TEXTO EXTRAÍDO DO SITE WWW.VITRUVIUS.COM.BR

Sistemas estruturais para grandes vãos em pisos e a influência na concepção arquitetônica

Ricardo Henrique Dias

Ricardo Henrique Dias é engenheiro civil, Mestre em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, e professor no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

Dentre os desafios que a engenharia de estruturas enfrenta, um dos maiores relaciona-se à concepção de sistemas seguros e economicamente viáveis para estabilizar grandes vãos projetados pela arquitetura.

A maior aplicação dos grandes vãos acontece nas estruturas de pontes ou "obras-de-arte". Aparecem então estruturas caras e monumentais, aplicando o que há de mais atual em tecnologia dos materiais, modelos de análise e técnicas de execução.

Porém, grandes vãos são também exigidos para estruturas de coberturas, pela necessidade de abrigar um elevado número de pessoas em ambiente sem divisórias, em teatros, auditórios e ginásios, podendo aqui serem aplicados sistemas leves, como as membranas tensionadas têxteis, as treliças tridimensionais de alumínio ou aço, e as cascas curvas finas de concreto armado ou argamassa armada, entre outros.

A busca por grandes espaços em edificações está inserida em uma das mais importantes tendências que vêm orientando a evolução das técnicas de edificação dos últimos cem anos: a busca por maior flexibilidade (1). Havendo a necessidade de criar grandes vãos em pisos, possibilitando espaços com o mínimo de pilares ou outros elementos verticais, torna-se necessária a concepção de sistemas suficientemente rígidos à flexão, aplicando-se materiais como o aço e o concreto protendido, procurando a otimização das seções das peças compostas destes materiais, visando continuar obtendo soluções as mais leves possíveis. Isso porque a palavra chave, quando tratamos de grandes vãos, é deformação.

Figura 01: MASP - Arquiteto Lina Bo Bardi. Foto AG

Materiais estruturais para grandes vãos em pisos

O progresso da engenharia está intimamente ligado ao progresso da ciência dos materiais, e o que vê-se é um incremento das resistência do aço e concreto ao longo dos anos, o que possibilita a diminuição das seções das peças estruturais, e a possibilidade de aplicação a vãos cada vez maiores.

Antigamente tinha-se o uso da pedra, nas construções egípcias e na Idade Média, e da madeira, no século XVIII, onde os vãos foram sendo incrementados. A partir da revolução industrial começaram a ser aplicadas as estruturas metálicas, com vantagens ao uso da madeira, devido a relação entre peso próprio e dimensões das peças estruturais, escassez da madeira, e pela suposição de que o ferro fundido fosse mais resistente a incêndios, elevando a segurança das edificações industriais (2). Com o advento do uso do ferro e posteriormente do aço, com a revolução industrial, até a invenção do concreto, estes materiais foram tendo suas propriedades melhoradas (resistência e elasticidade), e uso cada vez mais difundido.

Figura 02: Grande Arco La Défense, Arquiteto Johan Otto Von Spreckelsen. Foto AG

Aço

O aço é obtido do carvão mineral ou do minério de ferro, com retirada de impurezas e promoção de adições pela siderurgia. Tem elevada resistência, tanto à compressão quanto à tração.

As principais características de uma estrutura constituída por materiais metálicos são: qualidade homogênea, esbelteza das peças resistentes, precisão na fabricação e montagem, necessidade de proteção contra corrosão e incêndios.

Os perfis utilizados em obras civis são dos tipos: laminados, soldados, tubulares e conformados a frio. Os perfis soldados são obtidos pelo corte de chapas de aço, em qualquer espessura, e soldagem das mesmas, formando as seções desejadas, em praticamente qualquer composição. São os perfis utilizados em grandes estruturas metálicas, com altura de até 1,5 m ou mais, para vãos da ordem de 15 a 20 m, dependendo dos carregamentos.

