

## **O USO DE SISTEMAS DE LAJES COM VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS NA CONSTRUÇÃO DE RESIDÊNCIAS DE BAIXO CUSTO**

**Jasson Rodrigues Figueiredo Filho (1); Roberto Chust Carvalho (2)**  
**Sydney Furlan Junior (3)**

**(1)** Universidade Federal de São Carlos [jassonf@power.ufscar.br](mailto:jassonf@power.ufscar.br)

**(2)** Universidade Federal de São Carlos [chust@power.ufscar.br](mailto:chust@power.ufscar.br)

**(3)** Universidade Federal de São Carlos [sydney@power.ufscar.br](mailto:sydney@power.ufscar.br)

### **RESUMO**

O grande déficit habitacional do país aliado a uma grande parcela da população com baixa renda estimula a procura de sistemas construtivos simples com tecnologia conhecida, de baixo custo e com boa eficiência para edificações residenciais. As lajes executadas com vigotas pré-moldadas encaixam-se nestas condições.

Esse sistema construtivo agrega as vantagens dos sistemas pré-moldados (industrialização, melhoria da qualidade do produto, dispensa do uso de formas no local da obra, uso de pouco escoramento) com a dos sistemas moldados no local (disponíveis em qualquer região do país, necessitam pouco ou nenhum equipamento, montagem e concretagem não exige mão-de-obra especializada).

Apesar de ser bastante utilizado, ainda carece de fundamentos teóricos e experimentais para que seu potencial seja melhor aproveitado, diminuindo ou mesmo eliminando os erros de projeto e execução, de modo a aumentar sua vida útil com segurança.

A partir dessas considerações, o objetivo deste trabalho é mostrar os avanços que foram e estão sendo feitos (alguns já disponíveis para consulta) a respeito do comportamento e do modo correto de projetar e executar as lajes com vigotas pré-moldadas, desenvolvidos por um grupo de professores da UFSCar.

Palavras-chave: lajes pré-moldadas, concreto armado, construções, residências, pavimentos

## 1. INTRODUÇÃO

Para se projetar uma estrutura composta de lajes, vigas e pilares é necessário, inicialmente, definir o tipo de pavimento ou de forro que será usado para determinar as cargas e, a partir delas, calcular e detalhar as lajes, as vigas e, finalmente, os pilares. No caso de edificações mais simples, as lajes dos pavimentos podem ser também simples, desde que sejam econômicas, seguras, de simples execução e que se comportem adequadamente. Nesses projetos têm sido empregados cada vez mais os sistemas de lajes com vigotas pré-moldadas, compostas geralmente de trilhos e treliças.

As lajes com nervuras pré-moldadas são formadas por elementos pré-moldados (trilho ou treliça), por elementos de enchimento (normalmente lajotas cerâmicas) e por uma “capa de concreto” moldada no local (figuras 1a e 1b). A armadura do trilho é composta de barras retas colocadas na parte inferior do mesmo. O elemento tipo treliça é composto de uma sapata de concreto e uma treliça espacial de aço, composta por três banzos paralelos e diagonais laterais de forma senoidal (figura 1c).

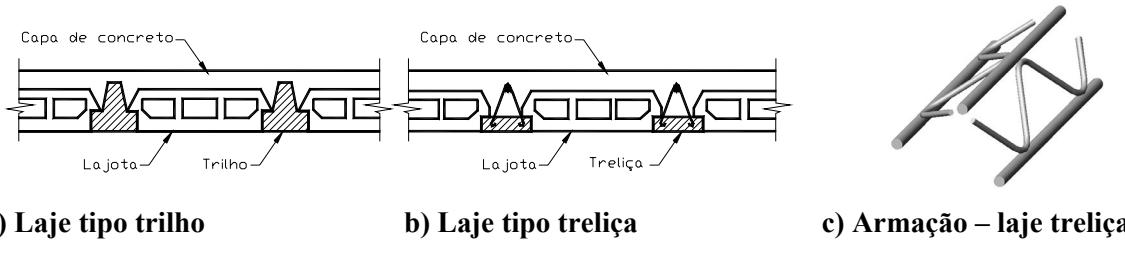


FIGURA 1. Seções transversais de lajes pré-moldadas e amadura da laje tipo treliça

O desempenho do sistema de lajes com nervuras pré-moldadas é compatível com as necessidades estruturais e funcionais de uma laje, com qualidade e racionalidade de execução, o que garante produtividade e redução de custos, e é um sistema leve, econômico, rápido e limpo. Os elementos pré-moldados, nas fases de montagem e concretagem, são os elementos resistentes do sistema, e têm capacidade de suportar, além do seu peso próprio, a ação das lajotas, a do concreto da capa e de uma pequena carga accidental.

Em comparação com os sistemas de lajes maciças e lajes nervuradas, as pré-moldadas apresentam, para edificações de pequeno porte, diversas vantagens, tais como possibilitar uma ampla gama de aplicações, proporcionar grande agilidade na construção, facilitar a colocação de instalações prediais, necessitar de pouco escoramento, eliminar as fôrmas de lajes, apresentar pequena perda de materiais, pequeno consumo de concreto, aço e mão-de-obra; essas características acarretam evidente redução no custo da estrutura, e consequentemente no de toda a construção.

