

Marta Etsuko Tamura
Waragaya

d

OMO DE IZUMO: *ESTUDOS*
INTEGRADOS SOBRE
ARQUITETURA, *ESTRUTURA* e
CONSTRUÇÃO

034

pós-

RESUMO

O presente trabalho traz uma análise crítica sobre o domo de Izumo e suas relações intrínsecas entre arquitetura, estrutura e sistema construtivo, verificando-se que as soluções adotadas refletem a interdisciplinaridade existente nessa obra, a qual alia conceitos de arquitetura de grandes vãos; estrutura mista em madeira laminada, conexões metálicas e construção racionalizada em *push-up*. Verifica também as características do espaço construído, comportamento do sistema estrutural e operações construtivas do domo de Izumo por meio do modelo físico e comparação gráfica.

PALAVRAS-CHAVE

Domo, arquitetura, estrutura, construção, madeira laminada, membrana.

CÚPULA DE IZUMO: ESTUDIOS
INTEGRADOS SOBRE
ARQUITECTURA, ESTRUCTURA Y
CONSTRUCCIÓN

RESUMEN

El presente trabajo hace un análisis crítico sobre la cúpula de Izumo y sus relaciones intrínsecas entre arquitectura, estructura y sistema constructivo, y en él se verifica que las soluciones adoptadas reflejan la interdisciplinaridad existente en esta obra, la cual alía conceptos de arquitectura de grandes vanos; estructura mixta en madera laminada y conexiones metálicas y construcción racionalizada en *push-up*. Se verifica también las características del espacio construido, comportamiento del sistema estructural y operaciones constructivas de la cúpula de Izumo, a través de modelo físico y de comparación gráfica.

PALABRAS CLAVE

Cúpula, arquitectura, estructura, construcción, madera laminada, membrana.

IZUMO DOME: INTEGRATED STUDIES
ABOUT ARCHITECTURE, STRUCTURE
AND CONSTRUCTION

ABSTRACT

This work presents a critical analysis about Izumo dome and the intrinsic relations among architecture, structure and construction method, verifying that the adopted solutions reflects the interdisciplinarity existent in this work, which ally concepts of large spans architecture; mixed structure in laminated timber and metallic joints and rationalized construction in push-up. Verify it, as well, the characteristics of the constructed spaces, structural system's behavior and the constructors operations, through a physical model and graphics comparisons.

KEY WORDS

Dome, architecture, structure, construction, laminated timber, membrane.

INTRODUÇÃO

A partir das duas últimas décadas do século 20 implantaram-se, no Japão, vários equipamentos esportivos em cidades de pequeno e médio portes, como estratégia de planejamento voltado ao desenvolvimento turístico em cidades periféricas, detentoras de potencial histórico ou natural.

Assim, na década de 1990, foram construídos estádios esportivos multifuncionais com grandes vãos e espaços cobertos, adotando-se soluções arquitetônicas, estruturais e tecnológicas imensamente inovadoras quanto ao uso das estruturas de superfície de dupla curvatura, tais como os domos de Odate e Izumo, entre outros. Esses exemplos procuram sintetizar forma e estrutura em conjunto integrado, fazendo-se uso simultâneo de diferentes materiais, tais como madeira, aço, concreto armado e membranas sintéticas, com otimização de suas características estruturais e construtivas; emprego de conceitos de estrutura mista e utilização de equipamentos mecânicos de grande porte, possibilitando a realização de obras caracterizadas por extrema leveza estrutural e arquitetônica e também com o consumo mínimo de materiais. São manifestações de relevante contribuição à arquitetura contemporânea e ao desafio histórico do homem em vencer grandes vãos e construir espaços que abriguem a coletividade.

Este artigo apresenta uma síntese da pesquisa acadêmica sobre o domo de Izumo, uma cúpula com diâmetro de 146 m e altura de 50 m aproximadamente, construído em madeira laminada estrutural, conectores e tensores metálicos e membrana sintética do tipo “teflon”, possuindo área construída de 16.160 m². As informações referentes ao projeto arquitetônico, estrutura e construção do domo de Izumo foram obtidas por fontes primárias e secundárias: Memorial Descritivo do Projeto, cedido gentilmente pela Construtora Kajima Corporation, autora do projeto e responsável pela construção; publicações em revistas técnicas japonesas, e fotografias do local, cedidas por profissional da área.

Sob coordenação da autora do artigo, foram construídos um modelo físico do domo na escala 1:100 e detalhes de articulações estruturais na escala 1:5, no Laboratório de Arquitetura e Urbanismo da Universidade São Marcos, a fim de simular o sistema construtivo e estrutural, possibilitando reconhecer as características do comportamento físico do objeto.

A pesquisa como um todo objetivou analisar as relações entre os projetos de arquitetura e estrutura e aprofundar o conhecimento do processo construtivo. Foram realizados estudos interdisciplinares para que a compreensão da obra e das soluções adotadas fosse a mais abrangente possível.

DOMO DE IZUMO E PARQUE DE ESPORTES

Situada na província de Shimane, a cidade de Izumo localiza-se, aproximadamente, a 250 km a oeste de Osaka. Está a menos de 10 km do mar do Japão e faz parte de um plano de desenvolvimento voltado ao turismo denominado “Matsue-Izumo International Sightseeing Model Area” (COUNCIL OF MATSUE, 1999, p. 26).

Para comemorar seus 50 anos de emancipação em 1991, a cidade de Izumo construiu um Parque Municipal Esportivo, cujo elemento principal é o domo de Izumo. Construção essa que, por sua magnitude e repercussão, contribuiu para a promoção turística, social e esportiva da cidade.

O parque, planejado como equipamento indutor de desenvolvimento urbano e regional, tem o caráter de centro difusor de qualidade de vida, com a prática de esporte para pessoas de todas as faixas etárias, nas mais diversas modalidades.

CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA DO DOMO DE IZUMO

Segundo boletim técnico (SHINGUIJUTSU JISSHI, 1990-1924), da empresa Kajima Co., autora do projeto e construtora responsável pela obra, destacam-se, a seguir, as principais diretrizes do partido e programa arquitetônico. A concepção do domo procura expressar a tradição e a cultura da arquitetura em madeira, intimamente absorvida pelo povo japonês. Esse projeto busca vivificar a sensação do material partindo de uma nova percepção, fazendo uma releitura da tradição, a qual inspira o projeto pela semelhança com o guarda-chuva japonês ou *janomegasa*, feito com papel de arroz, estrutura em bambu e barbantes de algodão. O projeto arquitetônico do domo, por sua vez, explora, ao máximo, a leveza da madeira e da membrana sintética, aliando a utilização de barras e cabos de aço como tensores. A seguir, vê-se um exemplo do guarda-chuva japonês.



