:

$V_{Rd1}$  é resistência de projeto ao cisalhamento;

$d$  é altura útil da laje;

$b_w$  é a largura mínima da seção ao longo da altura útil  $d$ ;

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} = 0,25 \cdot 0,15 \cdot f_{ck}^{2/3};$$

$f_{ctd}$  é a resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento e, de acordo com o item 8.2.5 da NBR 6118 (ABNT,2003), pode ser avaliada por:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 0,7 f_{ct,m} / 1,4 = 0,7 \cdot 0,3 f_{ck}^{2/3} / 1,4 = 0,15 f_{ck}^{2/3} \text{ (em MPa)} \quad \text{Eq.(2)}$$

$\gamma_c = 1,4$  é o coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$f_{ctk,inf}$  é a resistência característica à tração do concreto, valor inferior;

$f_{ct,m}$  é a resistência média à compressão do concreto;

$f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto;

$k = 1$  para elementos em que 50% da armadura inferior não chega até o apoio;

$k = (1,6 - d) \geq 1$ , com  $d$  em metros, para os demais casos;

$$\rho_1 = A_{s1} / (b_w \cdot d) \leq 0,02;$$

$A_{s1}$  é a área da armadura de tração que se estende no mínimo até  $d - \ell_{b,nec}$  além da seção considerada, sendo  $\ell_{b,nec}$  o comprimento de ancoragem necessário definido no item 9.4.2.5 da NBR 6118;

$\sigma_{cp} = N_{Sd} / A_c$  ( $N_{Sd}$  é a força longitudinal na seção causada pela protensão e  $A_c$  é a área de concreto na seção).

A segurança da laje contra a ruptura por cisalhamento é garantida se a força cortante solicitante de cálculo ( $V_{sd}$ ) for menor ou igual à resistência de projeto ao cisalhamento ( $V_{Rd1}$ ).

### 3.2 Pesquisas correlatas

Pesquisas correlatas sobre a análise do comportamento de lajes alveolares protendidas quando submetidas a esforços de cisalhamento podem ser encontradas em Ferreira (2007) e Ferreira (2008). A pesquisa aqui descrita é semelhante a essas pesquisas, havendo diferenças apenas quanto às dimensões das lajes, forma de preenchimento dos alvéolos e processo de fabricação dos elementos de laje alveolar submetidas aos ensaios.

Na pesquisa de Ferreira (2008) foram realizados ensaios em elementos de lajes alveolar, produzidas pelo método da extrusão, com 390 cm de comprimento, largura de 120 cm, altura de 20 cm e capa com espessura de 5 cm, para alguns casos. Os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento foram realizados em diversas lajes produzidas por uma empresa

brasileira de pré-fabricados de concreto da região Sul, nas quais se analisaram as seguintes condições:

- Lajes com e sem a presença de capa estrutural de espessura de 5 cm, para analisar o real valor da contribuição da seção transversal composta à resistência ao cisalhamento criada com a construção da capa estrutural;
- Lajes com dois alvéolos parcialmente preenchidos com concreto, a fim de comprovar a hipótese de que o preenchimento de alguns dos alvéolos aumenta a resistência ao cisalhamento da laje alveolar, processo que tem sido feito nas obras mas sem critérios claros estabelecidos.

Os resultados da pesquisa de Ferreira (2008) mostraram que os valores experimentais obtidos do ensaio foram superiores aos previstos teoricamente, o que validou o emprego da equação recomendada pela FIB (2000) que é a mesma recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2003) e mostrada na Eq. (1). Em âmbito internacional, outras pesquisas sobre lajes alveolares podem ser encontradas em: Bertagnoli (2009); Girhammar, Pajari (2008); Hawkins; Ghosh (2005); Tkalčić et al., (2007).

### 3.3 Rugosidade de juntas de concreto

A definição de uma superfície como rugosa é feita de diferentes maneiras. O PCI (2004) define uma superfície como rugosa quando ela possui profundidades com valores mínimo de 0,6 cm; a NBR 9062 (ABNT, 2006) define profundidades de 0,5 cm a cada 3 cm nas duas direções do plano da interface; a FIP (1998) define diferentes níveis de rugosidade dos quais depende a avaliação da resistência. Estes níveis, em ordem crescente de rugosidade, são:

- Nível 1: superfície bastante lisa, obtida com o uso de fôrmas metálicas ou de madeira plastificada.
- Nível 2: superfície que foi alisada, chegando a níveis bastante próximos aos dos casos do nível 1.
- Nível 3: superfície que foi alisada (trazendo os finos do agregado à superfície), mas que ainda apresenta pequenas ondulações.
- Nível 4: superfície que foi executada com fôrmas deslizantes ou régua vibratória.
- Nível 5: superfície produzida por alguma forma de extrusão.