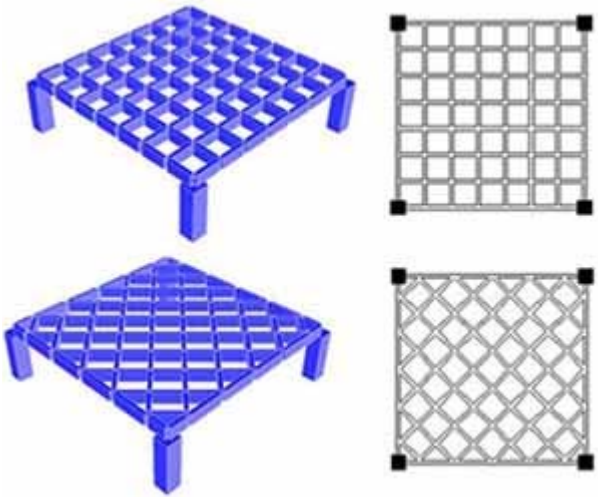

Figura 03: Grelhas de vigas com disposição ortogonal e diagonal

Concreto de alto desempenho (CAD), armado e protendido

O concreto, mistura de aglomerante com água e agregrados (miúdos e graúdos), desde o patenteamento do cimento Portland por Joseph Aspdin, em 1824, vem sofrendo sucessivos incrementos de resistência. Em 1931 a norma brasileira que regulamentava o uso do concreto nas obras civis indicava concretos com $f_{ck} \leq 12$ MPa, sendo f_{ck} a resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias. Na década de 1940 o f_{ck} utilizado era de cerca de 16 MPa; na década de 1990, esse valor já era médio de 25 MPa e, a partir do ano 2000, vê-se a possibilidade de concretos, com facilidade, da ordem de 40 a 50 MPa (3), chamados de concreto de alto desempenho (CAD), recebendo aditivos para melhora de diversas características, como por exemplo a trabalhabilidade. Têm baixíssima permeabilidade e excelente resistência mecânica; altos módulos de elasticidade e, dessa maneira, sofrem baixas deformações; têm reduzidos valores de deformações lentas, devido a carregamentos de longa duração. Podem ter alta resistência inicial, diminuindo o tempo de cura e agilizando a desforma das peças estruturais. É possível hoje a confecção de concretos com altíssima resistência, de pós-reativos, capazes de suportar compressões de até 800 MPa (4), mas de uso restrito a laboratórios.

Figura 04: Grelha de vigas da cobertura da FAUUSP, Arq. João Vilanova Artigas. Fonte: LSI.USP

Havendo concretos com elevada resistência à compressão, os mesmos possibilitam a aplicação em seções mais esbeltas que concretos menos resistentes, vencendo maiores vãos e aumentando a área útil das edificações.

Associados a armaduras passivas (barras de aço de construção) formam o concreto armado, moldado "in loco" ou pré-moldado. É o material estrutural mais aplicado em obras civis no mundo, devido à facilidade de criação de qualquer seção, mão-de-obra barata e não especializada para a confecção e materiais que o compõem disponíveis em qualquer região do planeta. Além do critério resistência, as peças formadas por concreto armado devem atender aos limites de deformações, e aí situa-se a fronteira de sua aplicação: vãos maiores pedem seções estruturais maiores, e o peso próprio das peças com grandes áreas transversais acaba tornando a nova seção inviável. As principais características do uso do concreto armado são: obtenção de peças monolíticas, durabilidade, alta resistência a choques e vibrações, bom condutor de calor e som, necessidade de escoramentos durante a fabricação, dificuldade de adaptações e reformas.

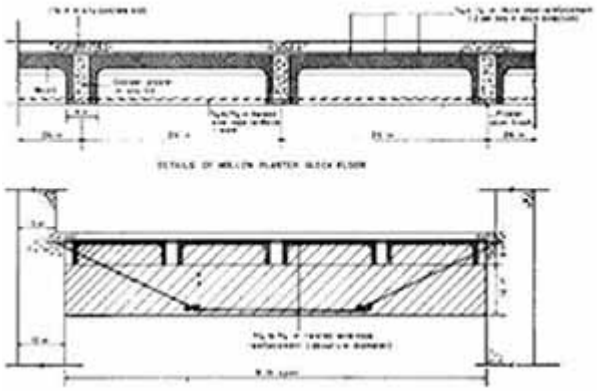

Figura 05: Laje nervurada patenteada por Wilkinson, Inglaterra, em 1854. Fonte: Lima