Figura 1: Guarda-chuva japonês
Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005



Figura 2: Vista do acesso principal ao domo de Izumo
Crédito: Foto do arquivo da arquiteta Fabiana Hirakata, Izumo, 1992

A concepção do projeto leva em consideração três escalas de percepção da membrana:

1. Escala do entorno: a partir da linha do horizonte, possibilitar a visualização do objeto a distância, possuindo grandes proporções com nuances de sombras variadas. Propõe-se uma composição da paisagem do parque que possibilite perceber o senso das estações, utilizando-se elementos naturais como

água, vegetação e espaços abertos, que se modificam nas diferentes épocas do ano. Procurou-se fundir a grande cobertura às plantações de arroz existentes no entorno e às montanhas no norte.

2. Escala da arquitetura: agregar equipamentos de conexão entre as vias de acesso e o domo, tal como o centro de convivência e serviços locais, criando-se, na escala intermediária, vistas que se transformam ao longo do percurso.

3. Escala do homem: propõem-se aberturas em todo o perímetro do domo, sendo estas variáveis conforme as estações. Ao aproximar-se do domo, é possível visualizar os detalhes construtivos.

PROGRAMA QUALITATIVO

O programa arquitetônico pressupõe as seguintes características e qualidades de espaço interno, que foram incorporadas aos projetos de arquitetura e estrutura:

- Utilização de membrana única, que proporcionasse claridade, tornando desnecessário o uso de luz artificial durante o dia, e também fornecendo iluminação radial favorável a qualquer uso ou esporte;
- sistema de abertura variável em todo o perímetro, com caixilhos basculantes de até 6 m de altura com controle mecânico, possibilitando visualizar os jardins;

- utilização da madeira visando ao aquecimento no inverno; e, sendo um material resistente à salinização, não deteriora com a umidade e não necessita de manutenção de pintura;

- flexibilidade de leiaute da arena, obtida pela movimentação da arquibancada. Os usos podem variar entre beisebol, futebol de campo, pista de 250 m rasos, sumô, futebol americano, jogos poliesportivos, shows e exposições.

O espaço externo seguiu os seguintes pressupostos de projeto:

- Banco de terra externo com taludes ajardinados, barrando os ventos do oeste que carregam a neve no inverno;
- zona de segurança e proteção em talude, fazendo contenção de folhas secas, pingentes de gelo e degelo de neve da cobertura, com a divisória vazada de madeira;

- espaços externos integrados com o domo, voltados para a cidade, convidando a população ao encontro e à prática esportiva.

PROGRAMA ARQUITETÔNICO

Compõe-se de três setores integrados entre si:

- Domo: contendo campo flexível para beisebol, futebol e outras modalidades; arquibancada fixa e móvel e serviços gerais para atletas, público e administração;

- setor oeste: estacionamento e serviços, equipamentos de apoio e lago recreativo;

- setor leste: esporte, recreação e lazer, aberto para uso da comunidade, contendo estacionamento para ônibus, quadras descobertas, *playgrounds*, lanchonetes, campos para atividades livres e riacho.

INSTALAÇÕES

As instalações técnicas abrangem:

- Equipamento de iluminação, sonorização, filmagem e transmissão para diversos tipos de eventos;
- controle de consumo de energia elétrica e utilização de energia eólica;
- sistema de reaproveitamento de água;
- mudança de leiaute do campo e arquibancadas motorizadas para diversos usos e modalidades.

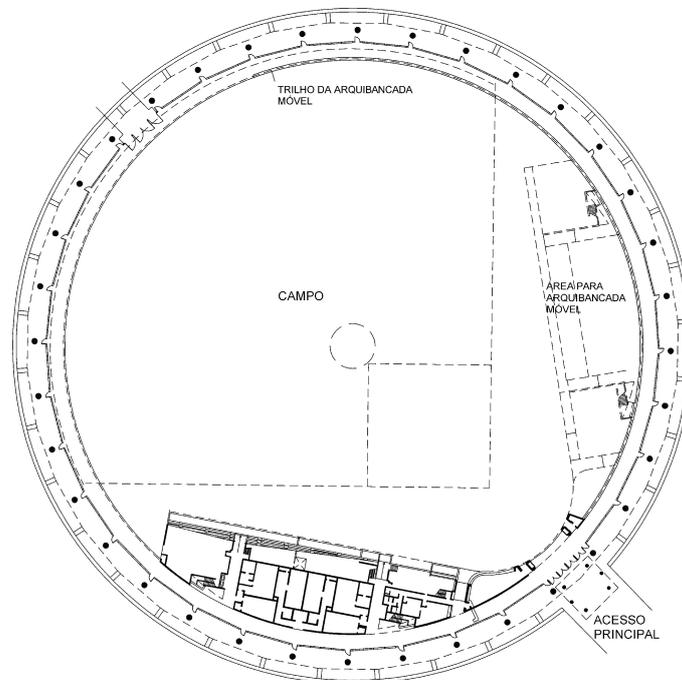


Figura 3: Planta
Crédito: Desenho original: Shinkenchiku Edição Especial, 1992, p. 18. Desenho para esta publicação elaborado pelo aluno Eduardo Bessa, do Programa de Iniciação Científica da Universidade São Marcos

pós-
040

PLANTA

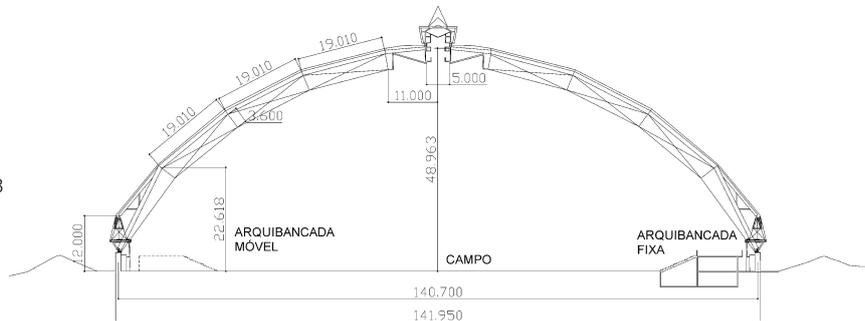
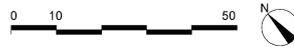


Figura 4: Corte
Crédito: Idem Figura 3

CORTE



SISTEMA ESTRUTURAL DO DOMO DE IZUMO

As informações, a seguir, sobre o sistema estrutural, têm como fonte a revista técnica japonesa *New Structure*, de março de 1991, p. 7-9.

