

Tipologias Arquitetônicas de Estruturas Espaciais em Brasília

Cláudia Estrela Porto (cestrelap@uol.com.br)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UnB

Resumo

Os sistemas de estruturas espaciais, desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos a partir da 2ª Guerra Mundial, surgiram como uma excelente possibilidade estrutural para cobertura de grandes vãos.

O uso intensificado das estruturas espaciais em coberturas de ginásios de esportes, hangares, terminais rodoviários e aeroviários, despertou o interesse por pesquisas nesta área, originando diversos sistemas patenteados e comercializados, a maior parte em treliças espaciais (estruturas em malhas).

Utilizando o aço ou o alumínio, os diversos sistemas de estruturas espaciais possibilitam uma distribuição mais homogênea dos esforços no conjunto da estrutura, uma vez que possuem a propriedade de distribuir toda ação concentrada de cargas. Consegue-se, assim, uma estrutura mais leve e econômica.

No Brasil, o impulso foi dado com a construção do Centro de Exposições do Anhembi, em 1971; em Brasília, elas surgiram nos anos 80.

Este trabalho procura retratar as tipologias arquitetônicas de estruturas espaciais em Brasília, através do estudo dos sete sistemas adotados ao longo destes 22 anos. Fez-se levantamento das principais obras construídas em cada sistema e se buscou, com os profissionais do ramo (engenheiros, construtores e arquitetos), o fio condutor deste processo, resgatando a memória tecnológica do uso deste sistema construtivo na cidade.

Inicialmente, uma abordagem histórica situa as estruturas espaciais no contexto arquitetônico dos séculos XIX e XX. Segue-se uma explanação dos diversos tipos de estruturas espaciais, com desenvolvimento das estruturas em malhas, objeto deste trabalho.

O detalhamento das principais geometrias espaciais aplicáveis em projetos estruturais mostra a diversidade de tipologias que se pode obter com a escolha da geometria e do sistema espacial mais adequado para cada caso.

Palavras-chave: Tipologias, Estruturas Espaciais, Brasília

Abstract

Space Structures systems, developed in Europe and United States since World War II, came to be an excellent structural possibility for roofing large spans.

The intensive use of space structures in roofs of sports gymnasiums, hangars, airports and bus terminals sparked the interest in research and development on the area, bringing about several patented and commercialized systems, most of them space frames structures.

Made of steel or aluminium, space structures systems make a more homogenous force distribution possible, as they possess the quality of distributing all concentrated load action. A lighter and more economical structures becomes, thus, possible.

In Brazil, the first impulse was made with the construction of the Exhibit Hall of Anhembi, in 1971; in Brasília, such structures first appeared during the 80's.

The purpose of this paper is to retrace the architectonic typologies of space structures in Brasília through the study of seven different systems adopted during the last 22 years. A survey of the main projects in the context of each system was made, with the intention of rescuing – through interviews with engineers, contractors and architects – the technological memory of the use of this building systems in the city.

Firstly, a historical approach places space structures in the architectonic context of the 19th and 20th centuries. This is followed by an explanation of the several types of space structures, with a particular emphasis on space frame structures, the main object of this paper.

The detailing of the main spatial geometries applicable to structural projects show the diversity of typologies one can obtain through the choice of the most adequate geometry and spatial system in each case.

Keywords: Typologies, Space Structures, Brasília

Introdução

Arquitetos e engenheiros estão sempre em busca de soluções para cobrir grandes vãos. Com o desenvolvimento e a industrialização do mundo moderno, há uma demanda por estruturas eficientes e adaptáveis. Entre as novas formas possíveis, as estruturas espaciais constituem um instrumento eficaz para os arquitetos e engenheiros, devido a sua grande diversidade e flexibilidade.

As primeiras estruturas espaciais foram desenvolvidas pelo escocês Alexander Graham Bell (1847-1922), também conhecido como o pai do telefone. Em 1907, com 60 anos e morando no Canadá, inventou o que foi, provavelmente, a primeira estrutura em elementos modulares tetraédricos pré-fabricados em usina e unidos no canteiro de obra. A estrutura assim obtida foi levantada numa peça única para formar uma torre de observação de 30m de altura. Feita com barras e nós de aço, ela servia de observatório para experiências com aeroplanos.