Com o advento do concreto protendido pôde-se extrair o máximo de eficiência dos materiais concreto e aço: concretos que suportam grandes

esforços de compressão podem ser pré-comprimidos, por cabos de aço pré-tracionados, e dessa maneira a peça estrutural vence maiores vãos, já que conseguem combater as deformações, podendo até anulá-las quando da atuação total dos carregamentos. A Figura 1 mostra o Museu de Arte de São Paulo Assis Chateubriand – MASP, de Lina Bo Bardi, com seu vão livre de 74 m, em um sistema de pórtico. A dificuldade em confeccionar concretos de elevada resistência e com consistência para ótima trabalhabilidade imposta pela época de execução, 1947, em nada se compara com a facilidade encontrada para se criar o Grande Arco de La Défense, com 80 metros de vão livre, que utilizou novos superconcretos, de custo altíssimo (Figura 2).

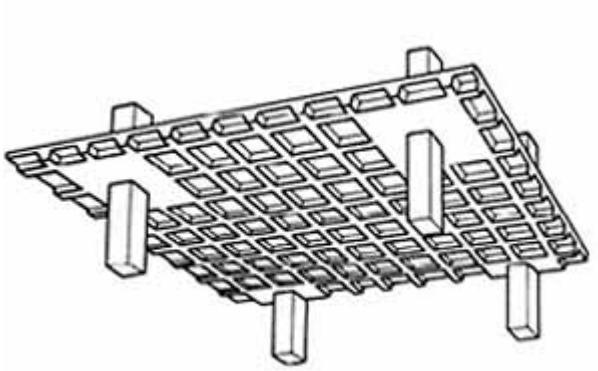

Figura 06: Lajes nervuradas sem vigas. Fonte: Nawy e Atex

Sistemas estruturais usuais para grandes vãos em pisos

Aproveitando o que há de melhor em materiais estruturais economicamente viáveis, diversas soluções podem ser aplicadas visando estabilizar grandes vãos em pisos de edificações civis. Além de sistemas usuais, novas possibilidades podem ser projetadas, de acordo com a criatividade do arquiteto e a sua ousadia na determinação das formas arquitetônicas.

Figura 07: Laje nervurada com vigas rígidas na periferia. Fonte: Atex

A importância do conhecimento das possibilidades estruturais, na concepção arquitetônica, reside na prévia análise das interferências das dimensões estruturais no pé-direito projetado, visando determinar a altura útil de maneira correta no projeto arquitetônico. Além disso, o aproveitamento da estrutura como linguagem estética da arquitetura só é possível com um projeto arquitetônico que demonstre a estrutura o mais fiel possível em relação ao resultado de sua execução, contemplando as soluções tecnológicas disponíveis para a sua concretização. Sob esse prisma, o trabalho conjunto de engenheiros de cálculo estrutural e arquitetos, no desenvolvimento do projeto arquitetônico, é fundamental.

Grelhas de vigas: metálicas, em concreto armado ou protendido

As vigas, elementos lineares onde os esforços que atuam nos elementos solicitam a massa da seção transversal do elemento estrutural, estão entre os elementos mais utilizados em pavimentos de edifícios. Recebem cargas transversais ao eixo que as define e, por terem rigidez, podem transmiti-las aos apoios, sofrendo os esforços simples: flexão, cisalhamento, torção. Podem também absorverem esforços normais, de tração ou compressão, quando carregadas segundo a linha que define o eixo longitudinal.