- Nível 6: superfície que foi deliberadamente texturizada pelo escovamento do concreto ainda fresco.
- Nível 7: como em 6, com maior pronunciamento da texturização (por exemplo, o uso de tela de metal expandido presa à superfície da forma).
- Nível 8: superfície em que o concreto foi perfeitamente vibrado, sem a intenção de se fazer a superfície lisa, ou fazendo que os agregados graúdos fiquem expostos.
- Nível 9: superfície em que o concreto ainda fresco foi jateado (com água ou areia), para expor os agregados graúdos.
- Nível 10: superfície propositadamente rugosa

Os níveis 1 e 2 são de ocorrência esporádica. Os níveis de 3 a 6 são os mais frequentes. Existem níveis que podem ter eficiência semelhante, como, por exemplo, os níveis 7 e 9. Estes níveis de rugosidade são utilizados pela FIP (1998) para avaliação da resistência da interface. Ela divide as superfícies em duas categorias: categoria 1, ou seja, superfícies obtidas naturalmente durante a produção das peças pré-moldadas (níveis de 1 a 6) e categoria 2, ou seja, superfícies onde a rugosidade foi feita deliberadamente (níveis de 7 a 10).

A rugosidade da superfície na interface tem sido considerada como o fator principal para garantir a transferência de esforços de cisalhamento pela junta de concreto. Entretanto, trabalhos experimentais mostraram que o tratamento da interface, envolvendo aspectos como limpeza, grau de compactação do concreto e tipo de cura são tão importantes quanto a consideração da rugosidade superficial. Por esta razão, deve-se dar grande atenção ao tratamento da interface e ao trabalho de concretagem das capas.

## **4 Metodologia**

### **4.1 Concretagem e definição dos modelos de lajes alveolares ensaiadas**

A concretagem das lajes ocorreu pelo método de forma deslizante. Foram produzidas oito lajes de 16 cm de altura, 120 cm de largura e 4 m de comprimento, com a geometria mostrada na Figura 3. Elas foram classificadas, primeiramente, de acordo com a presença ou não de capa estrutural com 5 cm de espessura e, em seguida, pelo preenchimento dos alvéolos, o que resultou na classificação mostrada na Tabela 1. Para cada modelo, foram separadas duas peças (peça A e

peça B), para que assim fossem realizados ensaios em duplicata para um mesmo conjunto de características da laje.

A concretagem parcial dos alvéolos dos modelos 2 e 4, conforme mostrado na Figura 4, ocorreu 12 dias após a concretagem da lajes, enquanto que a concretagem da capa estrutural presente nos modelos 3 e 4 ocorreu 9 dias após o preenchimento dos alvéolos. O preenchimento dos alvéolos se estendeu até 50 cm no sentido longitudinal de cada extremidade da laje.

Foram retirados corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5739 e NBR 7222 (ABNT, 1994) com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para determinação das resistências à compressão e à tração dos concretos utilizados (laje, alvéolos e capa estrutural).

Modelo	Capa estrutural	Alvéolos	Altura final da laje (cm)
1	Não	Sem preenchimento	16
2	Não	Com preenchimento parcial	16
3	Sim	Sem preenchimento	21
4	Sim	Com preenchimento parcial	21

Tabela 1 - Definição dos modelos de lajes alveolares ensaiadas

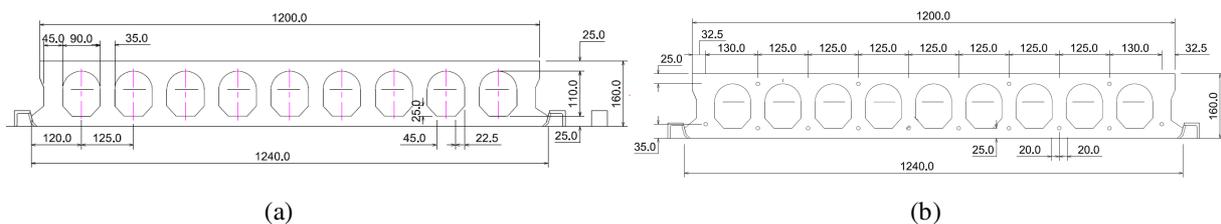


Figura 3 - Dimensões das lajes ensaiadas segundo o fabricante: (a) medidas gerais da seção transversal; (b) detalhe da posição das cordoalhas.