O modelo para o cálculo dessas lajes pode ser admitido como o de um conjunto de “viga” paralelas que trabalham quase independentes, podendo ser adotada seção transversal em forma de T (figura 2).

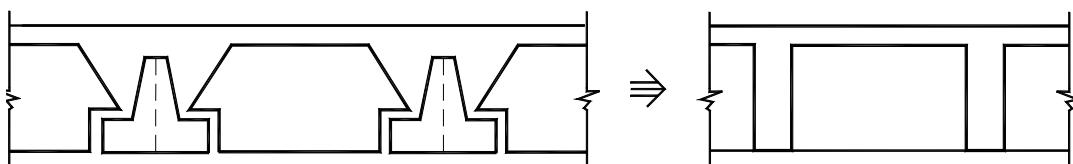


FIGURA 2. Esquema da seção transversal da laje e o respectivo modelo adotado

Na sequência são apresentados, resumidamente, resultados referentes aos seguintes aspectos:

- procedimentos para a fabricação dos elementos pré-moldados;
- distribuição das ações no pavimento nas vigas do contorno;
- lajes considerando a continuidade das nervuras;
- análise experimental do espaçamento entre escoras;
- escolha da armadura e altura das lajes;
- deformações ao longo do tempo (deformações diferidas).

## 2. PROCEDIMENTOS PARA FABRICAÇÃO DOS ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS

A fabricação das nervuras pré-moldadas pode ser feita no canteiro da obra ou em pequenas instalações, utilizando-se principalmente de fôrmas metálicas, betoneira, máquina para estirar fios, serra de disco de corte para aço, sistema de vibração. Estão relacionadas, resumidamente, as etapas gerais de fabricação das nervuras pré-moldadas. Mostra-se, na figura 3, duas vistas de uma fábrica de nervuras pré-moldadas.



**FIGURA 3. Instalações de uma fábrica de nervuras pré-moldadas**

As fôrmas das nervuras são fabricadas com chapas de aço laminado com espessura de aproximadamente 3,2 mm. Um conjunto de fôrmas constitui um leito, que pode chegar até a 1,50 m de largura e montado sobre uma base firme. As chapas de aço proporcionam precisão nas formas e dimensões, facilidade de manuseio, resistência adequada, inexistência de juntas, durabilidade e possibilidade de obtenção de várias peças ao longo do comprimento da fôrma.

As nervuras do tipo trilho são concretadas de maneira invertida, para a colocação da armadura superior (necessária quando há escoramento) que é fixada em um elemento de alumínio parafusado no fundo da fôrma. Esse elemento de alumínio ajuda na colocação de armadura transversal quando necessária, porém diminui a resistência da nervura.

As fôrmas devem ser limpas a cada ciclo de fabricação, utilizando-se uma espátula de metal. Para facilitar a desforma, após a limpeza aplica-se um desmoldante. O concreto deve ser preparado de acordo com as especificações do projeto, usualmente com cimento de alta resistência inicial, possuir apenas agregados miúdos (microconcreto, com areia e brita zero) e ter  $f_{ck} \geq 20$  MPa.

O concreto é lançado sobre as fôrmas e espalhado uniformemente através de sarrafos de madeira ou réguas de chapa. Nas cabeceiras das fôrmas devem ser colocados calços de madeira ou chapas, para impedir que o concreto vaze durante a concretagem. O adensamento dos trilhos é feito normalmente em mesa vibratória. No caso das nervuras treliçadas, a concretagem é feita sem vibração.

O aço adicional, quando previsto, é colocado junto com a treliça, na parte inferior dos elementos, para aumentar a armadura positiva da nervura. Pode ser do tipo CA-50 (barras retas) ou CA-60 (bobinado), de acordo com a especificação de cálculo; este último deve ser retificado em equipamento apropriado.

Após o lançamento do concreto é introduzida a treliça, colocada de modo que a ferragem positiva fique totalmente envolvida pelo concreto, distante aproximadamente 1,5 cm da face inferior da fôrma, através do uso de espaçadores de argamassa; se houver adicionais, eles devem ficar posicionados internamente à treliça. Em uma mesma fôrma as nervuras são separadas por espaçadores, os quais são colocados no interior das fôrmas, a uma distância igual ao comprimento desejado dos elementos.

Após a concretagem, as fôrmas são levadas para a cura (individualmente ou em bateria). O procedimento de cura deve ser iniciado imediatamente, preferencialmente borrifando a peça com água durante 24 ou 36 horas, após o que é iniciado o procedimento de desforma. A desforma inicia-se pelas primeiras vigas fabricadas no dia anterior, que são empilhadas colocando-se ripas transversalmente às mesmas, a cada 2,50 m, formando camadas de ripas e vigas alternadamente.

## 3. DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES NO PAVIMENTO NAS VIGAS DO CONTORNO

Em virtude do seu processo construtivo, as lajes pré-moldadas, em seus sistemas mais simples, têm como característica a disposição da vigotas segundo uma só direção, geralmente a do menor vão, e simplesmente apoiados nos extremos. Dessa forma, as vigas em que esses elementos se apoiam é que recebem a maior parte da carga. Podem, assim, ser consideradas lajes armadas em uma direção, o que

se configura numa desvantagem, pois é usual admitir-se que a ação das lajes ocorre só nessas vigas.