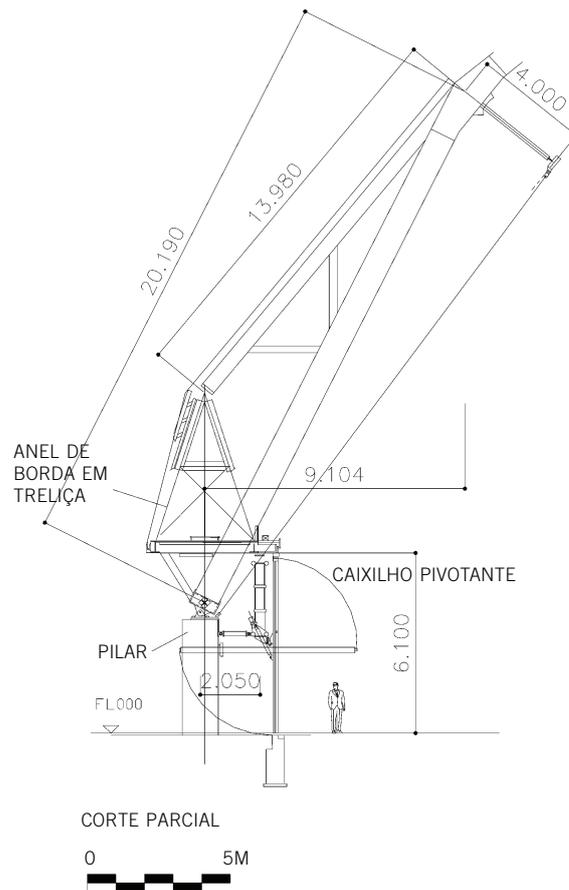
A concepção estrutural do domo de Izumo consiste de cúpula com cobertura em membrana. Está constituído por arcos em madeira laminada de grande seção, anel de compressão metálico, tubos de aço auxiliares, anéis de tração em cabos de aço, tirantes em barras de aço para concreto protendido (CP), cabos externos de estabilização e membrana sintética de fibra de vidro com resina politetrafluoretileno PTFE-teflon, espessura de 0,8 mm.

Explicando o sistema estrutural do domo de Izumo, tem-se: um anel superior de compressão, em estrutura metálica, com 22 m de diâmetro, a partir do qual são lançados 36 arcos de madeira laminada, separados em intervalos de 10°, que absorvem as movimentações e desenham a cúpula. Esse anel superior absorve os esforços de compressão e momento fletor advindos dos arcos.

Os arcos são apoiados por articulações metálicas aos 36 pilares de concreto armado, de 4 m de altura e diâmetro de 1,25 m. Estes são apoiados sobre blocos e estacas de concreto armado. Todos os blocos estão interligados por uma viga baldrame circular, em forma de anel.

pós- | 041

Figura 5: Corte parcial
Crédito: Idem Figura 3,
p. 21

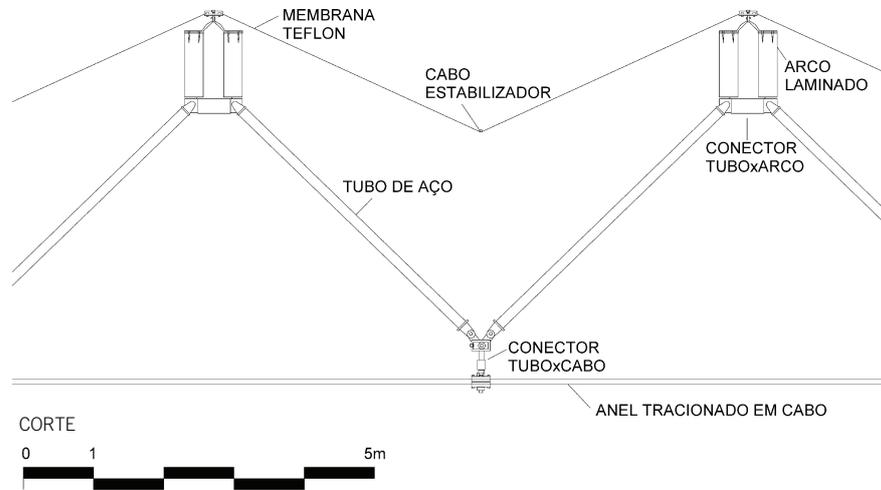


Para conter a tendência à flexão e torção dos arcos, estes estão unidos por quatro conjuntos de tubos de aço em “V”, conectados por cabos de aço, funcionando como anéis paralelos, os quais puxam os arcos para dentro, impedindo-os de deformarem-se. Os anéis paralelos são conectados aos arcos a uma distância aproximada de quatro metros.

O anel de borda da base do domo é constituído por treliça circular de vigas de madeira laminada e perfis de aço “I”. Esse anel trabalha a tração como uma cinta de amarração, impedindo a tendência de os arcos se abrirem na porção inferior.

Os anéis paralelos em cabos puxam os arcos por dentro e têm também a função de travar os esforços laterais. As barras de aço para CP acompanham os arcos radiais, formando, com os arcos, treliças tracionadas no plano inclinado, ao mesmo tempo trabalhando como contraventamentos e balanceadores de cargas.

Figura 6: Corte parcial da membrana
Crédito: Idem Figura 5



Os painéis da membrana são fixados entre os arcos e cabos externos, centralizados nesses vãos, pressionam-na para baixo, garantindo planicidade e estabilidade à cobertura, conforme Figura 6. Apresenta-se, então, uma superfície plissada, a qual contribuiu para se obter maior resistência aos esforços externos e manter uma forma estável.

Os anéis de tração estão internos aos arcos, e como não existem peças laterais fixadas às peças de madeira, não há obstruções ou elementos rígidos em contato com a membrana, pois a mesma deve estar apoiada somente nos conectores de fixação elevados, para que não haja pontos sujeitos à punção e cisalhamento, o que acarretaria deterioração, deformação ou ruptura da membrana.