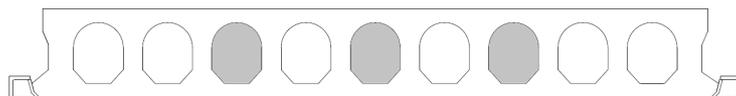


Figura 4 - Dos nove alvéolos das lajes dos modelos 2 e 4, 3 foram preenchidos conforme mostrado nessa figura (alvéolos em cinza).

#### 4.2 Determinação da rugosidade das lajes alveolares

Para a determinação da rugosidade da superfície superior da laje alveolar foi desenvolvido um ensaio padrão. Esse ensaio foi reproduzido na laje 1A, que era uma peça sem capa estrutural e sem preenchimento dos alvéolos.

Primeiramente, a 1,5 m no sentido longitudinal de cada extremidade da laje ensaiada foi demarcada uma malha de 1 m por 1 m (Figura 5a) contendo pontos espaçados a cada 3,3 cm,

resultando em um total de 31 linhas e 31 colunas. Após a demarcação da malha e utilizando um rugosímetro (equipamento munido de um relógio comparador digital com precisão de 0,01 mm, mostrado na Figura 5b), foi determinada a altura relativa entre pontos consecutivos da malha, o que representa a rugosidade da superfície.

A rugosidade foi determinada em 11 linhas, com 31 pontos cada uma, na direção transversal da laje. Dessa forma, cada uma dessas linhas era espaçada entre si de 9,9 cm. Na direção longitudinal foram adotadas outras 3 linhas, com 31 pontos cada uma, espaçadas entre si de 50 cm. Devido à diferença de dimensões entre a área analisada e o rugosímetro (que possuía 20 cm de comprimento útil), em cada posição do rugosímetro era possível realizar a leitura de apenas seis pontos. Foram, então, tomados cuidados na movimentação do rugosímetro ao longo das linhas da malha. A cada nova posição do aparelho, foi necessário nivelá-lo e, em seguida, determinar a altura do ponto de referência, tomado como o último ponto lido na linha em análise.



Figura 5- (a) Malha de pontos de 1m<sup>2</sup> na superfície rugosa da laje 1A; (b) detalhe do rugosímetro.

#### 4.3 Determinação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas

O ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento das lajes do modelo 1 foi realizado 28 dias após a concretagem das lajes. Já as lajes do modelo 2 foram ensaiadas 28 dias depois da concretagem dos alvéolos, enquanto as lajes dos modelos 3 e 4 foram ensaiadas 28 dias após a concretagem da capa estrutural.

Tendo em vista a recomendação do ensaio padrão descrito no item 3.1, nas lajes com 16 cm de altura a força foi aplicada a 40 cm do apoio (modelos 1 e 2). Já nas lajes com capa estrutural de 5 cm de espessura (modelos 3 e 4), a força foi aplicada a 50 cm do apoio. Foram

utilizados dois apoios do tipo rolete, sendo que após o ensaio da laje piloto, o apoio mais distante do ponto de aplicação da força foi fixado, restringindo a movimentação da laje no sentido horizontal.

Foi utilizada, ainda, uma viga de transição de aço com 15 cm de altura fixada à laje por meio de gesso para nivelá-la e, assim, garantir a distribuição da força por toda a largura da laje alveolar. A força foi aplicada por meio de um conjunto formado por atuador hidráulico e célula de carga, ambas com capacidade de 500 kN, o qual reagia em um pórtico de reação montado no pátio da fábrica (Figura 6). A força foi aplicada em incrementos de 10 kN até a ruptura da laje por cisalhamento, sendo o seu valor continuamente registrado por meio de um sistema de aquisição de dados.