Apesar dos trabalhos efetuados por Graham Bell e da repercussão que tiveram as idéias do engenheiro alemão August Foepl (1854-1924) sobre as malhas espaciais, as estruturas tridimensionais não tiveram sucesso imediato. Isto ocorreu devido a três fatores: 1) a ligação das peças, para a qual havia na época só rebites e parafusos, 2) a maior eficiência do concreto armado e da construção metálica com vigas de alma cheia, 3) as dificuldades do cálculo das estruturas espaciais.

Essas razões contribuíram para o aparecimento tardio deste tipo de estrutura. Só entre 1930 e 1940, após o aperfeiçoamento da solda como meio de ligação, é que se iniciou o seu desenvolvimento. Mas ela só se impôs no mercado de construção entre 1960 e 1970, graças à utilização dos computadores pelos escritórios de cálculo. As pesquisas teóricas e práticas realizadas pelo professor Zygmunt Stanislaw Makowski (1922-), da Universidade de Surrey (Inglaterra), assim como os seus programas de cálculo pelo computador, muito contribuíram para a evolução das estruturas espaciais.

Na França, a impulo foi dado por Robert Le Ricolais (1894-1977) e Stéphane du Chateau (1908-1999) e, nos Estados Unidos, por Richard Buckminster Fuller (1895-1983) e Konrad Wachsmann (1901-1980). Embora as pesquisas de Graham Bell datem do início do século, os sistemas de estruturas espaciais só foram introduzidos na arquitetura com o sistema Mero, desenvolvido pelo engenheiro Max Mengerlinghausen (1903-1988), na Alemanha, e comercializado a partir de 1943.

No Brasil, o grande impulso foi dado com a construção do Centro de Exposições do Anhembi, em 1971, em São Paulo. Em Brasília, as estruturas espaciais surgiram no início da década de 80, com a construção de obras que solicitavam grandes vãos, como os Terminais Rodoviários.

Uma simples comparação entre os sistemas disponíveis no Brasil e os desenvolvidos e utilizados no mundo nos dá uma idéia de quão distantes estamos de técnicas simples e eficientes, utilizadas há mais de 50 anos, como o sistema Mero. Aliás, dos sistemas aperfeiçoados, o único difundido aqui é uma variante deste. A fabricação desses sistemas exige uma industrialização especializada, impossibilitando-os de competir no mercado com os sistemas tradicionais brasileiros, mais baratos. Esta análise poderá, entretanto, servir de reflexão e ponto de partida para o desenvolvimento de novos sistemas, ou adequação dos já existentes, visando a uma melhor utilização das estruturas em aço e alumínio na concepção de coberturas de grandes vãos.

Analisando os sistemas e a geometria de estruturas espaciais empregados nas edificações de Brasília, poderemos traçar o perfil histórico de seu desenvolvimento, ressaltando suas qualidades e deficiências e estabelecendo desta forma coordenadas que possibilitem o melhor uso de um sistema específico, considerando o vão a ser vencido, a forma estrutural e a adequação espacial.

Estruturas Espaciais

Segundo Silva (1999, p. 1), “as estruturas espaciais são aquelas compostas de malhas planas ou curvas, tridimensionais, interligadas por elementos estruturais chamados barras ou membros, conectados entre si por intermédio de peças ou dispositivos especiais, chamados juntas ou nós. Na maioria dos casos, são formadas por duas malhas, uma inferior, chamada também banzo inferior, outra superior, denominada banzo superior, malhas estas que geralmente são interligadas em suas juntas por diagonais, que formam assim um conjunto de tetraedros ou pirâmides, regulares ou não, resultando o que é chamado de malha espacial”.

As treliças tridimensionais constituídas de barras articuladas são freqüentemente chamadas de “malhas tridimensionais”, enquanto que o termo “ossatura tridimensional” se aplica a estruturas espaciais com ligações rígidas.

Os elementos que compõem as estruturas espaciais possuem uma uniformidade modular, o que as torna aptas à pré-fabricação em elementos simples (nó e barras) ou em elementos compostos (vigotas-pirâmides). Elas podem ser realizadas em qualquer material; entretanto, a maior parte é construída em aço, alumínio ou madeira. Este tipo de estrutura distribui a ação centrada das cargas, o que permite uma construção leve.