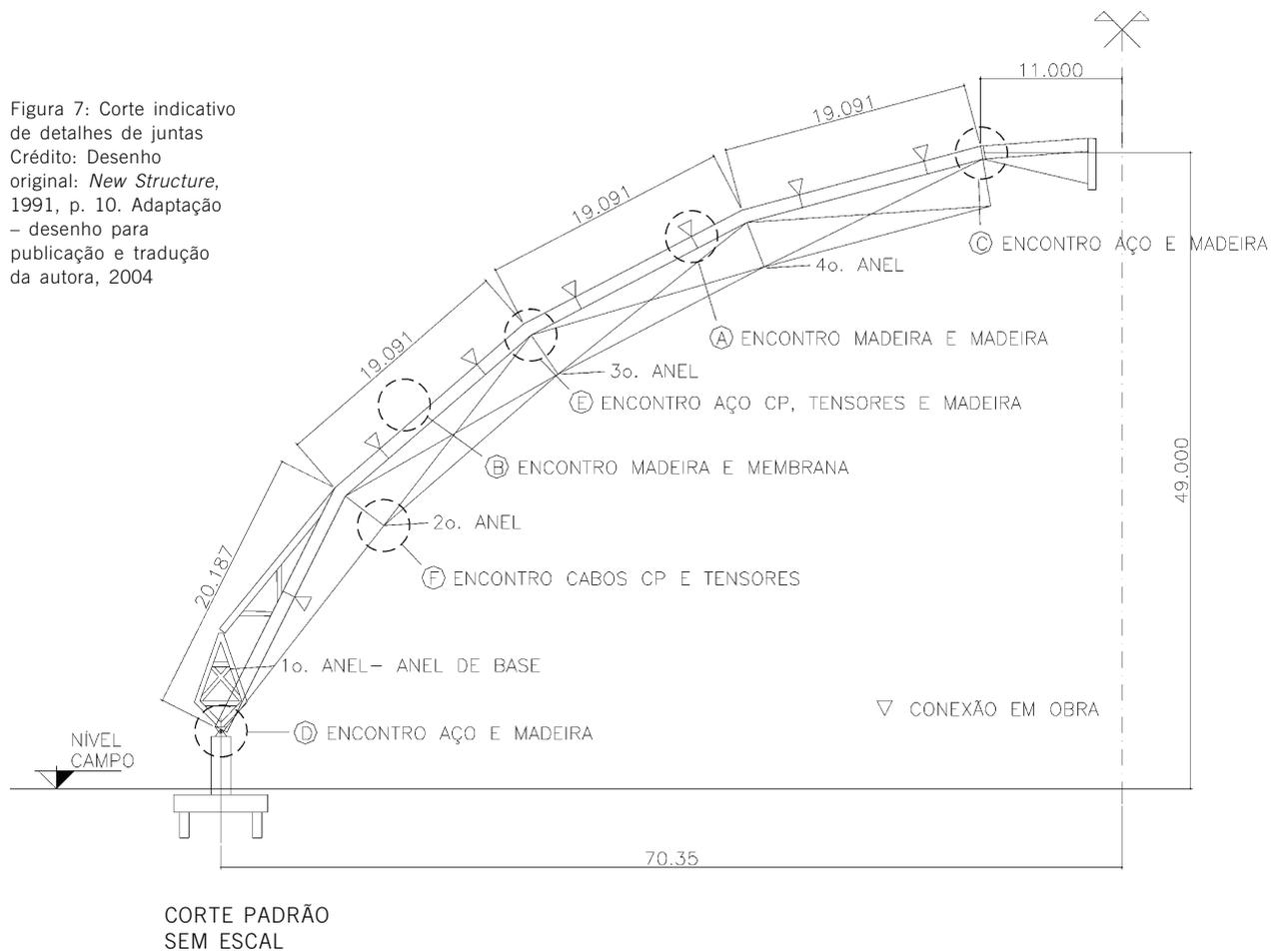
Os três anéis paralelos tensionados em treliça são fixados aos arcos de madeira laminada por conectores metálicos. Ao final da montagem do sistema, os cabos são tracionados com macaco hidráulico, e assim completa-se a estruturação do domo.

ARCOS RADIAIS COM MADEIRA LAMINADA DE GRANDE SEÇÃO

Os 36 arcos radiais são constituídos por quatro segmentos de reta de, aproximadamente, 19 m de comprimento, que moldam uma forma semi-esférica de cúpula elíptica, a partir das ligações metálicas. Os arcos estão concebidos em peças duplas principais, de madeira laminada, com 27,3 x 91,4 cm, e peças de afastamento de mesma seção.

Sendo peças compostas, a resistência à flexão em torno dos eixos críticos está plenamente assegurada. Nos pontos de inflexão, isto é, mudanças de ângulo tangentes à curva, a madeira laminada montada trabalha a um ângulo de 11,5°. Por outro lado, surgem conexões em pontos retos, como mostra a Figura 7, a partir dos quais o momento fletor diminui (4,5 m, partindo do ponto de inflexão).

As vigas laminadas utilizadas nos arcos foram importadas dos EUA, empregando-se o cedro americano e adaptando-as aos coeficientes de segurança das normas japonesas e aos processos de qualidade exigidos, conforme os padrões de construção do local.



De um modo geral, comparando-se a madeira com outros materiais como o aço e o concreto, aquela é material que apresenta grande retração. Se ocorresse isso no arco, os cabos e as barras de aço se afrouxariam, comprometendo a estabilidade da estrutura. Desse modo, no projeto desse domo, a resistência no arco como um todo foi prevista com larga margem de segurança, para que suportasse até grandes carregamentos de neve como carga permanente.

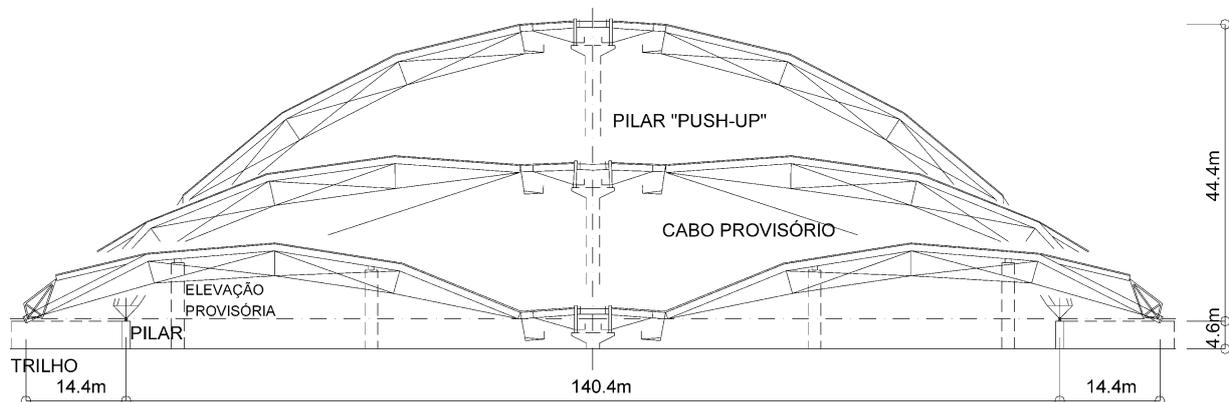
PROCESSO CONSTRUTIVO

As informações seguintes sobre o processo construtivo estão baseadas em artigo da revista técnica japonesa *Nikkei Architecture*, de 4 de março de 1991, p. 226-230.