Um dos estudos realizados pelo grupo de São Carlos teve por objetivo verificar se a capa de concreto não confere rigidez, mesmo que pequena, ao pavimento na outra direção, propiciando que também as vigas laterais recebam uma parcela da carga proveniente da laje, e qual o valor estimado dessa parcela. Não se pretende estabelecer números definitivos a respeito, mas apontar tendências que, com uma análise experimental adequada, poderão se transformar em indicações precisas.

No estudo foram calculados diversos pavimentos e diversas situações de lajes com nervuras pré-moldadas, bem como alguns de lajes maciças para comparações. Variou-se a relação entre os vãos dos painéis de lajes, a espessura da capa em relação à altura das nervuras, considerou-se a deslocabilidade das vigas de apoio e também a fissuração da capa, das vigas do contorno e da alma. As principais características dos pisos analisados estão descritas em **FIGUEIREDO FILHO et alii (2000)**.

O estudo se deu através da análise e comparação entre os resultados dos pavimentos de lajes com nervuras pré-moldadas (nervuras e capa de concreto), e também através da análise e comparação, para algumas situações, com os resultados obtidos dos pavimentos com elementos isolados (as nervuras não têm ligação transversal) e pavimentos de lajes maciças. O cálculo dos esforços e deslocamentos foi feito pelo processo de grelha equivalente.

A avaliação dos efeitos da fissuração da alma e da capa, que resulta na diminuição da inércia das seções, foi feita pela análise isolada dos elementos, utilizando as expressões empíricas de **BRANSON (1968)** que fornecem valores de inércia médios para todo o elemento. As principais conclusões do estudo são:

- A geometria da laje influí de forma significativa na trajetória das cargas. Quanto mais próxima da forma quadrada, maior a parcela de forças absorvida pela viga paralela aos trilhos. Quando a relação entre as dimensões dos lados do painel passa de 1 para 2, independente da fissuração, a parcela da carga nas vigas paralelas às nervuras cai aproximadamente 50%.
- Quanto maior a espessura da capa em relação à espessura da laje maior o efeito da distribuição das cargas, com variação bastante significativa, principalmente nos pavimentos de vãos da mesma ordem de grandeza (capa de espessura menor tem influência também menor).
- Quando não se considera a fissuração do concreto, os resultados mostram que nos pavimentos quadrados, quanto maiores os vãos pior a distribuição do carregamento entre as vigas (ao se passar de um painel de  $4,0m \times 4,0m$  para um de  $6,0m \times 6,0m$ , a porcentagem da carga absorvida pelas vigas paralelas passou de 37,09% para 27,85% do carregamento total).
- Com a fissuração do concreto, a parcela do carregamento que é absorvida pelas vigas paralelas é menor que em relação aos pavimentos não fissurados, chegando em alguns casos a uma diminuição de aproximadamente 70%.
- O efeito da deslocabilidade das vigas de apoio tem influência pequena, mas não desprezível; a parcela do carregamento total que vai para as vigas paralelas às nervuras pré-moldadas é maior quando há a deformação das vigas (as maiores diferenças notadas estão em torno de 10%).

Embora algumas situações ainda mereçam um estudo mais detalhado e até uma análise experimental, pode-se afirmar que a simplificação decorrente da consideração da laje pré-moldada como um conjunto de vigas isoladas pode levar a resultados contra a segurança no que se refere à distribuição do carregamento na laje para as vigas do pavimento. Em função dos diversos valores obtidos para todos os casos estudados, recomenda-se que em torno de 25% da carga total seja transmitida a essas vigas, mantendo-se, por segurança, o total da carga nas outras vigas. Os valores recomendados são limites, o que pode resultar em vigas superdimensionadas para particulares situações.

#### 4. LAJES CONSIDERANDO A CONTINUIDADE DAS NERVURAS

A seção transversal da lajes com nervuras pré-moldadas, que tem a forma de **T**, resiste melhor aos momentos positivos que aos negativos, pois a região comprimida de concreto junto à face inferior da laje, constituída apenas pela nervura (região comprimida para momento negativo) é bem menor que a região junto à face superior, constituída pela mesa (região comprimida para momentos positivos).

Assim, em lajes contínuas, nem sempre é possível obter junto aos apoios intermediários o momento

negativo total encontrado pelo cálculo elástico, pois há a plastificação do concreto. Por este motivo, tem sido usual admitir que os elementos pré-moldados sejam sempre simplesmente apoiados, o que resulta em momentos positivos maiores que em elementos contínuos; para uma mesma solicitação, isso resulta em seções maiores ou em limitação do vão a ser vencido.

Por essa razão, considerando a continuidade, há uma melhor distribuição de momentos, com a redução dos positivos, possibilitando vencer vãos maiores. Assim, em pavimentos compostos de diversos painéis, se possível os trilhos devem ser dispostos numa mesma direção, com o esquema estático das nervuras aproximando-se ao de uma viga contínua hiperestática.

Entretanto, qual o momento negativo a considerar e qual a consequência disso? Obter essa resposta não é simples, pois a hipótese de comportamento linear é imprecisa e não corresponde à situação real. Caso, mesmo assim, se decida dimensionar o pavimento para os valores do momento negativo obtidos do cálculo linear (sempre maiores que o momento positivo nas vigas contínuas hiperestáticas), este procedimento será antieconômico, ou até impossível, ou ainda, levar a valores de momentos positivos menores que os realmente atuantes. Isso pode causar a ruptura dos elementos, conforme demonstram resultados experimentais realizados por **CALAVERA et alii (1988)**.

