



1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO
EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO

São Carlos, 03 - 04 de novembro de 2005

Estado da Arte do Cálculo das Lajes Pré-fabricadas com Vigotas de Concreto

State-of-Art of Precast Concrete Joist-Slab Design

Roberto Chust Carvalho(1); Guilherme Aris Parsekian (2);
Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho (3); Andrey Monteiro Maciel (4)

(1) Professor Adjunto, pesquisador do NETPre, Universidade Federal de São Carlos
e-mail: chust@power.ufscar.br

(2) Professor da Pós-Graduação em Construção Civil, pesquisador do NETPre, Universidade Federal de São Carlos
email: parsek@power.ufscar.br

(3) Professor Adjunto, Universidade Federal de São Carlos
e-mail: jasson@power.ufscar.br

(4) Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís (SP-310), Km 235 - São Carlos - São Paulo - Brasil - CEP: 13565-905

Resumo

As lajes pré-fabricadas com vigotas de concreto, especialmente as treliçadas, embora muito empregadas em construções eram pouco estudadas até pouco tempo atrás. Não é exagero afirmar que o funcionamento desses elementos não foi ainda completamente estudado. Este trabalho tem por objetivo fazer um retrospecto dos estudos teóricos e experimentais realizados sobre esse tema nos últimos dez anos. Esses estudos culminaram com a publicação de normas específicas. Nesse período vários ensaios foram realizados, programas foram desenvolvidos e inúmeras dissertações de mestrado foram escritas sistematizando a análise de pavimentos com lajes pré-fabricadas.

Hoje o projetista que optar por usar lajes pré-fabricadas dispõe de muitas informações técnicas e de uma série de ferramentas computacionais que consideram desde a análise não linear (fissuração do concreto) até plastificações de seções, deformação ao longo do tempo e cálculo tanto de lajes unidirecionais como bidirecionais.

São mostrados, de forma sintética, os resultados das pesquisas que consideram os modelos de cálculo, a distribuição de ações nas vigas periféricas, o estado de deformação levando em conta a fluência e fissuração do concreto, a continuidade dos painéis, os esforços de cisalhamento e punção das mesas, as emendas de treliças e os reforços da mesa superior. Entende-se que este texto pode servir como um breve índice de referência ao engenheiro projetista, na medida em que são indicadas e analisadas as fontes de informações mais importantes sobre tema. A organização e divulgação desses estudos permite maximizar o potencial deste sistema.

Palavras-Chave: Lajes pré-fabricadas, Estado da arte, Cálculo, Laje

Keywords: Precast slab; Joist, State-of-art, Slab, Design.

1 Introdução

Há cerca de quinze anos atrás o engenheiro que quisesse desenvolver um projeto com lajes pré-fabricadas com vigotas de concreto não contaria com literatura para se orientar. O que existia em língua portuguesa eram catálogos de fabricantes, muitos dos quais com pouco conteúdo técnico. Embora os catálogos da época tentassem informar os procedimentos que deveriam ser usados durante a execução havia, em geral, muito empirismo.

Na região do nordeste do Estado de São Paulo a percussora das lajes pré-fabricadas foram, até o final da década de 70, as lajes nervuradas moldadas no local com elementos de enchimento compostos de lajotas cerâmicas de pequena altura. A figura 1 mostra um esquema deste sistema estrutural. A engenhosidade do processo estava em usar a madeira destinada a futuramente confeccionar a estrutura do telhado para servir de "forma" das nervuras. As vigas de madeira eram apoiadas sobre as paredes e escoras. As lajotas cerâmicas apoiavam-se (acima das abas) sobre as vigas de madeira. Depois deste sistema montado colocava-se a armadura longitudinal e enchiam-se as nervuras de concreto. A falta de informação era tanta que preferia-se, erroneamente por questões econômicas, preencher o concreto somente na região próxima ao elemento de madeira (veja a indicação da figura 1. A possibilidade de concretagem da capa e consequentemente de ser ter uma largura maior de mesa que aumentaria sensivelmente a rigidez do elemento, não era levada em conta à época.



Figura 1 - Corte longitudinal e transversal do esquema de lajes nervuradas moldadas no local usadas até o final da década de 70

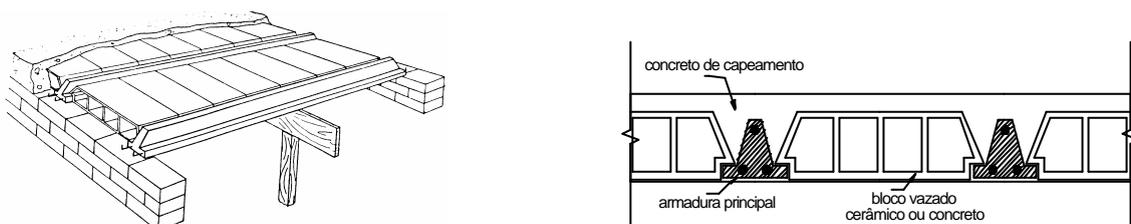


Figura 2- Perspectiva esquemática da montagem da laje pré fabricada com vigota do tipo trilho (adaptada de Borges 1997) e seção transversal após o preenchimento de concreto

Após a montagem de diversas fábricas de vigotas de concreto do tipo trilho o sistema moldado no local caiu em desuso. Os construtores logo perceberam ser muito mais prático o uso destes elementos. Uma vez dimensionadas corretamente as lajes poderiam até receber carga do telhado (telhado apoiado em pontaletes). A economia de madeira (principalmente a do telhado) com este novo sistema era grande. Desta forma, para obras de pequeno porte o uso de lajes pré-fabricadas com a seção típica apresentada na figura 2 tornou-se quase obrigatória. Há neste processo uma grande melhoria pois os elementos são feitos com concreto usinado sob condições controladas e o fabricante já recomendava ao construtor o preenchimento de concreto sobre toda a

superfície da lajota e do trilho permitindo assim que se formasse a mesa superior. Depois do sucesso das lajes com nervuras do tipo trilho, e após a importação das primeiras máquinas de eletrosoldagem, lançou-se no Brasil as lajes com armaduras treliçadas (figura 3). A treliça é obtida através da passagem de fios de aço CA60 em uma máquina que dá forma às diagonais e solda por fusão estes elementos aos banzos de forma automática.