Segundo Nakazaki (1991), a construção do domo de Izumo gerou muitas expectativas quanto às dificuldades de execução, o que tornou primordial a proposta de racionalização da construção do domo. Após vários estudos, o plano da construção adotou o método *push-up*, o qual consiste em: inicialmente, montar os arcos no solo e conectá-los ao anel central em uma das extremidades e, na outra, apoiar sobre trilhos de rolamento temporários (até que encontrem o ponto de apoio na parte superior do pilar) e, posteriormente, levantar o anel por meio de macaco hidráulico em único movimento até o topo, a uma altura de 44,4 m, conforme mostra a Figura 8.

Assim, o início da construção deu-se em outubro de 1990, partindo-se da infra-estrutura (fundações e pilares) e montagem do anel de compressão central em estrutura metálica no solo.

As peças laminadas que formam o arco foram produzidas nos EUA e a furação de todos os pontos dos arcos foram realizados durante quatro meses no local da obra, em galpão de montagem provisório. Segundo o engenheiro responsável pela obra, Kuwabara (NAKAZAKI, 1991, p. 230), no processo de



CORTE ESQUEMÁTICO
SEM ESCAL

Figura 8: Desenho esquemático do sistema *push-up*. No segundo estágio atinge-se a altura da suspensão
Crédito: Desenho original: Nakazaki, 1991, p. 227. Adaptação – desenho para publicação e tradução da autora, 2004

construção, a acuidade e a precisão na manufatura das peças laminadas foram fatores de grande preocupação, e, para isso, foram contratados carpinteiros experientes da região e um novo sistema de mandril foi desenvolvido para melhorar a precisão da furação da madeira.

As vigas laminadas foram produzidas em peças retas e curvas, sendo as retas com comprimento de até 10 m, com seção de 273 por 914 mm. A montagem dos arcos deu-se em meados de março de 1991 e, para aumentar a estabilidade dos 36 arcos, no momento da elevação do anel central, montaram-se pares de arcos formando 18 conjuntos. Em cada conjunto completou-se a colocação dos tubos de aço auxiliares, barras de aço para CP, cabos e membrana, ainda no solo. Quanto aos pontos de inflexão do arco, foram fixados elementos temporários de ligação lateral, a fim de aumentar a resistência do conjunto de montagem como um todo.

Entre o lado externo do anel central e o vão entre os dois arcos de cada conjunto de montagem instalaram-se cabos conectores temporários, como a corda de um arco (de arco e flecha), os quais controlaram a conformação dos arcos. Esses cabos conectores temporários proporcionaram imobilidade aos arcos, enquanto estavam nas bases de deslizamento, resistindo aos esforços laterais advindos dos ventos fortes e funcionando como amarrações transversais durante a montagem.

O espaço entre os conjuntos de montagem no solo, em relação à posição final de construção do domo, estava aproximadamente 5 m maior, devido à forma radial, o que não permitiu a fixação de todos os tubos e as barras rígidas, cabos de aço e membrana, ainda no solo. No início, investigou-se a hipótese de levantar, simultaneamente, a membrana dos vãos restantes, fixando-a no centro de cada lado dos arcos. Porém, devido aos efeitos do vento havia a possibilidade de danificar a membrana, o que levou a fixá-la nos espaços restantes em sua posição final elevada, após o levantamento completo da estrutura. Os tubos rígidos auxiliares, barras para CP e cabos de aço puderam ser instalados e transportados pendurados pelos arcos no momento do levantamento, fazendo-se sua fixação final também no alto.

A elevação dos arcos, a partir do anel central, iniciou-se em 27 de junho de 1991. Cada arco pesando, aproximadamente, 50 toneladas e, somando-se o anel de compressão superior, as peças de conexão e os demais arcos, obteve-se uma carga total de, aproximadamente, 2.300 toneladas¹. Depois de posicionado o pilar central, colocaram-se oito macacos em sua base, e, em dois dias, o mesmo foi levantado a uma altura de 18 m. A segunda etapa teve início em 25 de julho do mesmo ano, e, em quatro dias, a estrutura foi levantada até a altura de 48,9 m. Neste ínterim, foram posicionados 12 macacos abaixo dos arcos, para que estes se movimentassem sobre as guias, de maneira uniforme, com as demais peças do conjunto. Conforme o chefe de Tecnologia do Departamento de Projeto da Filial Hiroshima da Kajima Co., engenheiro Matsushima, “*esta providência visou garantir a estabilidade perante o vento, e tendo o macaco central como ponto de força principal, manter a correta silhueta do Domo*” (NAKAZAKI, 1990, p. 229). A movimentação geral foi controlada por microcomputadores na sala central de comando, a partir de programas computacionais de modelagem.

A ligação entre o anel de compressão superior e os arcos foi realizada por dois parafusos conectados em duas situações, isto é, no momento da suspensão

(1) Nota-se a leveza da estrutura da cobertura do domo de Izumo, totalizando 2.300 toneladas, se comparado à cúpula da Catedral de São Pedro em Roma, que possui peso próprio de 11.000 toneladas, com diâmetro 3,5 vezes menor e a metade da altura do primeiro.

somente os parafusos superiores foram fixados, a fim de permitir suas articulações. Depois, ao término da suspensão, os parafusos inferiores foram ajustados, tornando rígidas as conexões (Figura 12).

As extremidades inferiores dos arcos foram posicionadas em trilhos provisórios e movimentaram-se em linha reta. Após a finalização da suspensão, foram fixadas as articulações metálicas inferiores com as esperas já posicionadas nos pilares de concreto (Figura 11).

No processo de construção *push-up* necessitou-se desenvolver, em projeto, muitos detalhes construtivos para suas diferentes etapas, e procurou-se, ao máximo, concluir, no solo, a montagem das peças, fato o qual, segundo o engenheiro Kato (NAKAZAKI, 1991, p. 228), possibilitou “o trabalho das junções no solo com menor utilização de escoramentos e materiais temporários na obra, mantendo-se a maior segurança do trabalho, possibilitando encurtamento do prazo de construção, melhor qualidade da obra e redução de custos”.