Analisou-se então o comportamento dos elementos hiperestáticos, com a consideração da plastificação do concreto na região dos momentos negativos e seus efeitos no dimensionamento do pavimento **FURLAN JUNIOR et alii (2000)**. No estudo submeteu-se as seções dos apoios internos a momentos de plastificação, obtidos experimentalmente ou sendo uma parcela do seu momento resistente.

Inicialmente desprezou-se o comportamento de placa do pavimento e a distribuição transversal dos esforços (cada nervura foi admitida independente das demais, como uma viga contínua isolada). Em seguida o efeito de distribuição dos esforços proporcionado pela capa de concreto foi considerado.

Foram assim selecionados alguns casos de pavimentos com vãos e carregamentos variados. No caso das nervuras isoladas, o cálculo dos esforços foi feito linear e manualmente, considerando-as bi-apoiadas. Os resultados foram comparados com o esforço máximo que a seção nervurada resiste.

A maior parte das situações demonstrou a importância da continuidade para que o pavimento resistisse ao carregamento na seção de momento fletor positivo (existindo momento negativo, o positivo decresce). No entanto o momento fletor máximo negativo solicitante obtido segundo o cálculo linear da estrutura hiperestática foi maior do que o resistido pela seção nesta região (parte inferior da alma).

Uma solução pode ser a adoção de seção maciça de concreto na região onde a seção nervurada não resiste ao momento negativo. Outra possibilidade é considerar que o esforço solicitante no apoio diminua até um valor correspondente à resistência da seção nesse apoio (ou uma parcela deste valor, ou ainda, um valor obtido experimentalmente) e, em seguida, considerar a redistribuição dos esforços ao longo da nervura, para verificar se o máximo momento fletor positivo solicitante não ultrapassa o máximo resistido na seção de momento positivo.

A determinação da parcela do momento negativo correspondente à situação após a plastificação é um problema de difícil solução. Inicialmente, para comparar com os resultados do cálculo linear, foram adotados para o momento de plastificação o valor do momento resistente e os valores obtidos através de resultados experimentais (**CALAVERA, 1988**). As principais conclusões estão resumidas a seguir:

- A continuidade reduz os valores dos momentos fletores positivos. No entanto, devido à geometria da seção no apoio, o valor do momento negativo resistente é muito pequeno e o acréscimo de resistência é limitado, tendo-se chegado a valores de 15% para redução do momento positivo.
- A consideração de um valor reduzido para o momento negativo (momento de plastificação) diminui as vantagens de forma quase proporcional à redução, se comparada à situação isostática.
- A maior vantagem de se considerar a continuidade foi observada nos valores dos deslocamentos, quando os benefícios são ainda maiores do que na resistência. Isso é particularmente importante para este tipo de laje, mais deformável que a laje maciça.
- A consideração do comportamento de placa do pavimento conduz a valores menores para os momentos fletores, mais próximos da realidade, desde que a capa seja capaz de proporcionar distribuição de esforços (a largura da laje é um parâmetro importante neste caso). Portanto, a análise isolada da nervura resulta em esforços maiores do que os que ocorrem na realidade.

## 5. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESPAÇAMENTO ENTRE ESCORAS

Uma das principais vantagens em se utilizar o sistema de lajes pré-moldadas está na eliminação das formas de madeira e a diminuição do escoramento necessário para a concretagem no local da capa. A diminuição de escoramento ocorre devido à substituição do concreto na região tracionada do piso por lajotas de isopor ou cerâmicas, proporcionando uma diminuição no peso próprio do pavimento. Porém, grande parte dos insucessos dá-se na fase de concretagem da capa, seja por falta de conhecimento técnico do funcionamento do sistema ou por falta de regras específicas para a execução da tarefa.

Para a determinação do espaçamento das escoras nas lajes com vigotas do tipo trilho ou treliça deve-se estudar a seção pré-moldada responsável pela resistência do conjunto até o endurecimento do concreto da capa. Durante o lançamento do concreto, a vigota deve resistir ao seu peso, ao das lajotas, da capa de concreto, dos operários e dos equipamentos utilizados na concretagem. A definição do tipo de equipamento (carrinhos de mão ou gericas) que será utilizado é fundamental no projeto do escoramento. Também é importante que a quantidade de concreto lançado em uma região não ultrapasse valores pré-determinados. Assim, para a execução da concretagem é importante definir os tipos de equipamento e procedimentos de trabalho, que irão definir as ações atuantes. No caso de vigota em trilho, a seção resistente tem o formato de um T invertido. Os momentos resistentes positivo e negativo são bem diferentes, assim como os valores das inércias após a fissuração. No caso da vigota do tipo treliça, a determinação dos esforços nas barras de aço envolve um cálculo hiperestático de análise analítica complexa, pelo fato das diagonais não estarem contidas em um mesmo plano.