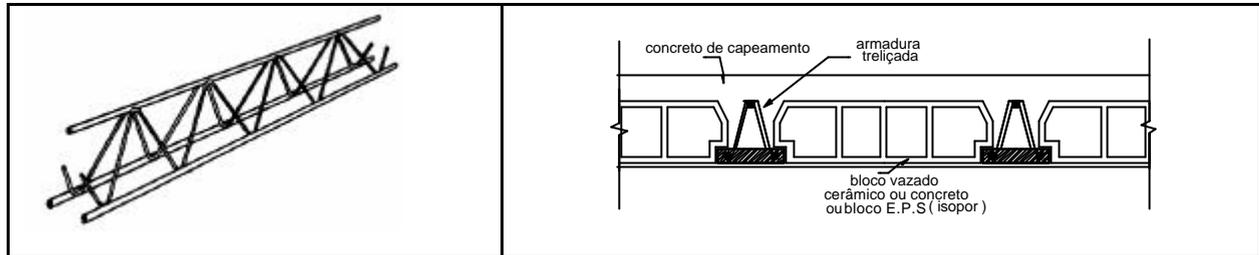


Figura 3- Perspectiva esquemática da armadura treliçada usada em lajes pré-fabricadas e seção transversal após o preenchimento de concreto da laje pré-fabricada com nervura do tipo treliça.

O fabricante de lajes compra a armadura treliçada pronta e produz o elemento pré-moldado fazendo a concretagem do elemento inferior de concreto (sapata). Desta forma pode fornecer um produto mais leve, com uma ligação maior entre o concreto da pré-moldagem e o moldado no local (armadura transversal das diagonais da treliça se incube disso). Durante a fase construtiva, a treliça é um elemento estrutural que requer maior espaçamento entre escoras para resistir aos esforços durante a concretagem e cura.

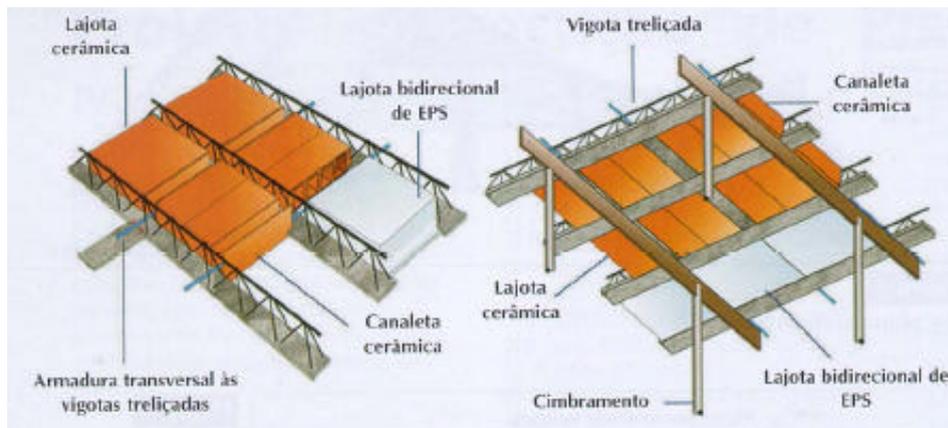


Figura 4- Perspectiva esquemática da laje treliçada com duas direções. À esquerda usando canaleta cerâmica e à direita usando EPS (isopor) com canal transversal.

Hoje o emprego destas lajes se popularizou nas diversas regiões brasileiras. Existem no país até fábricas de máquinas de equipamentos de eletrosoldagem.

Outra vantagem notável das lajes treliçadas é a possibilidade de se criar, sem dificuldade, lajes bidirecionais com o uso de elementos de polietileno expandido (EPS ou vulgarmente denominado isopor) como pode ser visto na figura 4.

Pouco após o surgimento das lajes treliçadas foram lançadas no mercado as lajes com trilhos protendidos cuja seção transversal típica é indicada na figura 5. A idéia era aproveitar as vantagens da protensão e poder-se contar com um elemento que só sofrerá fissuração sob carga de intensidade elevada.

Diversas soluções podem ser encontradas a partir dos tipos de lajes simples descritos aqui, com por exemplo, painéis de laje pré-fabricados. Neste trabalho procura-se explorar somente o potencial das lajes unidirecional e bidirecional nervuradas.

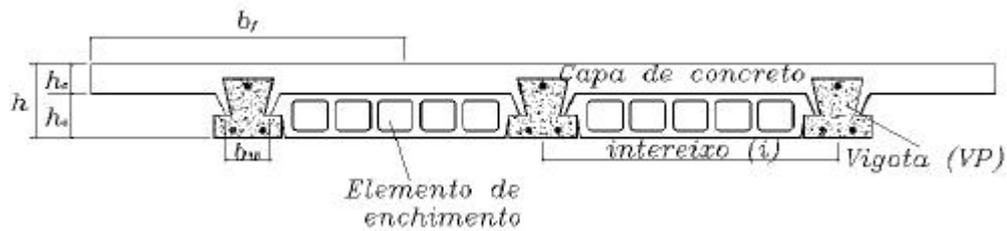


Figura 5- Seção transversal de laje pré-fabricada com vigotas protendidas.

2 Primeiras pesquisas

As informações referenciadas mais antigas sobre as lajes pré-fabricadas no Brasil podem ser encontradas em MEDITERRÂNEA (1992 e 1993). Nesses textos, a empresa MEDITERRÂNEA PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO, através de manual e boletim técnico, apresenta uma série de informações sobre o sistema de lajes pré-fabricadas com armadura em treliça, incluindo a publicação de tabelas para dimensionamento de armadura longitudinal das nervuras para sistemas simplesmente apoiados, porém sem considerar a fissuração dos elementos. Em relação às lajes compostas por trilhos só foi possível encontrar folhetos de propaganda de empresas comerciais que já não trabalham mais no mercado. Da mesma forma que as publicações da MEDITERRÂNEA, esses folhetos apresentavam tabelas para identificação de altura para as lajes em função de vão e sobrecarga empregada.

DI PIETRO (1993) abordou a tecnologia de execução de lajes pré-fabricadas com vigotas de concreto analisando custos e fabricação, comentando as questões de qualidade e industrialização. O dimensionamento não é focado em seu trabalho.