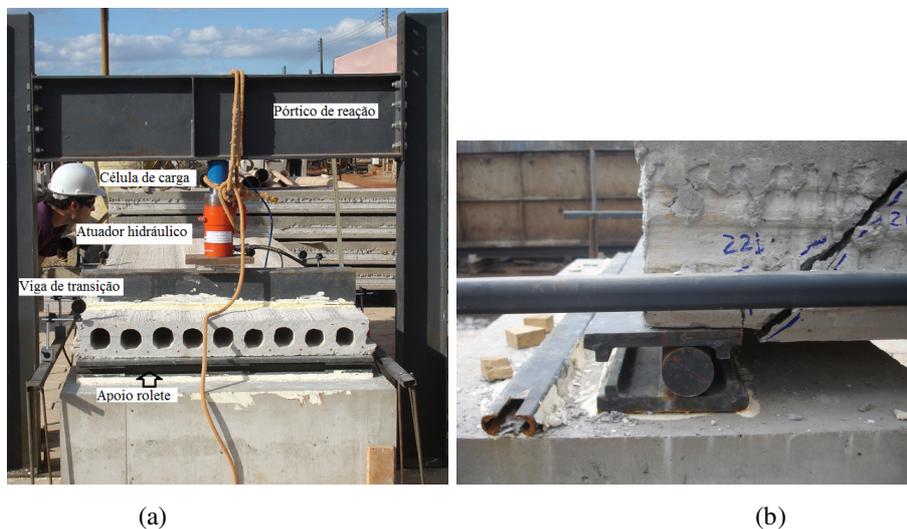


Figura 6 - (a) Esquema do ensaio para avaliação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas; (b) detalhe do apoio e de uma ruptura típica por cisalhamento.

## 5 Resultados e discussões

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios das lajes alveolares.

### 5.1 Rugosidade da laje alveolar

A partir do ensaio de rugosidade, foram traçados onze perfis transversais e três perfis longitudinais da superfície superior, rugosa, da laje alveolar. Um perfil típico na direção

transversal da laje é mostrado na Figura 7a, enquanto um perfil típico na direção longitudinal da laje é mostrado na Figura 7b.

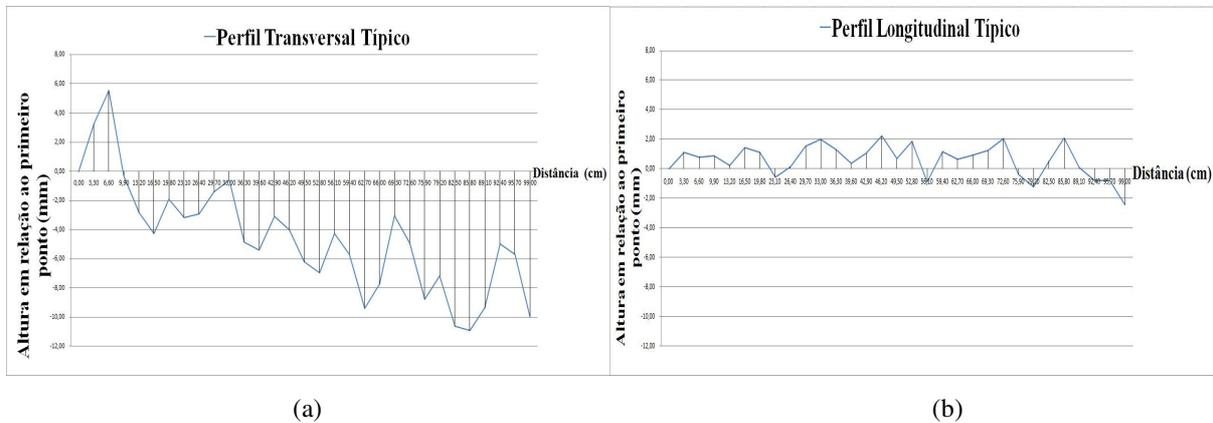


Figura 7- Perfil típico da superfície superior da laje alveolar: (a) direção transversal; (b) direção longitudinal.

A partir do perfil da superfície da laje, a rugosidade foi determinada pela diferença de altura entre pontos consecutivos. A rugosidade média de cada linha foi, então, determinada pela média aritmética das rugosidades assim determinadas. A rugosidade média de cada linha, nas direções transversais e longitudinais, é mostrada na Figura 8. As rugosidades na direção transversal variam entre 2,12 mm e 2,59 mm, com média de 2,10 mm. Já as rugosidades na direção longitudinal variam entre 0,33 mm e 1,06 mm, com média de 0,57 mm.