Diante destas dificuldades, o grupo de São Carlos entendeu que um caminho interessante seria o de realizar pesquisa experimental com os seguintes objetivos: entender o comportamento à flexão das vigotas, identificando as causas de colapso ou mau uso (deformação excessiva), verificar linearidade entre ação e deformação, determinar a rigidez de flexão experimental para determinar a deformação das vigotas, elaborar metodologia para a determinação do espaçamento de escoras, determinar o maior vão necessário sem o uso de escoras e comparar os sistemas de vigotas do tipo treliça e do tipo trilho. Foram realizados dois trabalhos iniciais [**SILVA (2000)** e **FORTE (2000)**].

A condição de instabilidade devido à flambagem do banzo superior, no caso da vigota tipo treliça, é a condição determinante para o cálculo do espaçamento do escoramento. Assim, deve-se tomar o cuidado de usar uma altura de treliça compatível com o espaçamento do escoramento e com os equipamentos que se deseja empregar. A rigidez do sistema é suficientemente grande para desprezar a verificação do estado de deformação excessiva no cálculo do espaçamento entre escoras. Assim, o aumento de armadura de tração da vigota não influí no espaçamento entre escoras, pois a condição determinante de colapso é a de compressão no banzo superior.

Para o caso da vigota tipo trilho a situação é exatamente a oposta. Os ensaios mostraram, em primeiro lugar, como é difícil avaliar os deslocamentos. Indicaram também que a expressão de **BRANSON (1968)**, devidamente testada para outros tipos de vigas, não forneceu bons resultados para este tipo de elemento. Verificou-se, ainda, que a rigidez destes elementos é bem mais baixa que as das vigotas em treliça, o que faz com que em algumas situações a condição determinante para o espaçamento usado entre escoras seja a de deformação excessiva.

A análise de deformação das vigotas, principalmente tipo trilho, pode ser feita através dos resultados obtidos nos ensaios para determinar a rigidez **EI**, que estão relacionados à resistência do concreto e à taxa de armadura usada nos elementos ensaiados. Entretanto, nota-se muita variação nos valores.

No caso das vigotas do tipo treliça, o fato do banzo superior não ser exatamente retilíneo, pode reduzir a resistência da mesma. Assim, é importante transportar as vigotas com cuidado e evitar durante a montagem das mesmas o amassamento ou encurvamento do banzo superior. Desta forma, o uso de passadiço de madeira com apoios na base da vigota para permitir a passagem de operários e carrinhos de mão se faz necessário, até porque as lajotas cerâmicas ou de outro material são também pouco resistentes. Para determinar o comprimento de flambagem da barra metálica do banzo superior da treliça recorre-se a valores determinados experimentalmente (**FORTE 2000**).

Nos ensaios feitos pelo grupo de São Carlos para as vigotas em treliça, as rupturas ocorreram sempre por instabilidade do banzo superior e quando se usou carga distribuída, ocorriam sem que houvesse grande deformação que pudesse alertar para o problema (colapso brusco). Não foi este o caso das vigotas do tipo trilho, que apresentaram grandes deformações. Na verdade, nos casos em que se usou

carga uniformemente distribuída não foi possível, através do ensaio, alcançar o colapso das vigotas, pois as lajotas cerâmicas começaram a romper primeiro, mostrando a necessidade do uso de pranchas de madeira para se andar nas mesmas durante a concretagem. A não linearidade entre esforço e deformação fica mais clara quando se usa o ensaio com carga concentrada. O sistema com vigotas do tipo trilho apresentou grande capacidade de deformação. Esta é uma boa propriedade, pois esta deformação pode alertar, na obra, os responsáveis para proceder ao escoramento correto.

Os ensaios mostraram que o espaçamento entre escoras pode ser usado para a laje tipo trilho com um valor de até 2,15 m para as cargas usuais. As vigotas em questão podem ser usadas sem o escoramento para um vão de 1,5 m. No primeiro caso, a condição determinante é a de ruína, e no segundo, do estado de deformação excessiva. De qualquer maneira, como a verificação do estado de deformação excessiva foi feita de forma simplificada, principalmente porque ainda não se conhece bem o comportamento da vigota após a concretagem da capa (a fórmula de Branson não mostrou boa aproximação para a vigota pré-moldada), recomenda-se prudência no valor encontrado de laje sem escoras (2,16m). Melhor é ficar com um vão em torno de 1,5 m como no caso da estrutura com escoras. Para o sistema com vigota em treliça, se o elemento em treliça tiver a altura de 6 cm, os espaçamentos entre escoras cairiam para cerca de 1,1 m e 1,60 m.

É preciso chamar atenção para o fato de que existem situações na obra não consideradas no cálculo, que podem ser favoráveis ou não na verificação do estado de deformação. Entre estas estão a condição dos apoios das nervuras nas vigas e paredes (a rotação é parcialmente impedida), o uso de contrapiso de concreto que aumenta a rigidez, a colocação de tela metálica na capa que reduz a retração e melhora o comportamento transversal, as deformações no apoio inferior das escoras (solo ou outra laje) etc. Por fim, os valores encontrados para o máximo vão entre escoras só se aplicam para movimentações de concreto com carrinhos usuais. Para outro tipo de equipamento o cálculo deve ser refeito.