BOCCHI JR. (1995) disserta sobre lajes nervuradas de concreto armado onde compara, através de um exemplo numérico, lajes pré-fabricadas com as moldadas no local. Para alguns casos analisados o autor conclui que o custo na solução com lajes pré-moldadas é inferior às lajes maciças. O trabalho enfatiza que a atenção a todas as etapas da obra, desde o projeto até a execução das lajes, é fundamental para o bom desempenho das mesmas. O autor também, analisa as principais recomendações da norma de concreto da época NBR6118 (1980) e apresenta exemplos do detalhamento das armaduras de flexão.

GASPAR (1997) analisa, de forma experimental e teórica, o aspecto de execução de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas. Enfoca principalmente a questão do escoramento mostrando como pode ser definido o espaçamento entre as escoras. Este assunto é retomado por EL DEBS & DROPPA JÚNIOR (1999), SILVA et alli (2000), FORTE et Alli (2000) e por TERNI et alli (1999), sendo que este trata-se é tratado mais o estudo das soldas dos elementos que constituem as treliças das vigotas.

CAIXETA (1998) apresentou resultados de ensaios de quatro nervuras com vigotas treliçadas submetidas à flexão simples tentando caracterizar de forma mais real o comportamento das mesmas. O trabalho indica a necessidade de se considerar o efeito da fissuração e mostra que a armadura diagonal da treliça de aço que não tem banço superior ancorado acima da linha neutra praticamente não tem tensão atuante a não ser quando se aproxima do colapso da mesma. Desta forma, as diagonais das treliças não podem ser consideradas como armaduras de combate ao cisalhamento quando o banço superior não está ancorado acima da linha neutra. Também é ressaltado nesse trabalho a necessidade da introdução de contra-flecha nas nervuras em virtude da baixa rigidez alcançada pelas mesmas. LIMA (1999) apresenta estudo experimental de lajes nervuradas com vigotas treliçadas.

DROPPA JUNIOR (1999) aborda a análise estrutural dessas lajes considerando a fissuração do concreto. Esta análise foi realizada utilizando o modelo de grelha, considerando a não-linearidade do concreto armado, utilizando a relação momento x

curvatura e carregamento incremental. Resultados obtidos com esse modelo são comparados com resultados obtidos analiticamente para vigotas simplesmente apoiadas ensaiadas na Escola de Engenharia de São Carlos. Analisa, também, sistemas contínuos e lajes bi-direcionais. Este trabalho junto com outros do Grupo da EESC-USP, abriram caminho para a pesquisa de outros temas tais como redistribuição do momento negativo em sistemas contínuos. Da associação entre o pesquisador DROPPA JUNIOR e o professor EL DEBS resultou a publicação de diversos artigos técnicos sobre o assunto como pode ser encontrado na bibliografia.

MAGALHÃES (2001) na sua dissertação de mestrado aborda, através de análise teórica e experimental, a continuidade estrutural de lajes pré-fabricadas estudando o valor dos momentos fletores negativos nos apoios destas. Na análise teórica, a consideração da não-linearidade física do concreto é realizada a partir do uso da relação momento curvatura proposta pelo código modelo CEB-90 em conjunto com a técnica do carregamento incremental. Os resultados do modelo teórico são confrontados com os resultados obtidos em ensaios experimentais de faixas de lajes contínuas dimensionadas com diferentes graus de redistribuição dos momentos fletores negativos. Estudo similar foi desenvolvido por FURLAN JUNIOR *et alli* (2000) com o trabalho sobre a consideração da plastificação do concreto nos apoios intermediários e seus efeitos no dimensionamento do pavimento. Finalmente MERLIN (2002) aborda de forma teórica os momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por vigotas de concreto com trilhos protendidos.

PEREIRA (2002) relata um estudo experimental de emendas em vigotas treliçadas. Aborda também práticas de usuários do sistema de lajes pré-fabricadas trazendo uma série de informações importantes sobre questões de patologia obtidas através de levantamento junto a fabricantes de lajes.

Além destes trabalhos o grupo da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), atualmente reunido no Núcleo de Estudos em Pré-Moldados (NETPre), desenvolveu alguns estudos experimentais exploratórios e diversos estudos teóricos de lajes pré-fabricadas unidirecionais resumidos na tabela 1.

Tabela 1 – Alguns dos trabalhos desenvolvidos na UFSCar (grupo NETPre)

TRABALHO	TEMA DA PESQUISA
MESQUITA <i>et alli</i> (1999)	Basicamente corrige as tabelas apresentadas pela MEDITERRÂNEA
SILVA <i>et alli</i> (2000)	Analisa, baseado em valores experimentais, o espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras do tipo trilho
FLÓRIO <i>et alli</i> (2001)	Estudo experimental exploratório sobre vigotas pré-moldadas e nervuras de concreto armado para execução de lajes unidirecionais
ROGGE <i>et alli</i> (2000)	Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes com nervuras pré-moldadas (início do estudo)
PEIXOTO <i>et alli</i> (2002)	Estudo dos efeitos da vibração mecânica e cura controlada do concreto no comportamento à flexão de lajes com vigotas pré-moldadas
BUSCARIOLO <i>et alli</i> (2003)	Estudo experimental do comportamento da região das mesas de lajes com nervuras parcialmente pré-moldadas e a consideração da punção
FLÓRIO (2003)	Dissertação que resume experimentos exploratórios que, entre outros, estudou a questão do cisalhamento e a rigidez dos elementos
KATAOKA (2005)	Continuação dos experimentos sobre o efeito da fluência no estado de deformação em lajes pré-fabricadas (estudo em andamento)

3 Escolha das lajes pré-fabricadas com o uso de tabelas

Tabelas para dimensionamento de lajes pré-fabricadas surgiram junto com as lajes do tipo trilho e foram depois ampliadas para as com vigotas treliçadas e também para as com vigotas protendidas. Era preciso determinar rapidamente a altura da laje e a quantidade de armadura a se empregar nos trilhos. Surgiram então tabelas que correlacionavam vãos, ações atuantes nas lajes e valores de armaduras. Assim, o projetista, sabendo o vão e a sobrecarga da laje, escolhe uma altura adequada e obtém a armadura

necessária, simplesmente consultando uma tabela com o aspecto da tabela 2. Cada tabela era feita para uma altura e outras características de laje tais como a distância entre os eixos das vigotas. Com a consulta de diversas tabelas era possível montar a solução mais adequada escolhendo a altura mais conveniente para o projeto.