MODELO FÍSICO CONSTRUTIVO

A construção do modelo em escala 1:100 do domo de Izumo, no Laboratório de Arquitetura e Urbanismo da Universidade São Marcos, foi realizada pelos técnicos em maquetaria e coordenada pela autora da pesquisa. Objetivou possibilitar as verificações do método construtivo, dos princípios estruturais e as implicações de sua estabilidade em relação ao método *push-up*, bem como as proporções espaciais do domo.

O processo de construção do modelo iniciou-se com um planejamento envolvendo a escala e as dimensões finais mínimas necessárias para a construção das articulações, de modo a possibilitar a movimentação do sistema *push-up*. Uma vez cortados todos os arcos e encaixados em suas respectivas posições em pilares e conectados ao anel superior, foram modelados os trilhos de deslizamento dos arcos, considerando-se o paralelismo dos trilhos a cada dois arcos. Isto é, os trilhos não estão em linhas radiais, mas equidistantes em relação ao eixo de deslizamento de cada par de arcos.

No decorrer da montagem do modelo físico na escala 1:100, percebeu-se a elevada flexibilidade e grau de liberdade estrutural do conjunto, sobretudo o tombamento lateral dos arcos, devido às articulações entre arcos, pilares e anel superior. Essa instabilidade foi minimizada com barras de travamento temporário, para permitir a demonstração do método *push-up*, isto é, subir ou descer a estrutura.

Um sistema de cremalheira manual simulou o sistema de macacos hidráulicos, mantendo o conjunto equilibrado e sem alterações de forma na cúpula, no momento da suspensão. Ao final da montagem e levantamento do “macaco hidráulico”, definiram-se alguns pontos de conexão do anel central, os quais receberiam o segundo parafuso para que o sistema fosse travado (Figuras 9 e 10).

Concluímos, com a construção do modelo:

a. As dimensões dos arcos e pilares são extremamente esbeltas, proporcionalmente ao vão obtido, confirmando a eficiência estrutural do sistema misto: madeira laminada e aço;

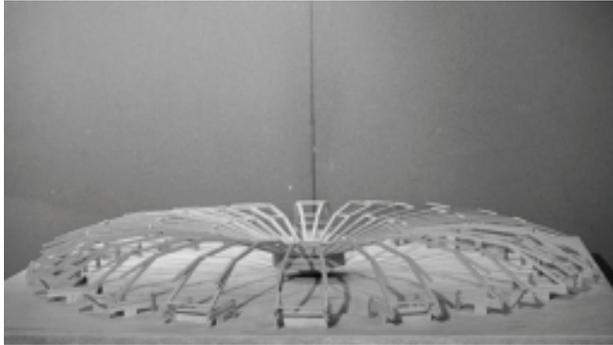


Figura 9: Vista do modelo (esc. 1:100) em posição inicial antes do *push-up*

Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005



Figura 10: Vista em posição completa do *push-up*. Altura total de suspensão

Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005

b. para esse sistema construtivo, a precisão dimensional de todas as peças é de fundamental importância para se obter a conformação volumétrica desejada, a estabilidade estrutural e, principalmente, possibilitar o *push-up* em movimento contínuo e seguro, pois, caso as curvaturas e projeções de movimento dos arcos se desviassem dos eixos previstos, poderiam provocar torções nas peças, concentração de esforços em pontos isolados, distribuição desequilibrada das cargas, afetando sensivelmente a estabilidade da estrutura;

c. pode-se perceber que o domo de Izumo apresenta-se como uma cúpula formada por peças isoladas de arcos e barras de aço, diferente de um sistema contínuo de casca ou membrana. Porém exige que a distribuição de tensões seja o mais igualitário possível, para não surgirem pontos de concentração de cargas, fato este indesejável em coberturas esbeltas de dupla curvatura;

d. o travamento e a estabilização do domo somente seriam obtidos após colocação de todos os sistemas de cabos e barras de contraventamento, os quais não foram instalados, para manter a movimentação no modelo de pesquisa.

Enfim, constatou-se, por essa modelagem, existir uma grande demanda de técnicas de estrutura e construção específicas para viabilizar o método *push-up*, considerando-se este um sistema que permite rapidez, otimização dos materiais empregados, leveza e segurança no processo construtivo. Alguns detalhes foram modelados na escala 1:5, visando à melhor compreensão do sistema estrutural (Figuras 11 a 14).

Figura 11: Detalhe de conexão entre base de pilar e arco em madeira laminada (esc. 1:5)
Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005

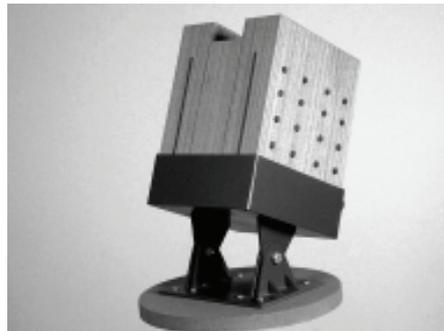


Figura 12: Detalhe da conexão entre anel de compressão superior e arco em madeira laminada (esc. 1:5)
Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005

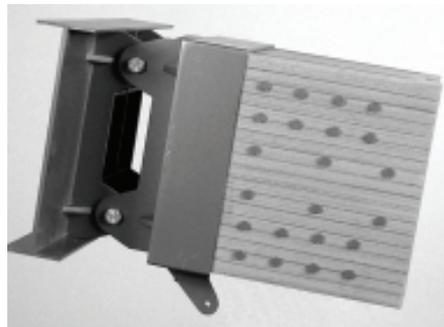


Figura 13: Detalhe da junção entre tubos diagonais e barras para CP e anel paralelo em cabos de aço duplos (esc. 1:5)

Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005

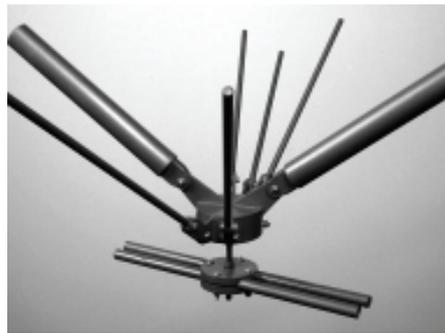
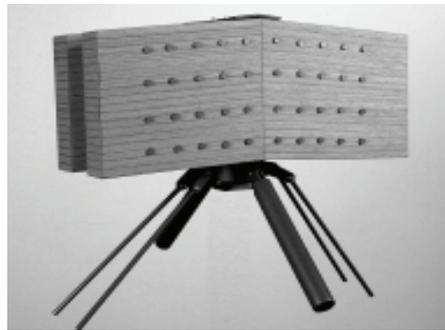