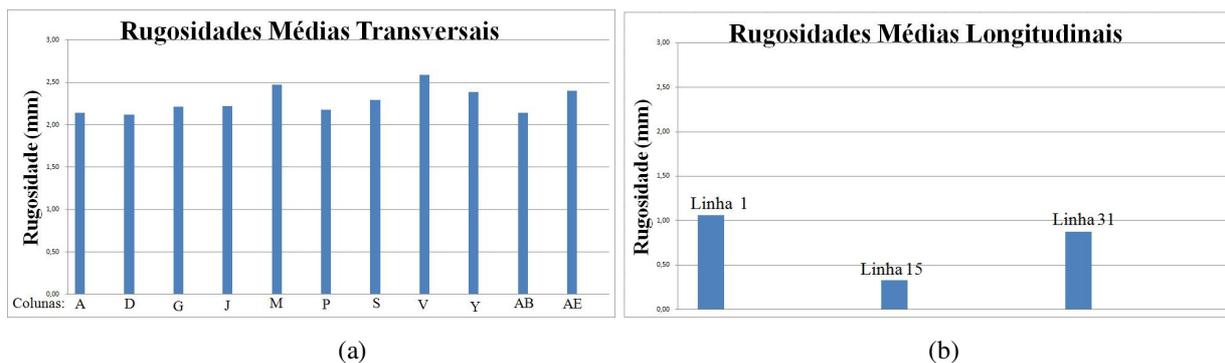


Figura 8 - (a) Rugosidade média na direção transversal; (b) Rugosidade média na direção longitudinal.

Com esses valores de rugosidade, a superfície superior da laje pode ser classificada como sendo da categoria 1 de acordo com a FIP (1998), ou seja, superfícies rugosas obtidas naturalmente durante a produção das peças pré-moldadas (nível 6). Quanto à classificação

segundo a NBR 9062 (ABNT, 2006), a superfície superior da laje alveolar apresenta uma superfície não rugosa, já que apresenta rugosidade inferior a 5 mm a cada 3 cm nas duas direções, sobretudo na direção longitudinal.

A análise dos perfis típicos mostra que na direção transversal a laje possui uma rugosidade muito maior que na direção longitudinal, chegando a diferenças maiores que 300%. Assim sendo, a escova de aço que desliza na direção longitudinal da laje no momento da produção, como mostrado na Figura 9, provoca rugosidade maior na direção transversal da laje.

No caso de lajes alveolares com capa estrutural, a rugosidade na direção longitudinal da laje tem maior influência que a rugosidade transversal na aderência do concreto da capa ao concreto da laje. Essa observação é importante quando se considera que pode haver o descolamento, ou seja, a perda de aderência da capa estrutural com a superfície da laje alveolar quando a mesma é solicitada, resultando em perda de resistência ao cisalhamento, como observado por Girhammar, Pajari (2008).



Figura 9 - Detalhe da escova de aço que é arrastada na superfície da laje no momento de sua produção. A imagem mostra claramente a rugosidade antes e depois da passagem da escova.

## 5.2 Resistência ao cisalhamento das lajes alveolares protendidas

A resistência ao cisalhamento das lajes ensaiadas, e já considerando o peso próprio da laje ( $V_{exp}$ ), é mostrada na Tabela 2. Na Tabela 3 são mostradas as propriedades mecânicas do concreto ( $f_{cm}$  é a resistência média à compressão e  $f_{ctm}$  é a resistência média à tração por compressão diametral).

Laje	$b_w$ (mm)	$d$ (mm)	$V_{Rd1}$ (KN)	$V_{exp}$ (KN)	$V_{Rd1} / V_{exp}$
1A	406,39	126,89	132,349	154,592	0,86
1B	403,95	127,31	131,968	159,263	0,83
2A	672,73	129,08	220,912	118,043	1,87
2B	671,88	135,20	230,432	138,320	1,67
3A	387,51	195,12	187,840	143,828	1,31
3B	406,93	186,74	189,384	154,945	1,22
4A	673,05	191,42	318,779	175,220	1,82
4B	665,92	183,57	303,524	208,061	1,46

Tabela 2 - Resistência ao cisalhamento das lajes ensaiadas.

Elemento	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)
Laje alveolar	42,3	3,16
Capa estrutural	49,2	4,06
Alvéolos	46,6	3,75

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do concreto.