A construção de uma tabela deste tipo consiste em calcular inúmeras situações de uma determinada nervura variando os vãos e carregamentos. As primeiras tabelas continham simplificações, hoje não mais aceitas, como, por exemplo, usar a verificação da flecha no estágio I. MESQUITA et alli (2000) traz no seu trabalho apresentam diversas tabelas do sistema Mediterrânea [1993] que foram refeitas, considerando a fissuração e fluência do concreto e também levando em conta o uso de contra-flecha. GIMENEZ et alli (2000) refez as tabelas de Mesquita, considerando as prescrições do texto ainda provisório da NBR6118:2000. Entretanto, com a facilidade de uso do computador e a dificuldade em se abranger todas as situações, tal como a continuidade, fez com que as tabelas fossem colocadas de lado para dar lugar a programas de cálculo mais completos e fáceis de usar. KATAOKA [2004] realiza estudo analisando alguns programas de cálculo. Com publicação da NBR6118:2003 hoje o projetista é obrigado a verificar o estado de deformação excessiva. Mesquita et alli (1999) mostra que invariavelmente a condição determinante de projeto é a da verificação de deformação excessiva. Conclusão análoga já havia sido feita por CAIXETA (1998) em trabalho experimental, ou seja observou flechas bem acima do limite quando da ocorrência da ruptura das nervuras.

Tabela 2 - Tabela explicativa para determinação de altura de lajes

Tipo de Produto		Sobrecarga					b_{10}
LAJE TRELIÇADA							
CLASSE	FORRO	50	100	150	200	350	500
03							
04							
05							
06							
07							

CARGAS
 Classe de Resistência
 Carga em kgf/m^2
 Vãos Livres para Lajes Unidirecionais
 Altura Total da Laje Acabada

4 Execução: espaçamento entre escoras, concretagem e emenda de treliças

Dois aspectos importantes surgem na execução das lajes: a concretagem, que deve garantir que as características do concreto alcancem os valores de projeto, e o escoramento das nervuras, que tem que garantir o suporte da laje até que o concreto atinja resistência e rigidez adequados.

Em relação ao adensamento da capa PEIXOTO (2002) mostra que o uso da técnica de vibração de imersão garante uma maior rigidez às nervuras, como mostra o gráfico da figura 6. O uso de vibração superficial, que poderia ser empregado em fábricas se mostrou menos eficiente. Esse trabalho mostra ainda que a cura controlada garante melhor uniformidade na resistência do concreto e também maior rigidez das nervuras.

Em relação ao dimensionamento do escoramento para que suporte as ações durante a concretagem e cura do concreto, GASPAR (1997), em trabalho pioneiro nesse tema, realiza estudo teórico-experimental que resulta na indicação de um procedimento de verificação de escoramento de lajes com vigotas treliçadas. Posteriormente e quase que simultaneamente, SILVA (2000), DROPPA (2000) e FORTE (2000) desenvolvem experimentos para análise de espaçamento de escoras enquanto. DROPPA (2003) relata programa computacional para cálculo de espaçamento de escoras).

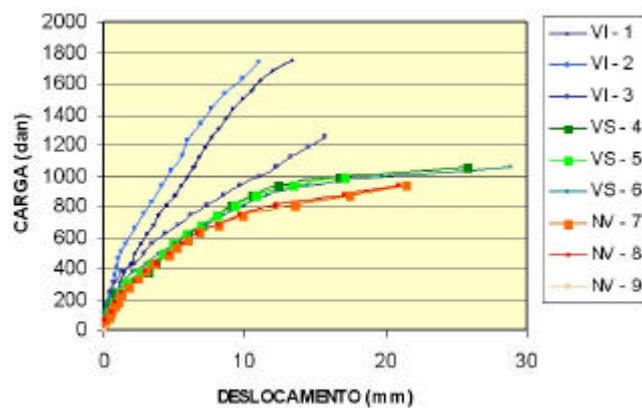


Figura 6 Gráfico com as curvas de carga aplicada em nervuras isoladas e flecha medida para os protótipos NV (“sem vibração”), com vibração mecânica por imersão (VI) e vibração superficial(VS), PEIXOTO (2002)

TERNI (1999) realiza experimentos para determinar a resistência das resistências de soldas da ligação das sinusoides.

A emenda em vigotas teliçadas foi motivo da dissertação de PEREIRA (2002) junto a UFG (Universidade Federal de Goiás), com o intuito de facilitar a execução de lajes com grandes vãos. Diversos protótipos foram ensaiados e indicações são dadas aos projetistas e construtores para executar o procedimento. Antes da escolha do tema, o autor fez um interessante levantamento entre projetistas, fabricantes e construtores tentando identificar quais seriam as falhas, os pontos obscuros e mesmo o anseio da cada setor em relação ao sistema. Todo o levantamento foi feito com muito cuidado e utilizando método científico preciso que deveria ser aproveitado para ser usado em outro universos que não somente a cidade de Goiânia. Esse levantamento é relatado em sua dissertação.

5 Dimensionamento à flexão

Embora o dimensionamento à flexão de lajes pré-fabricadas em princípio não apresente grandes dificuldades, a sistemática, como é conhecida hoje, só aparece em publicações com CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (1998) e posteriormente no livro didático de ambos CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2001), além de em EL DEBS (2000). Hoje a NBR6118:2003 é bem clara especificando que as lajes unidirecionais devem ser consideradas como vigas isoladas e as bidirecionais, guardadas algumas dimensões máximas, como maciça. Segundo DROPPA (1999) e FLÓRIO (2003) o ideal para o cálculo de momento fletor é usar o modelo de grelha equivalente. Em relação às lajes unidirecionais, CARVALHO et alli (1999) indica que é possível, pelo menos de forma teórica, calcular reações de ações de lajes unidirecionais na direção perpendicular às nervuras através da modelagem simplificada da capa. Esse processo de cálculo é apresentado em detalhes em CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2004).