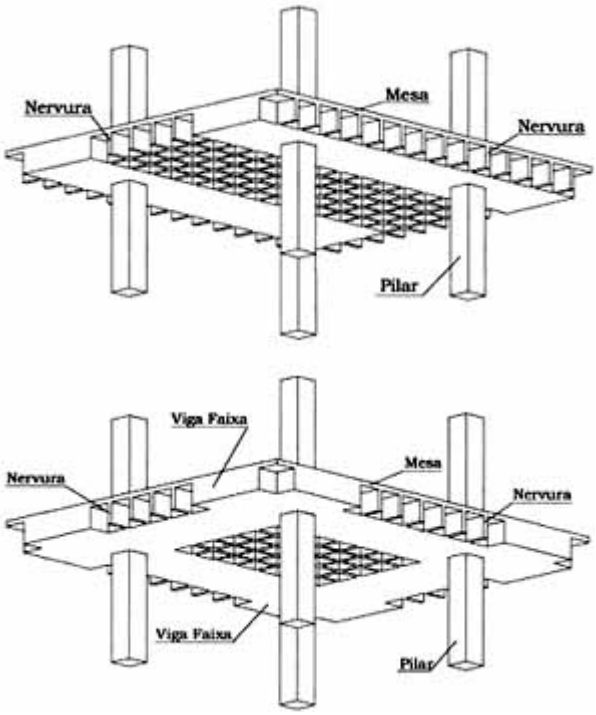

Figura 08: Laje nervurada com vigas-faixa protendidas em uma (acima) e duas (abaixo) direções. Fonte: Almeida Filho

Visando a utilização de vigas nos pavimentos de maneira a obter maiores distâncias entre apoios, estas são lançadas em sistema reticulado plano, denominado grelha, gerado pelo cruzamento rígido entre as vigas no plano do pavimento. Os reticulados podem ser ortogonais ou diagonais com relação às vigas periféricas; a disposição diagonal apresenta melhor comportamento, porém é de difícil execução. A Figura 3 demonstra as duas possibilidades. Para ser considerada grelha, quando feita em concreto armado ou protendido, as vigas devem ter espaçamento maior que 1,10 m entre eixos, segundo a Norma NBR6118/2003 – Projeto de Estruturas de Concreto, podendo o piso não ser colaborante na resistência das vigas (piso apoiado sobre a grelha).

Para ter maior eficiência é ideal que as distâncias entre pilares sejam aproximadamente iguais nas duas direções, onde essa hipótese é válida até uma relação L < 2.l, sendo L = maior vão entre pilares, em uma direção, e l = menor vão entre pilares na direção ortogonal. Quando essa relação não é atendida, as vigas de maior comprimento, para que o sistema continue eficiente nas duas direções, devem ser adequadamente enrijecidas; senão, pode-se imaginar o sistema funcionando apenas na

menor direção, com as vigas longitudinais podendo até serem mais espaçadas.

As grelhas podem ser executadas em aço, concreto armado ou concreto protendido. Sobre as vigas pode ser criada uma laje de concreto armado maciça moldada "in loco", protendida (para grandes vãos entre as vigas), ou colocada uma laje "steel deck". Lajes pré-moldadas em concreto armado e protendidas também são adequadas: laje alveolar ou seção "duplo T", usualmente. Os sistemas de vigas pré-moldadas constituem em ótima solução quando exige-se também rapidez de execução (para isso é necessária extrema modulação dos pilares). A independência do piso com relação à grelha de vigas permite a criação de domos, ou então de pisos de vidro, interessantes do ponto de vista arquitetônico.

A Figura 4 mostra a cobertura da FAUUSP, em São Paulo, em sistema de grelha de vigas, contendo vigas de seção variável, projetada pelo arquiteto João Vilanova Artigas.