Na Tabela 2 também é apresentada a resistência teórica ao cisalhamento da laje ( $V_{Rd1}$ ) avaliada pela Eq. (1). Para a aplicação dessa equação às lajes ensaiadas, foram necessárias algumas considerações. Por exemplo, os fatores  $\tau_{Rd}$ ,  $A_{s1}$  e  $\sigma_{cp}$  são constantes para todos os modelos ensaiados, uma vez que a variação desses fatores na produção é pequena. A tensão  $\tau_{Rd}$  foi calculada considerando apenas a resistência à tração da laje alveolar mostrada na Tabela 3, resultando no valor de  $0,56 \text{ N/mm}^2$ .

Todas as lajes foram reforçadas com 10 cordoalhas de 9,5 mm de diâmetro como armadura de tração ( $A_s = 5,55 \text{ mm}^2$ ), logo  $A_{s1} = 55,5 \text{ mm}^2$ . Já a tensão de compressão no concreto pode ser avaliada por meio de informações fornecidas pelo fabricante das cordoalhas. Segundo esse fabricante, à cordoalha de 9,5 mm de diâmetro pode se aplicada uma força máxima de tração de 74,4 kN, já considerando as perdas iniciais de protensão. Já para a cordoalha superior, de 3,0 mm de diâmetro, a força máxima de tração que pode ser aplicada é de 29,2 kN. Tomando esses valores como sendo a força efetiva em cada cordoalha no momento do ensaio e admitindo que a resultante da força de protensão se dê no centro de gravidade da seção transversal, chega-se à tensão  $\sigma_{cp} = 7,47 \text{ N/mm}^2$ . Para o cálculo dessa tensão, foi utilizada a área da seção transversal da laje informada pelo fabricante.

Para o emprego da Eq.(1), é necessário, ainda, o conhecimento da largura ( $b_w$ ) e da altura da laje ( $d$ ). No caso das lajes alveolares, o valor de  $b_w$  foi tomado como sendo a somatória da

largura das nervuras entre alvéolos. Esses valores variam de acordo com a laje ensaiada e foram determinados diretamente por medições nas lajes, sendo os valores obtidos mostrados na Tabela 2. De posse desses valores, é possível obter a resistência teórica das lajes mostrada na Tabela 2.

Uma análise dos resultados experimentais, em comparação com os resultados do modelo 1, revela conclusões importantes. A resistência ao cisalhamento do modelo 2, com alvéolos preenchidos, caiu 18% e, uma vez que não houve descolamento dos alvéolos em relação à laje, conclui-se que o preenchimento parcial dos alvéolos não contribuiu para a resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento do modelo 3 é muito próxima aos valores obtidos para o modelo 1, logo percebe-se que a capa não aumentou a resistência ao cisalhamento da laje. Esse fato, para o modelo 3, é explicado devido ao descolamento da capa na região entre o apoio e o ponto de aplicação da força. Por último, sabendo que nos ensaios do modelo 4 não houve o descolamento da capa nem dos alvéolos e com base no fato de que o alvéolo não contribuiu positivamente para a resistência ao cisalhamento, conclui-se que a capa proporcionou um aumento de pelo menos 22% na resistência ao cisalhamento das lajes alveolares do modelo 4 em relação ao modelo 1.

A última coluna da Tabela 2 mostra valores da razão  $V_{Rd1} / V_{exp}$  para os diferentes modelos ensaiados. Para as lajes do modelo 1, essa razão é menor que a unidade, sendo  $V_{exp}$  16% maior que  $V_{Rd1}$ . Logo, a Eq. (1) garantiria a segurança das lajes alveolares desse modelo contra a ruptura por cisalhamento de forma satisfatória. Para as lajes do modelo 2, o preenchimento dos alvéolos traz um aumento no valor de  $b_w$  e, conseqüentemente, um aumento no valor de  $V_{Rd1}$ . Porém, o preenchimento dos alvéolos não proporcionou aumento da resistência ao cisalhamento da laje, não validando a Eq. (1), uma vez que  $V_{Rd1} > V_{exp}$ . Uma análise semelhante pode ser feita para as lajes do modelo 3, uma vez que a capa traz um aumento na altura da laje alveolar e, conseqüentemente, um aumento no valor de  $V_{Rd1}$ . No entanto, devido ao descolamento da capa nessa laje,  $V_{Rd1} > V_{exp}$ , não validando o uso da Eq. (1) para lajes do modelo 3. Por último, sabendo que nos ensaios do modelo 4 não houve o descolamento da capa nem dos alvéolos e com base no fato de que o preenchimento parcial dos alvéolos não contribuiu para aumentar a resistência ao cisalhamento, comparando os valores de  $V_{exp}$  das lajes do modelo 4 com os valores de  $V_{Rd1}$  das lajes do modelo 3, a Eq. (1) torna-se aplicável para lajes com capa, desde que seja garantido o não descolamento da capa em relação à laje.