Em relação à continuidade, a seção em forma de tê da laje pré-fabricada é mais adequada para resistir a momentos positivos e menos adequada a momentos negativos. Há uma tendência de plastificação da seção no apoio. Isto ocorre devido a grande diferença de áreas comprimidas do concreto nas faces inferior e superior, como pode ser observado na figura 7. Ocorrendo a plastificação da seção no apoio há uma redistribuição de momentos, conforme mostrado na figura 8. FURLAN et alli (2000) e MAGALHÃES (2001) relatam ensaios que dão idéia do comportamento desse sistema quando submetido a momentos negativos. DROPPA e EL DEBS (1999), MERLIN (2002), CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2004) e SANTINI et Alli (2004) abordaram o problema de forma teórica. A nova versão da norma NBR6118:2003 prevê o cálculo com redistribuição de momentos, porém com considerações de posição de linha neutra que

ainda não foram confirmadas por experimentos nacionais.

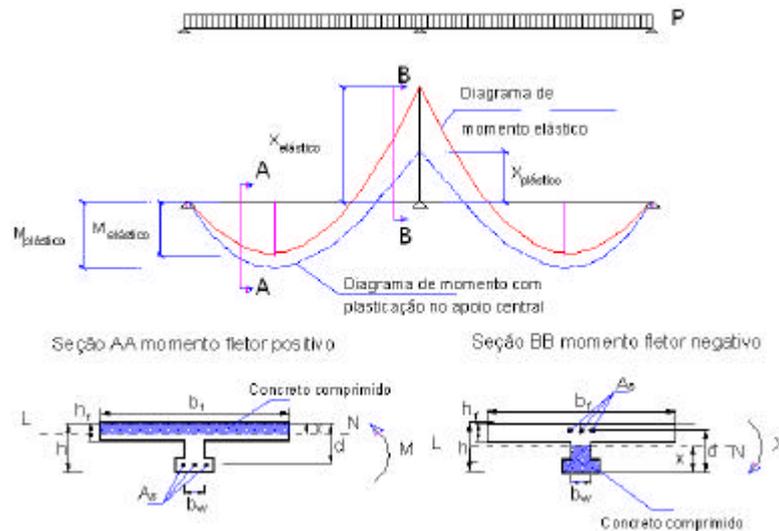


Figura 7 Diagramas de momentos elástico e com plastificação no apoio central em uma laje contínua

6 Cisalhamento

Este é um dos temas menos estudados na laje pré-fabricada. O cisalhamento pode ser vertical, devido às ações verticais aplicadas, ou horizontal, na interface entre o concreto da vigota pré-moldada e o lançado no local. De uma maneira geral sabe-se que a armadura treliçada permite uma melhor ligação entre concreto pré-moldado e a o lançado no local. Entretanto, não existem no país estudos específicos sobre o assunto. As normas brasileiras não indicam como realizar a verificação do cisalhamento entre superfícies pré-moldada e moldada em loco. No caso das vigotas de concreto ou protendidas esse é um importante aspecto do dimensionamento. O projetista que quiser fazer estas verificações poderá usar as instruções da EF 96 (MINISTÉRIO DE FOMENTO DA ESPANHA, 1997). Houve apenas um estudo experimental exploratório de cisalhamento de nervuras com vigotas de concreto feito por FLÓRIO (2001), do qual se retirou as fotografias 1 e 2.



FOTOGRAFIA 1 –fissura na lateral da nervura após o colapso, carga a 35 cm do apoio, inclinação de trincas é menor que 450



FOTOGRAFIA 2 - fissura na lateral da nervura após o colapso, concreto junto ao apoio se soltou. Inclinação das trincas bem menor que 450

A primeira menção sobre o trabalho das sinusoides da treliça aparece em CAIXETA (1998) que concluiu pelo não funcionamento dessas para resistir ao cisalhamento vertical. Essa conclusão foi confirmada nos experimentos de ASSIS (2005). Convém lembrar que ambos estudavam problemas de flexão e ensaiaram protótipos simplesmente apoiados. O assunto merece reflexão pois se o banzo superior, onde estão ligadas as sinusoides da treliça, por ser de aço deve ficar a pelo menos 2 cm da face do concreto (recomendação

de cobrimento da norma). Espera-se que a treliça metálica funcione ao cisalhamento apenas quando a altura da linha neutra seja maior que esse valor. Pode, portanto acontecer a situação mostrada na figura 8, onde o banzo superior se encontra abaixo da linha neutra de flexão, o que em princípio, torna inútil a armadura inclinada. Em alguns pontos, como em seções próximas ao apoio externo, pode ocorrer da altura da linha neutra ser suficiente grande para que a armadura do banzo superior esteja acima desta, fazendo com que a sinusoide trabalhe ao cisalhamento. O mesmo pode não ocorrer em apoios intermediários.

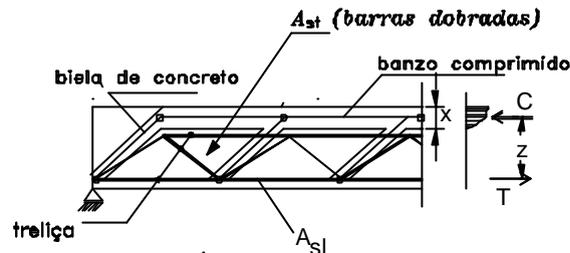


Figura 8 Esquema de uma nervura com a treliça metálica de armação com seu banzo superior abaixo do banzo comprimido da treliça hipotética e teórica de Morsch.

O conceito usado para projetar lajes nervuradas é usar largura de nervuras que evitem o uso de armadura transversal, ou seja, a nervura apresenta largura de valor suficiente para que o concreto possa resistir às tensões de cisalhamento. No caso das lajes com armaduras treliçadas o raciocínio pode ser o inverso, ou seja, tenta-se aproveitar a sinusoide para resistir ao cisalhamento vertical. Assim, estudos experimentais precisam ser desenvolvidos para mostrar como, e se, é necessário ancorar a armadura do banzo superior na região comprimida de concreto.

Assunto correlato ao cisalhamento foi estudado em BUSCARIOLO et alli (2003) que relata investigação sobre a possibilidade de punção da capas de lajes pré-fabricadas. Esse trabalho conclui que o fenômeno só ocorreria se a introdução de carga fosse feita em uma área equivalente de uma moeda de cinco centavos de real.