## 6. ESCOLHA DA ARMADURA E ALTURA DAS LAJES

Um dos primeiros e principais procedimentos do projeto de pisos com lajes com vigotas pré-moldadas está em, conhecendo-se o vão e situação de utilização (valor de ação), escolher a altura adequada e a armadura correspondente de maneira que as condições de estado limite último (ruptura e instabilidade) não ocorram e que as condições de serviço (estado de deformação excessiva) sejam verificadas.

Dois trabalhos teóricos sobre o assunto foram desenvolvidos pelo grupo de São Carlos baseados em procedimentos disponíveis na literatura técnica e nas normas de concreto de 1980 [**NB1/80 (1980)**] e o texto da revisão de 2000 [**NB1/2000 (2000)**], buscando analisar se o estado limite último de flexão ou de deformação excessiva é o determinante de projeto. São usados procedimentos aproximados e já consagrados para a determinação da altura das lajes pré-moldadas. São analisados os resultados de tabelas encontradas em manuais, que permitem obter a altura da laje sendo conhecidos o sistema estrutural (simplesmente apoiadas), o vão, o carregamento atuante e armadura empregada.

A principal conclusão que pode ser obtida destes estudos é que a escolha da altura da laje, na maioria dos casos, fica determinada pela verificação da deformação excessiva. Apenas para pequenos vãos e grandes sobrecargas de uso é que a condição do estado limite último de ruína de flexão passa a ser determinante. Desta maneira, as tabelas encontradas no mercado são inadequadas para serem usadas, pois não consideram o efeito da fissuração e fluência do concreto. Os resultados obtidos mostram ainda como é importante usar a contra-flecha, pois sem a sua consideração haveria uma limitação muito grande no valor do vão a ser vencido.

Os autores continuam a desenvolver a segunda parte deste estudo, que consiste em analisar experimentalmente os efeitos da fissuração do concreto na flexão, da fluência e da continuidade e espaçamento das escoras durante a concretagem. Os resultados de **FLÓRIO (2001), ROGGE (2001)** mostram que para lajes de alturas em torno de a 12 cm, as mais empregadas, e sob cargas de serviço as seções mais solicitadas trabalham no estádio II e a fluência que ocorre é bem mais alta do que a contemplada por expressões aproximadas das normas vigentes. Já os resultados obtidos no estudo experimental da determinação do espaçamento entre escoras durante a concretagem, indicam que pode haver outra limitação ao uso de contraflechas além daquela imposta por norma ( $\ell/350$ ), pois a contra-flecha pode introduzir na vigota esforços elevados. Após a realização destas pesquisas experimentais, poder-se-á contar com procedimento de cálculo e tabelas para a determinação da altura e armadura bem mais precisas que as atuais. É bom ressaltar também que o efeito da continuidade, estudado

teoricamente por **MESQUITA (2000)**, **SOUZA (2000)** e **FURLAN JR (2000)** melhoram sensivelmente a limitação dos vãos.

Apesar da crítica feita às tabelas usuais de determinação de vão máximo, elas apresentam um modelo interessante. Basta considerar a verificação do estado de deformação excessiva, levando em conta a fluência e fissuração do concreto, para torná-las completas. As duas restrições que podem ainda ser feitas são quanto ao coeficiente de fluência e a resistência à compressão do concreto (que influencia o módulo de deformação) que devem ser previamente definidos para se obter as referidas tabelas. **CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2000)** apresentam em seu livro tais tabelas e reproduz-se aqui uma delas parcialmente.

**TABELA 1. Valores máximos (m) de vãos para lajes simplesmente apoiadas, altura de 12 cm (capa de 4 cm), ruptura e deformação excessiva atendidas.**

**Intereixo = 50 cm; peso próprio = 141 kgf/m<sup>2</sup>; f<sub>ck</sub> = 20 MPa; coeficiente de fluência φ = 2**

Classe e Armadura (cm <sup>2</sup> )	FORRO	50	100	150	200
6 - 0,488	3,75	3,55	3,25	3,00	2,80
7 - 0,537	3,80	3,60	3,40	3,15	2,95
8 - 0,591	3,85	3,65	3,50	3,30	3,10
9 - 0,650	3,90	3,70	3,55	3,40	3,20
10 - 0,715	3,95	3,75	3,60	3,45	3,30
11 - 0,787	4,05	3,80	3,65	3,50	3,40
12 - 0,865	4,10	3,90	3,70	3,55	3,45
13 - 0,952	4,15	3,95	3,75	3,65	3,50
14 - 1,047	4,25	4,05	3,85	3,70	3,55
15 - 1,152	4,35	4,10	3,90	3,75	3,65
16 - 1,267		4,20	4,00	3,85	3,70
17 - 1,394			4,10	3,95	3,80
18 - 1,533			4,20	4,05	3,90
19 - 1,686			4,30	4,10	4,00
20 - 1,855			4,40	4,20	4,05

A tabela apresentada neste trabalho serve para sistemas simplesmente apoiados. Não se justifica tentar confeccionar tabelas similares para sistemas contínuos, devido à dificuldade em se determinar com exatidão os momentos fletores nos apoios internos (devido à plastificação do concreto) e a possibilidade de ocorrência de diferentes relações entre vãos. Recomenda-se, nestes casos, usar os valores das tabela das lajes simplesmente apoiadas como ponto de partida para as verificações e otimização da quantidade da armadura.