## 6 Conclusões

Os resultados obtidos validaram de forma satisfatória o uso da equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2003), originalmente desenvolvida para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes maciças de concreto sem armadura transversal, para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas sem a presença de capa estrutural e sem o preenchimento dos alvéolos.

Quanto às lajes alveolares com preenchimento parcial dos alvéolos, a mesma equação, proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2003), não avaliou de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento da laje. Já para as lajes alveolares com a presença de capa estrutural, o uso dessa equação proposta para lajes maciças de concreto sem armadura transversal descreveu de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares, desde que seja garantida uma boa aderência entre a capa estrutural e a superfície superior da laje alveolar, resultando no não descolamento da capa.

Do ensaio de rugosidade, constatou-se que a superfície superior da laje alveolar não pode ser considerada uma superfície rugosa de acordo com os padrões da NBR 9062 (ABNT, 2006) e que possui rugosidades maiores no sentido transversal que longitudinal. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento da interface entre a laje alveolar e a capa de concreto deve ser avaliada pelos procedimentos recomendados para superfícies lisas, o que de fato afetou a resistência ao cisalhamento da laje alveolar.

## 7 Agradecimentos

Agradecemos a todos os colaboradores da empresa Mold – Estruturas Pré-fabricadas pela disponibilidade, atenção e apoio para a realização dos ensaios dessa pesquisa. Agradecemos, também, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG, que por meio da chamada pública 02/2009 financiou parte dessa pesquisa. Finalmente, agradecemos ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

## 8 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 - **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 5739 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 7222 - **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

BERTAGNOLI, G.; MANCINI, G.. Tests Failure analysis of hollow-core slabs tested in shear. **Structural Concrete**. Vol. 10, N° 3, p. 139-152, 2009.

CATOIA, B.; FERREIRA, M. A.; CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M.; **Cálculo da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares protendidas**. In: Congresso Brasileiro do Concreto (CBC), 52°, 2010, Fortaleza, Brasil.

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

FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAÎTE. **FIP Guide to good practice: composite floor structures**. Seto, 1998.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BETON. **FIB (CEB-FIB) Guide to good practice: special design considerations for precast prestressed hollow core floors**. Lausanne, 2000.

FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZIN, A.. Avaliação de desempenho da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido. **Revista concreto & Construções**. São Paulo, N° 48, p. 41-46, 2007.

FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZIN, A.; COSTA, O. O.; FILHO, F. M. A.. Avaliação teórico-experimental da capacidade resistente ao cisalhamento e a flexão em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido. **Revista concreto & Construções**. São Paulo, N° 50, p. 104-115, 2007.

FERREIRA, M. A.; FERNANDES, N. S.; CARVALHO, R. C.; ORTENZIN, A.; COSTA, O. O.; FILHO, F. M. A.; DONIAK, I. L. O.. **Resistência ao cisalhamento em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas: avaliação de desempenho segundo a EN:1168:2005**. In: Congresso Nacional da Prefabricação em betão (ANIPB), 2°, 2008, Lisboa, Portugal.

GIRHAMMAR, U.A.; PAJARI, M.. Tests and analysis on shear of composite slabs of hollow core units and concrete topping. **Construction and Building Materials**. Vol. 22, N° 8, p. 1708-1722, 2008.

HAWKINS, N. M.; GHOSH, S. K.. Shear strength of hollow-core slabs. **PCI Journal**. Vol. 51, N° 1, p. 110-114, 2006.

PRESTRESSED/ PRECAST CONCRETE INSTITUTE. **PCI design handbook: Precast and Prestressed concrete**. 6<sup>th</sup> Edition. Chicago, USA, 2004.

RETTNE, L.; EDEKLING, K.. **Improved design method for web shear tension failure in hollow core units**. 153f. Master's Thesis - Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.

TKALČIĆ, D.; BANIĆ D.; ZUPČIĆ M.; PERIĆ, Z.. **Prestressed hollow core slabs -shear resistance test according to HRN EN 1168:2005**. In: FIB SYMPOSIUM, 2007, Dubrovnik, Croacia.