7 Estado limite de deformação e programas computacionais

Como já foi citado anteriormente o estado de deformação excessiva é, pelo menos nas lajes unidirecionais simplesmente apoiadas, a condição determinante de projeto. A partir da segunda metade da década de 90, pesquisadores brasileiros começaram a usar expressões nos cálculos das flechas que consideram a fissuração. O estudo mais simples e mais utilizado é o de BRANSON (1968) cuja expressão de inércia equivalente foi incorporada à NBR6118:2003. CARVALHO (1994) usou o procedimento de Branson para fazer cálculo automático não linear, que tem sido paulatinamente empregado por vários pesquisadores e pela maioria dos programas existentes hoje.

CAIXETA (1998), FLÓRIO (2001), FLÓRIO et alli (2003), PEREIRA (2002), ROGGE (2000), FURLAN et alli (2000), PEIXOTO (2003), MAGALHÃES (2001), e ASSIS (2005) obtiverem em ensaios, seja para lajes isostáticas ou para hiperestáticas, valores de flecha onde fica clara a necessidade da utilização de uma inércia equivalente para a seção transversal levando em conta a fissuração do concreto. Deve-se apenas tomar cuidado ao fazer o cálculo de elementos com pequena altura de maneira que, ao considerar a fissuração do concreto juntamente com outras expressões simplificadoras, não se obtenha flechas muito grandes e irreais.

KATAOKA (2004) considera, em um cálculo de flecha, os efeitos da largura do apoio das nervuras (paredes ou vigas que servem de apoio), a existência de paredes sobre os apoios que podem evitar o giro desses, a contribuição da armadura do banzo superior

combatendo o momento negativo sobre os apoios extremos e por fim a existência e funcionamento de contrapiso de regularização como parte da seção transversal trabalhando para resistir a carga accidental. Exemplo ilustrativo da autora mostra que para pequenos vãos (o exemplo adota um vão de 4,0 m) o valor da flecha levando em conta todos estes efeitos é bem menor do que o calculado com os procedimentos da maioria dos programas. KATAOKA faz também uma análise dos principais programas computacionais existentes no mercado tentando analisar o modelo de cálculo adotado por cada um deles. A autora analisou FLORENTINO (1997), BELGO-MINEIRA (2002), GERDAU (2002) e TQS (2003).

A flecha diferida é bem maior que a instantânea devido a retração e principalmente fluência do concreto. O grupo da UFSCar desenvolve programa experimental que já dura quatro anos monitorando flechas de protótipos isostáticos e hiperestáticos, alguns localizados dentro de uma câmara climatizada. Pode-se citar os trabalhos de ROGGE (2000), ROGGE et Alli (2002), KATAOKA et alli (2004) e KATAOKA (2005).

As conclusões desses trabalhos mostram que a flecha ao longo do tempo, obtida experimentalmente, é muito maior do que a prevista pelo coeficiente a_f da NBR6118:2003. Concluem também que os processo simplificado não tem boa precisão. A figura 9 mostra gráfico onde são comparados valores de flecha teóricos e experimentais, incluindo as deformações ao longo do tempo. Estudo em desenvolvimento, a ser relatado posteriormente, mostra que processo de elementos finitos considerando fissuração e carregamento incremental chega a valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. Os trabalhos analisados aqui mostram que os sistemas hiperestáticos tem coeficiente de fluência (relação da flecha diferida pela imediata) menor que os isostáticos.

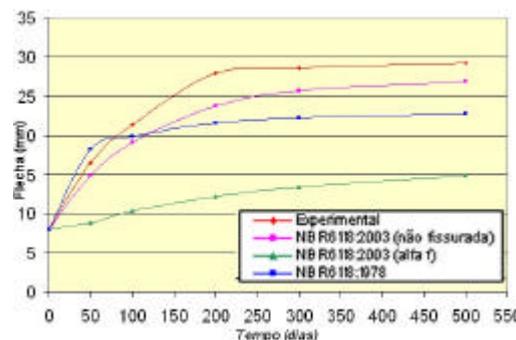


Figura 9. Flechas teóricas e experimentais (mm) ao longo do tempo para protótipo C, dos trabalhos de ROGGE e KATAOKA simplesmente apoiado com 11 cm de altura e 4 m de vão

8 Normas

Em 2002 a ABNT publicou diversas normas relativas às lajes pré-moldadas: NBR-9062, NBR 14859 (partes 1 e 2), NBR 14860-1 (partes 1 e 2), NBR-14862. Todas, de uma maneira geral, tratam apenas de especificações. A norma que realmente trata do cálculo das lajes pré-fabricadas é a NBR6118:2003, tendo sido comentados a maioria dos seus procedimentos ao longo deste texto.

Cabe ainda salientar algumas especificações que mudarão com certeza o detalhamento do projeto deste tipo de lajes. A primeira diz respeito ao cobrimento mínimo das armaduras, principalmente para ambientes de agressividade II, III e IV que requerem um cobrimento mínimo de 20, 30 e 40 mm (já considerando o fato da laje ser pré-fabricada). Uma vez que as formas atuais têm altura de 30mm, essas se tornaram inviáveis para esses cobrimentos. Assim, ou simplesmente se muda a espessura da sapata ou se desenvolve um programa que mostre ser possível obter-se durabilidade adequada com cobrimentos menores que os prescritos atualmente.

Outro ponto alterado na nova versão da norma 6118:2003, é que esta não mais

obriga ao projetista lançar mão na lajes unidirecionais de nervuras transversais. Muitos construtores acreditam que é necessário considerar nervuras transversais em diversas situações. Assim, o projetista deve ficar atento para considerar esta possibilidade.

9 Reforço

Em muitas situações seja por incorreção de projeto, ou má execução ou mesmo por mudança de destinação de uma laje é preciso prever reforço a uma estrutura já existente. Trabalho específico sobre o reforço de lajes pré-fabricadas foi desenvolvido em ASSIS (2005) de forma teórica e experimental. O trabalho, de ótima qualidade, permite aos projetistas realizar reforços acrescentando concreto na face superior da laje e obter uma resistência maior do sistema.

10 Conclusões

Embora não tenha havido nestes anos todos uma coordenação centralizada sobre pesquisa para o projeto e cálculo de lajes pré-fabricadas com vigotas de concretos percebe-se que muito já foi realizado. Diversos centros de pesquisas como a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Santa Catarina, Escola de Engenharia da Universidade de Campinas, Universidade Nacional de Brasília, Universidade Federal de São Carlos e Universidade Federal de Goiás têm atuado na pesquisa do assunto nos últimos anos promovendo o desenvolvimento do sistema.