Figura 14: Detalhe de conexão entre arco, tubos diagonais e tirantes em barras para CP (esc. 1:5)

Crédito: Foto da autora, São Paulo, 2005



ANÁLISE DA ONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA, ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA

A inserção do domo de Izumo na paisagem é um marco a longa distância. Não somente devido às suas dimensões, mas também por seu volume sintético, cuja suave curvatura o torna integrado à paisagem local entre montanhas, planícies, arrozais e residências vernaculares. Cria-se um ambiente paisagístico e uma atmosfera voltados ao lazer e à prática do esporte, que propiciam à população um espaço de encontro e convívio coletivos e, também, um lugar para momentos de encontro do indivíduo consigo mesmo, de sensibilização das dimensões da natureza, da arquitetura e da escala humana.

O sistema estrutural e construtivo se encontra aparente, participando da composição do amplo espaço interno, sendo totalmente legível quanto à compreensão da lógica estrutural e construtiva dos elementos e respectivos materiais utilizados, uma vez que a conformação do espaço, em si, dispensa qualquer tipo de tratamento acústico, térmico ou revestimento com forros e materiais que pudessem camuflar toda a grandiosidade arquitetônica e riqueza de detalhes construtivos. Analisando a concepção arquitetônica e estrutural do domo de Izumo, pode-se dizer que ambos se apresentam mutuamente integrados e atingem uma reciprocidade lógica e estética, gerando um resultado plástico e construtivo de extrema leveza, utilizando-se avançados recursos da tecnologia da construção e apropriando-se de um mínimo de materiais, o que favorece a conservação ambiental.

Quanto à concepção estrutural, a estrutura do domo de Izumo pode ser classificada como uma superfície sinclástica, com curva gaussiana positiva, isto é, uma superfície de dupla curvatura, cujos raios têm centros que se encontram e são voltados para o lado interno do domo.

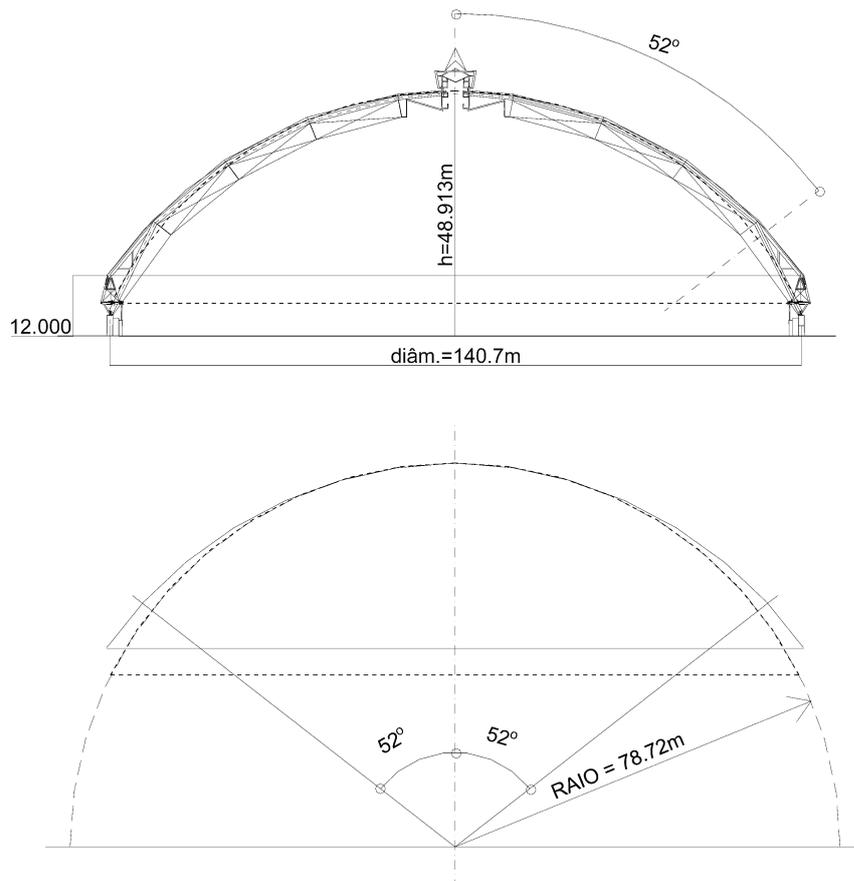
Sabendo-se que a superfície de dupla curvatura possui uma distribuição de tensões em duas direções, inversamente proporcionais aos seus raios, tal característica torna a estrutura mais eficiente relativamente à espessura do material. Sendo uma superfície sinclástica elíptica e fazendo-se a verificação numérica das tensões, com base nos gráficos de esforços solicitantes (*Kajima Design, s/d.*, p. 10), pode-se constatar que, proporcionalmente, os paralelos (formados por barras e anéis em cabos metálicos) sempre suportam tensões maiores que os meridianos (formados pelos arcos laminados de madeira), nas diversas situações de carregamento.

Nesse caso, nota-se o emprego dos materiais em sua eficiência máxima, pois os anéis paralelos em cabos de aço resistem às maiores tensões de tração do sistema, permitindo seções mais delgadas e proporcionando grande leveza ao espaço interno. Já para o conjunto dos meridianos foram adotados a madeira laminada estrutural, tubos de aço e barras para CP, visando absorver menores tensões advindas do esforço normal e de momento.

Uma análise gráfica do projeto, realizada pela autora da pesquisa, auxilia a compreensão da concepção estrutural, pois, fazendo-se o desenho da curvatura tangente aos arcos (Figura 15), verifica-se que a cúpula originária é esférica e seu centro se encontra deslocado de sua base, isto é, o perfil da cúpula elíptica adotada no projeto representa a porção superior seccionada de uma cúpula esférica. Em relação ao eixo vertical, o anel de base está um pouco abaixo dos 52°, ponto no qual ocorre a transição de esforços de compressão na parte superior e tração na parte inferior, segundo Salvadori (1957, p. 349).