Na prática ocorrem várias situações que não puderam ser consideradas nos estudos, e que podem influenciar significativamente nos valores dos deslocamentos, tais como: condições da cura do concreto (especialmente a capa), variações no valor do módulo de deformabilidade do concreto, condições de apoio que impedem o livre giro das vigotas, condições climáticas variáveis e diferentes das adotadas (temperatura, umidade relativa, etc.), coeficiente de fluência diferente do valor adotado e outros mais. Algumas destas condições podem influenciar aumentando ou diminuindo as deformações. Assim, recomenda-se, sempre que possível, adotar providências que melhorem a cura do concreto, retardem a retirada do escoramento (permitindo um valor maior para a resistência à compressão, do coeficiente de deformabilidade e diminuição do coeficiente de fluência do concreto), e incluir armaduras que ajudem o funcionamento da continuidade.

## 7. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO TEMPO - DEFORMAÇÕES DIFERIDAS

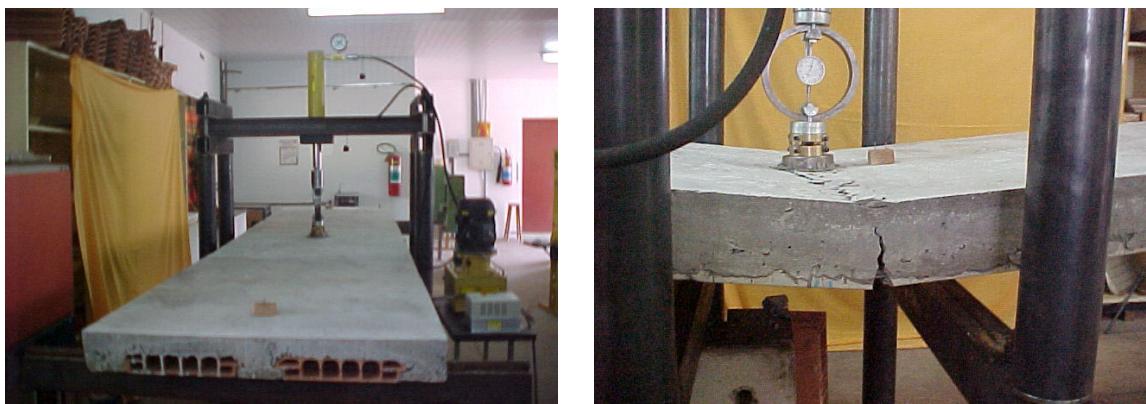
Entre os aspectos que devem ser estudados em lajes com vigotas pré-moldadas está a determinação (ou previsão) da deformação de uma laje pré-moldada com o tempo, ou seja, como a fluência e retração do concreto mudam o comportamento da laje. Vários fatores influem nesta questão: a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente, o tipo de cimento usado, a trabalhabilidade do concreto empregado, a geometria da peça, a idade do concreto quando carregado e a intensidade da ação permanente.

**ROGGE (2001)** desenvolve um trabalho cujo objetivo principal é quantificar experimentalmente as deformações ao longo do tempo de lajes com vigotas pré-moldadas, e verificar se as simplificações e

procedimentos adotados para o cálculo, atualmente, conduzem a resultados satisfatórios. Os resultados experimentais permitem aferir os resultados obtidos de modelos teóricos e apontar outros aspectos que devem merecer um estudo mais detalhado para conferir maior precisão ao projeto.

Durante seis meses foram realizados três ensaios diferentes com um protótipo piloto: um de variação de temperatura, outro de medição da flecha ao longo do tempo e um terceiro de ruptura. Um quarto ensaio consta de cinco lajes que terão suas deformações medidas ao longo do tempo. Durante os vinte e dois dias de medição da flecha do protótipo piloto, chegou-se a um valor total de 11,85 mm, para uma laje de 11,5 cm de altura e um vão de 4 m submetida apenas ao peso próprio. Durante este tempo o protótipo nunca esteve exposto a diferenças de temperatura superiores a 2°C, e por isso pode-se dizer que este valor foi pouco influenciado pelo gradiente de temperatura. O valor da flecha encontrada já corresponde praticamente ao limite de 1/300 do vão, que neste caso é de 4 m.

Após as medições das flechas ao longo do tempo ensaiou-se o protótipo à flexão levando-o à ruptura com o intuito de verificar os valores do momento de fissuração e do momento último. Os valores calculados e os determinados experimentalmente mostraram que realmente a peça não trabalha no estádio I, mesmo para a situação de cálculo da flecha imediata, devido a sua baixa rigidez e consequentemente ao pequeno valor de momento de fissuração. Pelos cálculos, o momento de fissuração deve ser considerado com resistência à tração igual a  $1,5.f_{ct}$  e não  $1,2.f_{ct}$  como se imaginava. O segundo valor (1,2) é mais aconselhável para vigas em que  $h > b$ , que não é o caso aqui. A peça se encontra fissurada mesmo que apenas solicitada ao peso próprio, pois se o cálculo da flecha imediata for feito com a inércia do estádio I resultará em um valor subestimado. Quanto à ruptura, percebe-se que o comportamento do sistema é com as três nervuras (fig. 4a) funcionando juntas. Próximo ao valor de colapso relativo à vigota central, há um aumento da deformação, indicando plastificação nesta região. A peça continua resistindo ao aumento de carga devido à participação das outras duas vigotas até que ocorra a formação, na seção do meio do vão, de uma “charneira” no concreto (figura 4b).



a) Protótipo com 3 nervuras

b) Vista lateral da ruptura

**FIGURA 4. Aspectos de ensaio a flexão do protótipo**

Importante lembrar que as fissuras, devido à pequena altura do conjunto, só passam a ser visíveis quando a peça se encontra próxima ao colapso.