Os pontos ainda a se avançar principalmente em pesquisa experimental são:

- A questão do cisalhamento e a verificação do trabalho das armaduras inclinadas da treliça de armadura;
- Estudar a plastificação de seções nos apoios;
- Estudar se é possível usar cobrimentos menores que o recomendado pela norma NBR6118:2003 atendendo ainda as condições mínimas de durabilidade;
- Obter um processo simples que permita prever as flechas ao longo do tempo com maior precisão;
- Planejar um programa de estudo para outros tipos de lajes pré-fabricadas como as alveolares, painéis, entre outros.

Finalmente vale acrescentar que hoje os projetistas já dispõem de bibliografia teórica e programas com recursos adequados para realizar projetos de pisos de lajes pré-fabricadas com segurança, economia, funcionabilidade e durabilidade.

11 Referências

- ASSIS, E. A. R. (2005). **Análise experimental de lajes treliçadas reforçadas pela face superior**. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Goiás- Goiânia .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). **Cálculo e execução de estruturas de concreto armado** (NBR 6118/80). Rio de Janeiro, RJ,.
- ____ (2003). **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento** (NBR 6118:2003). Rio de Janeiro, RJ,.
- ____ (1985). **Projeto e Execução de Estruturas de concreto Pré-moldado –(NBR-9062)**. Rio de Janeiro, RJ,
- ____ (2002). **Laje pré-fabricada – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais (NBR 14859-1)**. Rio de Janeiro, RJ,
- ____ (2002).. **Laje pré-fabricada – Requisitos - Parte 2: Lajes bidirecionais (NBR 14859-2)**. Rio de Janeiro, RJ,
- ____ (2002). **Laje pré-fabricada – Pré-laje - Requisitos Parte 1: Lajes bidirecionais (NBR 14860-1)**. Rio de Janeiro, RJ,
- ____ (2002).. **Laje pré-fabricada – Pré-laje - Requisitos Parte 2: Lajes bidirecionais (NBR 14860-2)**. Rio de Janeiro, RJ,
- ____ (2002). **Armaduras treliçadas - Requisitos (NBR-14862)**. Rio de Janeiro, RJ,.

- BELGO-MINEIRA C.S. **Programa Treliças Belgo 1.0** – Mídia eletrônica – São Paulo, agosto, 2002.
- BOCCHI Jr., C. F (1995).. **Lajes Nervuradas de concreto armado projeto e execução**. Dissertação (Mestrado), USP. São Paulo. SP.
- BORGES, J.U.A. (1997).**Critérios de projeto de lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas**. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP,
- BRANSON D. E. (1968). **Procedures for Computing Deflections**. ACI Journal; New York, USA,
- BUSCARIOLO L. G., CARVALHO R. C., FIGUEIREDO FILHO J. R., FURLAN JUNIOR S., (2003) **Estudo experimental do comportamento da região das mesas de lajes com nervuras parcialmente pré-moldadas: Consideração da punção**. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto São Paulo-SP,
- CAIXETA, D. P. (1998).**Contribuição ao estudo de lajes pré-moldadas com vigas treliçadas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas
- CALAVERA, J. R.; PEIRETII, H.C.; GOMEZ, J. F.; GONZALEZ , J. L. (1988) .**Estudio experimental sobre el comportamiento en servicio y agotamiento por flexion de forjados unidireccionales de hormignon armado**. Colloquia. Madrid,
- CARVALHO, R. C. (1994) .**Análise não-linear de pavimento de edifícios de concreto através da analogia de grelha**. Tese (Doutorado). EESC -USP. São Carlos, SP,
- CARVALHO, R. C., FIGUEIREDO FILHO, J. R., FURLAN Jr. S (1998). **Reações nas vigas de apoio em pavimentos executados com lajes pré-moldadas**. In 40º Congresso Brasileiro do Concreto. RJ..
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FURLAN JUNIOR, S. (1998).**Processo aproximado para o cálculo de lajes pré-moldadas nervuradas**. III Congresso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG.
- CARVALHO R. C. (2000) **Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras do tipo trilho e treliçadas para pavimentos de edificações** Relatório final do processo 99/04607-8 – FAPESP –São Carlos
- CARVALHO R. C., FIGUEIREDO Fº J. R. (2001). **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Editora da UFSCar. São Carlos,
- CARVALHO R. C., FIGUEIREDO Fº J. R. (2004). **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 2ª Edição -Editora da UFSCar. São Carlos,
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (1998). **Ductility of reinforced concrete strutures** *Bulletin d'Information*, n. 242.
- DI PIETRO, J. E. (1993). **Projeto, execução e produção de lajes com vigotes pre-moldados de concreto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- DROPA Jr, A. (1999). **Análise Estrutural de Lajes Formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. Dissertação (Mestrado). EESC-USP. São Carlos, SP.
- DROPPA JÚNIOR A. (2003). **TRELIÇAS BELGO 1.0** – programa automático para cálculo de nervuras treliçadas distribuído pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira – Mídia magnética. Belo Horizonte, MG.
- DROPPA JÚNIOR A. (2003). **Programas PumaWin, CorTel** - programa automático para cálculo de escoramento de nervuras treliçadas distribuído empresa PUMA – Mídia magnética. São Paulo.
- DROPPA JÚNIOR A., EL DEBS M. K. (1998). **Análise não-linear de lajes formadas por vigotas pré-moldadas com armadura em forma de treliça**. Congresso de Engenharia Qvil, 3 Juiz de Fora : UFJF-FE.
- DROPPA JÚNIOR A, EL DEBS M. K. (1999). **Análise não-linear de lajes pré-moldadas com armação treliçada**, Congresso Brasileiro do Concreto, 41, São Paulo : IBRACON,
- DROPPA JÚNIOR A., EL DEBS M. K (2000). **Um estudo teórico-experimental do comportamento estrutural de vigotas e painéis com armação treliçada na fase de construção** [CD-ROM]. Congresso Brasileiro do Concreto, 42. IBRACON,São Paulo.
- EL DEBS M. K. (2000). **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. Livro Técnico. EESC-USP , São Carlos, SP.
- EL DEBS M. K., DROPPA JÚNIOR A. (1999). **Critérios para dimensionamento de vigotas com armação treliçada nas fases de construção** Relatório Técnico. EESC-USP , São Carlos, SP.
- FLORENTINO REGALADO TESORO (1997). **Los forjados reticulares**. Manual Practico. Cype Ingenieros.
- FLÓRIO, M. C. (2001) **Estudo experimental de vigotas pré-moldadas e nervuras de concreto armado para execução de lajes unidireccionais**. Relatório final de iniciação científica 00/11854-0-0, Fapesp. São Carlos, SP..
- FLÓRIO M. C. (2003); **Projeto e execução de lajes pré-fabricadas unidireccionais com vigotas em concreto armado**. Dissertação de mestrado Universidade Federal de São Carlos.
- FLÓRIO M. C.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; FURLAN JUNIOR, S.; (2003). **Flecha em lajes com vigotas pré-moldadas considerando a fissuração e uso da Expressão de Branson**.. 45º Congresso Brasileiro do Concreto.Vitória, ES..
- FORTE F. C.; FANGEL L.; ARADO F. B. G; CARVALHO, R. C.; FURLAN JUNIOR, S.; FIGUEIREDO