Verifica-se, então, que a definição da curvatura seccionada, a aproximadamente 60°, a partir do eixo vertical, procura evitar os maiores esforços de tração nos paralelos, mantendo-os trabalhando, em sua maior parte, na zona de compressão. Nota-se, também, que quando os arcos se encontram próximos e abaixo do ponto de inflexão (52°), estes possuem vigas secundárias compostas por treliças mistas de aço e madeira, as quais absorvem os maiores esforços de tração

Figura 15: Corte e gráfico de curvatura
Crédito: Desenho da autora, São Paulo, 2004



da base do domo. Pode-se, assim, dizer que, sob o aspecto estrutural, a forma do domo procura estabelecer a melhor curvatura em relação aos esforços solicitantes, porque corresponde, em sua maior parte, à zona de compressão da cúpula semi-esférica, possibilitando a grande esbeltez dos arcos de madeira laminada.

Quanto ao sistema construtivo *push-up*, percebe-se que o desenvolvimento tecnológico alivia esforços físicos humanos e reduz riscos à segurança do trabalho dos operários, fato a representar novos caminhos e direções para a evolução das construções, que avança cada vez mais em direção à mecanização e automação da produção no canteiro de obras. Isso deve ser visto como um modo de resguardar e valorizar as pessoas envolvidas no processo de produção no canteiro de obras.

Tudo isso nos leva a crer que o desenvolvimento tecnológico na arquitetura e na construção civil será um desafio para as próximas décadas e séculos, no que tange ao conhecimento técnico e ao equilíbrio entre a lógica e os anseios do espírito humano, sobre a busca da estética arquitetônica não-desvinculada das técnicas construtivas, e, juntas, significam: relações socioculturais, relações do homem com a natureza e invenção de novos métodos de construção no espaço habitado.

Podemos, certamente, pensar que a tecnologia *push-up* de estruturas em madeira laminada e travamentos metálicos são perfeitamente viáveis no Brasil, principalmente pelas grandes possibilidades de uso de madeira de reflorestamento e existência de áreas para cultivo de madeiras apropriadas. Pois, além de empregar matérias-primas de fontes renováveis, demandam menos o trabalho físico humano, e sim o esforço de equipamentos mecânicos, com maior rapidez, economia e segurança. Desvencilhados de alguns preconceitos culturais quanto ao emprego da madeira nas construções de grande porte, esse modelo poderia ser soluções a serem empregadas em espaços esportivos de qualquer magnitude, ou ainda de outros usos diversos. Porém, ainda precisamos desenvolver a tecnologia química para os adesivos estruturais – elemento encarecedor da laminação de madeira e sistemas industrializados de produção de peças estruturais, para se tornar acessível economicamente às grandes obras no Brasil.



Figura16: Vista interna do domo de Izumo
Crédito: Foto do arquivo da arquiteta Fabiana Hirakata, Izumo, 1992

BIBLIOGRAFIA

- COUNCIL OF MATSUE – IZUMO INTERNATIONAL SIGHTSEEING THEME AREA. *The realm of the Gods Izumo no Kuni*. Matsue: Plan-Do Co., 1999.
- SHINGUIJUTSU JISSHI. Izumo Mokumoku Dome. *Boletim técnico*, n. 24, Tóquio: Kajima Corporation, 1990.
- KAJIMA DESIGN. *Izumo Kenkou Kouen Seibi Project*. Tóquio: Kajima, s/d.
- NAKAZAKI, R. Tokushu kouhou de yane o *push-up dome* no zenyuu arawareru. *Nikkei Architecture*, Tóquio, p. 226-230, 1991.
- NEW STRUCTURE. Daikuukan Kouzou. *New Structure*, Tóquio, n. 3-4, p. 3-14, 1991. Edição especial.
- OTTO, Frei. *Tensile structures. Designs, structure and calculation of buildings of cables, nets, and membranes*. Massachusetts: MIT, 1973.
- OZAKI, Kiyoshi. Izumo Dome. *Shinken-chiku. Moku no Kuukan*, Tóquio, v. 67, n. 13, p. 18-21, 1992. Edição Especial.
- PFLÜGER, Alf. *Elementary statics of shells*. 2 ed. Nova York: McGraw-Hill, 1961.
- SALES, José J. de; MALITE, Maximiliano; GONÇALVES, Roberto M. *Sistemas estruturais. Elementos estruturais*. São Carlos: Escola de Engenharia São Carlos-USP, 1998.
- SALVADORI, Mario. *Structure in architecture*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1963.
- _____. *Why buildings stand up. The strength of architecture*. Nova York: W. W. Norton, 1980.
- SALVADORI, M.; LEVY, M. *Structure design in architecture*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1967.
- SANDAKER, B. N.; EGGEN, A. P. *The structural basis of architecture*. Nova York: Whitney Library of Design, 1992.
- SIEGEL, Curt. *Formas estructurales en la arquitectura moderna*. México: Continental, 1966.
- STUNGO, Naomi. *Wood. New directions in design and architecture*. Califórnia: Cronicle Books, 2001.
- VASCONCELOS, Augusto C. de. *Estruturas arquitetônicas: Apreciação intuitiva das formas estruturais*. São Paulo: Nobel, 1991.

Indicações para leitura

2G REVISTA INTERNACIONAL DE ARQUITECTURA. *Sección 1997*. Toyo Ito. Nexus. Barcelona: Gustavo Gilli, 1997.

MIMRAM, Marc. *Structures et formes. Étude appliquée à l'oeuvre de Robert Le Ricolais*. Paris: Bordas, 1983.

Agradecimentos

À Universidade São Marcos, pelo fomento à pesquisa.

Ao professor e engenheiro civil Yoshiharu Ishii, pela revisão da tradução de textos técnicos em japonês.

Ao aluno do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade São Marcos, Eduardo Francisco Bessa, pelos desenhos elaborados na Iniciação Científica.

Ao Laboratório de Arquitetura e Urbanismo, técnicos Ângelo Pinheiro e Josias de Souza pela realização dos modelos.

À Kajima Corporation, pela concessão dos dados técnicos.

Marta Etsuko Tamura Waragaya

Graduação e mestrado em Arquitetura e Urbanismo pela FAUUSP. Docente na área de projeto de edificações, estruturas especiais e tecnologia das construções, na Universidade São Marcos, desde 1997, do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário da FEI, desde 2002. Bolsista em estágios técnicos no Japão: 1987 – Governo da Província de Miyazaki, 1988 – AOTS – The Association for Overseas Technical Scholarship – Tóquio.

Rua Lord Cockrane, 26, ap. 24. Alto do Ipiranga

04213-000 – São Paulo - SP

e-mail: martatamura@uol.com.br