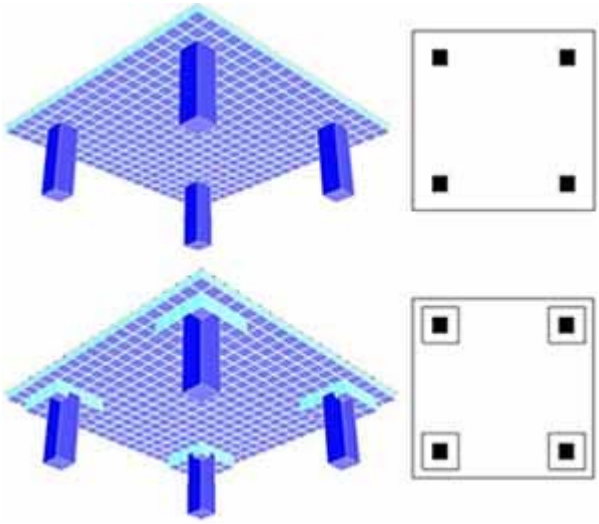

Figura 09: Lajes nervuradas maciças lisa e com engrossamento junto aos pilares

Lajes nervuradas em concreto armado e protendido

O mesmo reticulado de vigas pode ser feito, em concreto armado e protendido, considerando pequenos afastamentos entre os eixos de apoio, menores que 1,10 m, e levando em conta o piso como colaborante na resistência das nervuras à flexão. Este sistema é denominado de laje nervurada, e tem sua origem em 1854 (5), quando William Boutland Wilkinson patentou um sistema em concreto armado de pequenas vigas regularmente espaçadas, onde os vazios entre as nervuras foram obtidos pela colocação de moldes de gesso, sendo uma fina capa de concreto executada como plano de piso, conforme Figura 5.

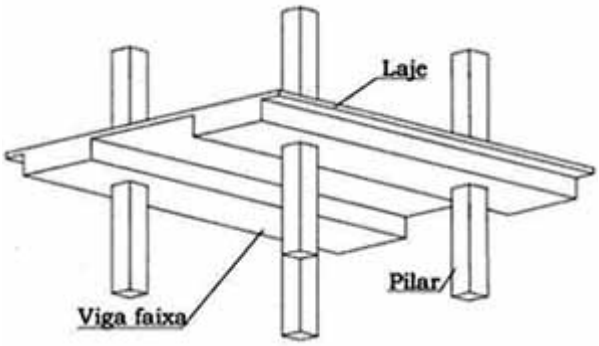

Figura 10: Laje protendida maciça com vigas-faixa. Fonte: Fonte: Almeida Filho

No sistema nervurado tem-se um alívio do peso próprio da estrutura e um aproveitamento mais eficiente dos materiais, aço e concreto, já que a mesa de concreto resiste aos esforços de compressão e a armadura os de tração, sendo que a nervura de concreto faz a ligação mesa-alma (6). Os vazios são obtidos com moldes plásticos removíveis ou então pela colocação de material inerte perdido, como por exemplo o isopor ou peças cerâmicas.

Pode-se ter, para as lajes nervuradas, painéis apoiados em vigas mais rígidas que as nervuras, num sistema chamado de convencional. Contudo, também são aplicadas em pisos de lajes sem vigas, conforme Figura 6, gerando assim um teto de espessura única, sem elementos abaixo da linha inferior das nervuras, o que é vantajoso na determinação das alturas livres internas dos compartimentos de uma edificação. Nesse caso tem-se o apoio diretamente no pilar, sendo necessário que a região em torno dos pilares seja maciça para absorver os momentos negativos que surgem no entorno dos pilares internos e resistir ao efeito de puncionamento, que é a tendência à perfuração da laje pelo pilar, que ocorre nessa regiões.

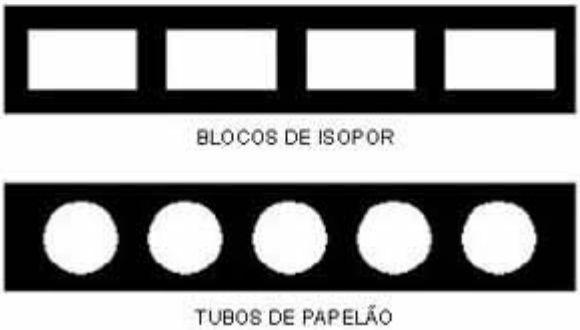

Figura 11: Laje

Em algumas lajes desse sistema podem ser colocadas vigas de borda, conforme Figura 7, com a função de diminuir os momentos fletores e deslocamentos, absorvendo também a torção e a punção alí geradas.