- FILHO, J. R.; **Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras do tipo treliça**. 42º Congresso Brasileiro de Concreto -IBRACON. Fortaleza, CE. 2000.
- FURLAN JUNIOR, S. - FIGUEIREDO FILHO, J. R. - CARVALHO, R. C. - MERLIN, A. (2000) **Lajes pré-moldadas de concreto: a consideração da plastificação nos valores dos momentos negativos em elementos hiperestáticos e seus efeitos no dimensionamento do pavimento**. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural “. Punta del Este, Uruguai,
- GASPAR, R. (1997). **Análise da Segurança Estrutural das Lajes Pré-fabricadas na Fase de Construção**. Dissertação (Mestrado). USP. São Paulo. SP.
- GERDAU, 2002. **Software de cálculo de lajes treliçadas**. Mídia eletrônica. São Paulo,
- GIMENEZ E.; CARVALHO, R. C.; FURLAN Jr, S.; FIGUEIREDO FILHO J. R.. (2000). **Determinação da altura de lajes com nervuras pré-moldadas atendendo o estado limite último e de serviço (deformação) de acordo com a NB1-1999**. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, SP.
- KATAOKA M. N. (2004). **Projeto de lajes com vigotas pré-fabricadas de concreto de acordo com as novas normas brasileiras**. Relatório de iniciação científica, São Carlos, SP.
- KATAOKA, L. T. (2005). **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas de concreto**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP
- KATAOKA, L. T.; MELLO, A. L. V.; ROGGE, A. C.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.(2004). **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas**. Anais. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. 14 a 18 de agosto de 2004. Florianópolis, SC, Brasil.
- LIMA, J. N. (1999) **Estudo Experimental de Lajes Nervuradas de Concreto Armado Moldadas in loco com armadura convencional e treliçada simples**. Dissertação (Mestrado). UnB, Brasília, DF.
- MAGALHÃES, F. L. (2001). **Estudo dos momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo nervuras com armação treliçada**. Dissertação (Mestrado). EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- MEDITERRÂNEA. (1992). **Manual de tabelas práticas**. Noticiário Mediterrânea, ano 3, nº 4. Campinas, SP.
- MEDITERRÂNEA PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO (1993). **Boletim Técnico: Sistema Treliçado Global**. 4a. Edição Campinas, SP,
- MERLIN, A. J. (2002). **Momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por vigotas de concreto protendido**. Dissertação de Mestrado. EESC, São Carlos, SP.
- MESQUITA V. V.; CARVALHO R. C.; FIGUEIREDO Filho J. R.+FURLAN Jr. S., (2000). **Escolha da altura de lajes com nervuras pré-moldadas para pavimentos de edificações considerando as verificações do estado limite último e de deformação excessiva**. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, “Jubileo Profesor Julio Ricaldoni”. Punta del Este, Uruguai.
- MINISTÉRIO DE FOMENTO DA ESPANHA (1997). **EF 96. Instrucción para l proyecto y la ejecucion de forjados unidireccionales de hormigon armado o protenado**. Madrid, Espanha..
- PEIXOTO, E. M. O.; CARVALHO R. C.; FURLAN Jr S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. (2002) **Os efeitos da vibração mecânica do concreto no comportamento à flexão de lajes com vigotas pré-moldadas** Anais. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. 17 a 22 de agosto de 2002. Belo Horizonte, MG, Brasil
- PEIXOTO, E. M. (2002) **Os efeitos da vibração mecânica e cura controlada do concreto no comportamento à flexão de lajes com vigotas pré-moldadas**. Relatório final de iniciação científica - 01/06803-0, Fapesp. São Carlos, SP..
- PEREIRA, R. L. (2002) **.Estudo Experimental de Emenda em Vigotas Treliçadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO.
- ROGGE A. C . (2000) **.Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes com nervuras pré-moldadas**. Relatório parcial de iniciação científica – Processo 00/01898-0, Fapesp,São Carlos, SP,
- ROGGE, A. C.; TIRINTAN, M. R. A.; CARAVLHO, R. C.; SYDNEY, F. Jr.; FIGUEIREDO, J. F.. (2002) **Estudo experimental da deformação ao longo do tempo em lajes com vigotas pré-moldadas**. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Brasília, GO,
- SANTINI, C. R.; KATAOKA, L. T.; MELLO, A. L. V.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Projeto de pavimentos com lajes pré-fabricadas usando cálculo não linear**. Anais. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. 14 a 18 de agosto de 2004. Florianópolis, SC, Brasil.
- SILVA, L. M.; CARVALHO R. C., FIGUEIREDO FºFURLAN Jr. S. (2000).**Estudo experimental do espaçamento de escoras em lajes pré-moldadas com nervuras do tipo trilho**. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, “Jubileo Profesor Julio Ricaldoni”. Punta del Este, Uruguai.
- TQS INFORMÁTICA LTDA (2003). **CAD/TQS Manual de lajes treliçadas**. São Paulo, SP..
- TERNI, A.W., FERREIRA,J.B.; ROCHA, F.S.(1999) **Resistência a Solda de União Entre as Armaduras dos Sinusoides e Banzo Superior das Lajes Treliçadas** 41º Congresso Brasileiro do Concreto-Salvador Anais eletrônicos .