O ensaio de medição das flechas foi realizado com o intuito de conhecer o comportamento da laje nos primeiros dias após a retirada do escoramento. Nos três primeiros dias a velocidade de deformação cai visivelmente. Durante os vinte e dois dias em que foram medidas as flechas, observou-se uma diminuição gradativa na velocidade dos deslocamentos. A expressão indicada para o cálculo de flechas diferidas em vigas de concreto armado pela NB1-99 não se mostra adequada e deve subestimar os valores relativos à fluência. Não resiste a uma comparação simples com o coeficiente de fluência ( $\phi$ ) que mostra bem como a espessura fictícia, idade do concreto, umidade relativa etc, que não são abordadas na expressão anterior, tornam-se determinantes nestas situações.

De qualquer forma, só após a complementação dos estudos é que se poderá realmente levar em conta qual o procedimento mais adequado a se empregar nestas situações. Como pela expressão do coeficiente de fluência ( $\phi$ ) a idade do concreto quando do início do carregamento influencia bastante, procurou-se deixar três dos cinco protótipos finais escorados até o vigésimo oitavo dia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NB1/2000. **Projeto de concreto estrutural – procedimento.** Texto base do projeto de revisão da NBR-6118 e NBR-7197. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT. NBR-6118/80 (NB1/80). **Projeto e execução de estruturas de concreto armado.** Rio de Janeiro, 1980.
- BRANSON, D. E. **Procedures for computing deflections.** ACI Journal, 65. New York, 1968.
- CALAVERA, J. R.; PEIRETTI, H. C.; GOMEZ, J. F.; GONZALEZ, F. J. L. **Comportamiento hasta rotura de forjados isostaticos e hiperestaticos de viguetas armadas.** Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Espanha, 1998.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado, segundo a NBR-6118 (NB1/80) e a proposta de 1999 (NB1/99).** EdUFSCar. São Carlos, SP, 2001. 308 pp.
- FIGUEIREDO FILHO, J. R.; MARINS NETO, J.; CARVALHO, R. C.; FURLAN JUNIOR, S. **Estudo de pavimentos de lajes pré-moldadas: determinação das reações nas vigas do contorno.** Anais. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. 13 a 17 de novembro de 2000. Punta Del Leste, Uruguay.
- FLÓRIO, M. C.; CARVALHO, R. C. **Estudo experimental de vigetas pré-moldadas e vigetas de concreto armado para execução de lajes unidirecionais.** Relatório parcial de bolsa de iniciação científica. FAPESP Processo: 00/11854-0. Julho de 2001, São Carlos, SP.
- FORTE, F. C.; CARVALHO, R. C.; FURLAN JUNIOR S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FANGEL, L.; ARADO, F. B. G. **Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras tipo treliça.** Anais. 42º Congresso Brasileiro do Concreto. REIBRAC. IBRACON. 13 a 18 de agosto de 2000. Fortaleza, CE.
- FORTE, F. C.; CARVALHO, R. C.; FURLAN JUNIOR S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FANGEL, L.; ARADO, F. B. G. **Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras tipo treliça.** Anais. 42º Congresso Brasileiro do Concreto. REIBRAC. IBRACON. 13 a 18 de agosto de 2000. Fortaleza, CE.
- FURLAN JUNIOR, S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; CARVALHO, R. C.; MERLIN, A. **Lajes pré-moldadas de concreto: a consideração da plastificação nos valores dos momentos negativos em elementos hiperestáticos e seus efeitos no dimensionamento do pavimento.** Anais. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. 13 a 17 de novembro de 2000. Punta Del Leste, Uruguay.
- MESQUITA, V.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FURLAN JUNIOR, S. **Escolha da altura de lajes com nervuras pré-moldadas para pavimentos de edificações considerando as verificações do estado limite último e de deformação excessiva.** Anais. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. 13 a 17 de novembro de 2000. Punta Del Leste, Uruguay.
- ROGGE, A. **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes com vigetas pré-moldadas.** Relatório parcial de bolsa de iniciação científica. FAPESP, Processo 00/1898-0. Março de 2001, São Carlos, SP.
- SILVA, L. M.; CARVALHO, R. C.; FURLAN JUNIOR, S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FORTE, F. C. **Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras do tipo trilho.** Anais. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. 13 a 17 de novembro de 2000. Punta Del Leste, Uruguay.
- SOUZA, E. G.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FURLAN JUNIOR, S. **Determinação da altura de lajes com nervuras pré-moldadas atendendo o estado limite último (flexão) e de serviço (deformação) de acordo com a NB1-1999.** Anais. IV Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto. 21 a 25 de agosto de 2000. São Paulo, SP.

Os autores agradecem o auxílio recebido da FAPESP para o desenvolvimento do conjunto de diversas pesquisas que permitiram a confecção deste trabalho.