Diversas variações podem ser obtidas pela protensão às lajes nervuradas; uma das mais interessantes é a criação de faixas maciças, embutidas ou não na espessura da laje nervurada, ligando os pilares periféricos e centrais em uma ou duas direções, conforme Figura 8.

O pré-dimensionamento destas estruturas protendidas, para a determinação da altura da laje, fica determinado pela seguinte equação: h = l/23 a l/28, sendo h = altura da laje nervurada e l = distância entre os

apoios (pilares), em cm. Podem chegar a vãos da ordem de 20 m (7).

Para o pré-dimensionamento destas lajes, em concreto armado, pode ser utilizado ábaco apresentado por Rebello (8).

Lajes lisas e cogumelo protendidas, sem e com vigas-faixa

Visando obter tetos sem a presença de elementos enrijecedores nas lajes, tem-se a solução estrutural de laje maciça protendida, sem vigas, também chamada de lajes lisa protendida. A placa é apoiada diretamente sobre os pilares. Este tipo de solução está sendo muito utilizado atualmente, principalmente em edificações residencias e comerciais. A ordem máxima de vão obtido com esse sistema é de 12 m; para vãos maiores a laje torna-se demasiadamente espessa, inviabilizando o seu uso.

As lajes maciças sem vigas também sofrem o efeito do puncionamento junto aos pilares, ou seja, forças cortantes elevadas nos apoios que tentam furar o pano de laje; dessa maneira, outra solução viável para esse sistema é criar um enrijecimento junto aos pilares, por meio de um engrossamento da laje (ábaco) ou um engrossamento do pilar (capitel, que pode ser em tronco de pirâmide ou de cone). Este sistema é também denominado de laje cogumelo protendida e, com esse sistema, pode-se diminuir a espessura da placa fora da região do pilar.

A protensão das lajes geralmente é feita por meio de cordoalhas engraxadas de aço flexível colocadas dentro de tubos plásticos para não aderirem ao concreto, em um sistema de protensão denominado "sem aderência", onde o efeito da tração do cabo é transmitido por meio de ancoragens nas bordas da laje.

Abaixo tem-se a Figura 9, onde são apresentadas estruturas em lajes protendidas com e sem engrossamento junto aos pilares.

As lajes lisas sem vigas têm a espessura pré-dimensionada da seguinte maneira: h = l/30 a l/40, sendo h = altura da laje maciça e l = distância entre os pilares, em cm. As lajes cogumelo (com engrossamentos junto aos pilares) têm a espessura pré-dimensionada por: h = l/34 a l/44 (9).

Outra possibilidade de aplicação da laje protendida moldada "in loco" é a criação de vigas-faixa ligando os pilares, em uma ou duas direções. Esse recurso possibilita que, fora das faixas, a laje possa ter espessura menor que aquela obtida com uma laje de espessura constante. A Figura 10 mostra esse tipo de laje. Podem ter vãos máximos da ordem de 13 m, e têm o seguinte pré-dimensionamento para a laje: h = l/35 a l/45, sendo h = altura da laje maciça e l = distância entre os pilares, em cm. A faixa têm altura pré-estimada como h_{faixa} = l/18 a l/25, sendo h_{faixa} = altura da faixa maciça e l = distância entre os pilares, em cm (10).

Sistemas com seção caixão em concreto armado e protendido

As seções celulares são altamente resistentes à flexão, por possuírem grande inércia, e comumente aplicadas em pisos de pontes com grandes vãos. Este conceito também pode ser utilizado em estruturas de piso, possibilitando a criação do grande vão, além de possibilitar a existência de grandes balanços nas lajes.

Uma das maneiras mais usuais de aplicar os conceitos de seção celular, em pisos, é a configuração de lajes nervuradas com caixão perdido, ou seja, com mesas superior e inferior, obtidas pela colocação de um material inerte entre as duas camadas de laje (caixotes de madeira, blocos de

isopor ou tubos circulares de papelão, por exemplo), conforme Figura 11.

Nesse sistema o balanço pode ser implementado em função da mesa comprimida existente na face inferior, onde a nervura pode ser considerada como uma seção "I", diferente de uma laje nervurada com capa apenas superior: nestas, na região de momentos fletores negativos (aqueles que tracionam em cima), não existindo a capa inferior, somente as seções retangulares das vigas deverão suportar à flexão, sem a colaboração da laje para a formação de seções "T" mais resistentes.

Para o pré-dimensionamento destas lajes, em concreto armado, pode ser utilizado ábaco apresentado por Rebello (11).

Comentários finais

Grandes vãos em pisos pedem soluções estruturais que apliquem os materiais mais resistentes e menos deformáveis, em tipologias adequadas à forma arquitetônica e que organizem a distribuição dos carregamentos até os apoios, preferencialmente locados de maneira modulada nas direções ortogonais.

A prévia escolha da tipologia estrutural tem a importância de fornecer subsídios à representação correta da arquitetura, por meio da definição de alturas livres e, consequentemente, pés-direito adequados.

Além disso, pode-se tirar proveito da linguagem estrutural para a estética da Arquitetura.

Enfim, como mostrado em Engel (12), o agente responsável pela arquitetura, seu projeto e sua realização é o arquiteto; é ele, então, quem desenvolve o conceito de estrutura para seus projetos em sua linguagem profissional.

Notas

1 DORFMAN, G. *Flexibilidade como balizador do desenvolvimento das técnicas de edificação no século XX.* Disponível em: <www.unb.br/fau/pos_graduacao/cadernos_eletronicos/flexibilidade.pdf>. Acesso em 23 set 2003.

2 DORFMAN, G. *Op. cit.*

3 ABCP. *Concreto de alto desempenho (CAD)*. Associação Brasileira do Cimento Portland. CD-ROM, 1999.

4 REVISTA GLOBO CIÊNCIA. *A revolução do superconcreto.* Rio de Janeiro: Editora Globo, fev. 1998.

5 Cf. LIMA, E. L.; BALAT, V. H.; BISSIO, J. F. *Hormigón Armado: Notas sobre su evolución y la de su teoría.* Disponível em: <www.ing.unlp.edu.ar/construcciones/hormigon/ejercicios/sem-ha.pdf>. Acesso em: 23 set. 2003.

6 FRANCA, A. B. M.; FUSCO, P. B. *As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios*. São Paulo: Afala & Abrapex, 1997.

7 AALAMI. Cf. ALMEIDA FILHO, F. M. de. *Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

8 REBELLO, Y. C. P. *A concepção estrutural e a Arquitetura*. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

9 AALAMI. *Op. cit.*

10 AALAMI. *Op. cit.*

11 REBELLO. *Op. cit.*

12 ENGEL, H. (2002). *Sistemas Estruturais*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.

Bibliografia complementar

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Texto base para revisão da NB1/78-NBR61118:* Projeto de revisão e comentários. Rio de Janeiro, 2000.

ATEX. Apresenta descrição técnica (características e aplicação) de formas plásticas para a confecção de lajes nervuradas. Disponível em: <www.atex.com.br/fotos/fotografia.htm>. Acesso em 23 set. 2003.

ATHENAEUM. Apresenta biografia da Arq. Lina Bo Bardi. Disponível em: <www.athenaeum.ch/bobard08.htm>. Acesso em 18 nov. 2003.

DIAS, L. A. M. *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagens.* São Paulo: Editora Zigurate, 1998.

DIMIBU. Apresenta descrição técnica (características e aplicação) de tubos de papelão na construção civil. Disponível em: <www.dimibu.com.br/di05.htm#3>. Acesso em 18 nov. 2003.

LSI.USP. Apresenta biografia do Arq. João Vilanova Artigas. Disponível em: <www.lsi.usp.br/~artigas/home/images/fauin.jpg>. Acesso em 18 nov. 2003.

NAWY, E.G. *Reinforced concrete:* a fundamental approach. New Jersey: Pretince-Hall, 1995.

STRUCTURAE. Apresenta base de dados de tipologias e obras estruturais executadas no mundo. Disponível em: <www.structurae.net/en/photos/img324.php>. Acesso em 18 nov. 2003.