O termo estrutura espacial se aplica a uma vasta categoria de construções. Makowski, um dos maiores teóricos de estruturas espaciais, classifica-as em três tipos:

a) Estruturas em malhas (treliça espacial), constituídas por uma série de barras unidas entre si por nós. As malhas podem ser o produto de muitos corpos geométricos ou da repetição de um entre eles (cúpulas em malhas, abóbadas de berço em malhas, grelhas de duas camadas);

b) Estruturas suspensas de toda natureza (coberturas sobre cabos), definidas pelo sistema de cabos que mantém a cobertura, com ou sem bordas de apoio. Nas estruturas suspensas, a distribuição das solicitações internas é caracterizada pela eliminação da flexão, a construção sobre cabos trabalhando unicamente à tração;

c) Estruturas em membranas metálicas, nas quais os elementos de cobertura participam na resistência dos esforços solicitantes (construções em membranas, construções plissadas).

No vasto campo das estruturas espaciais, o objeto de nosso estudo se restringirá às estruturas metálicas em malhas, ou estruturas reticuladas, que constituem o cerne da utilização dos sistemas patenteados de estruturas espaciais. Elas podem ter qualquer geometria, mas só se podem compor de barras simples. Estes sistemas, operando por processos modulares industrializados, respondem bem às necessidades de uma arquitetura pública de grandes vãos.

A forma mais simples de uma treliça espacial é a de uma só camada (grelha plana ou circular), que se mostra econômica para vãos de até 10m. Para vãos superiores, as grelhas de duas camadas superpostas, unidas por triangulação, são mais indicadas. Elas possuem superfície curva ou plana e são chamadas também de estruturas tridimensionais, uma vez que a treliça espacial unindo o banzo superior ao inferior constitui três dimensões: comprimento, largura e altura.

Devemos sempre ter em mente que a peça principal de uma treliça espacial é o nó, que assegura a coesão e a estabilidade do conjunto. Os mais usuais recebem até oito barras, mas existe a possibilidade de receberem um número maior de barras. Porém, neste caso, a estrutura se torna tão grande e pesada que acaba oferecendo dificuldades na montagem e encarecendo o custo final da obra.

O projeto de estrutura espacial segue três etapas: a escolha de uma configuração (desenho da trama das malhas), a determinação da altura da treliça e do espaçamento entre banzos – módulo - (a relação entre o vão efetivo e a altura da treliça deve ser menor ou igual a 20) e a relação comprimento-largura da treliça e sistemas de suporte (o cálculo estrutural mostra, para estruturas de malha quadrada, que quanto mais

suportes forem projetados em torno do perímetro e quanto mais próxima do quadrado for a estrutura, mais ela trabalhará como ação de placa em duas direções, o que aumenta sua eficiência, determinada pela relação peso da estrutura/m²).

Histórico das Estruturas Espaciais em Brasília

O fechamento lateral da Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, realizado em 1967, entre os 16 pilares curvos e delgados de concreto aparente, constitui a primeira idéia da utilização de uma malha espacial nos projetos arquitetônicos de Brasília. Não se trata aqui de um “nó espacial”: as barras, constituídas de vergalhões de aço de ¾”, são soldadas. Tanto o banzo inferior como o superior são constituídos de hexágonos alongados, seccionados horizontalmente, formando dois trapézios e unidos por diagonais. A solução proposta, em treliça espacial, além de dirigir os carregamentos maiores para o solo, permitiu a fixação das duas camadas de vidro, respectivamente na estrutura hexagonal do banzo superior e inferior.

Em seguida, a estrutura da Feira do Ceasa, finalizada em 1972, embora não seja totalmente “espacial”, mostra um avanço nesta direção. A malha espacial se alarga, formando vigas, as quais estão apoiadas em pilares de concreto. Ela é, na realidade, uma justaposição de treliças de cantoneiras metálicas em chapa dobrada, onde os elementos triangulares foram unidos por solda, sem parafusos. Estas vigas triangulares, chamadas “joists”, não formam uma malha espacial porque são colocadas lado a lado, não sendo unidas entre si. Não se dispunha, na época, de recursos de cálculo e computadores com memória suficiente para calculá-la como estrutura espacial.

Podemos afirmar, então, que as primeiras estruturas verdadeiramente espaciais surgiram no início da década de 80, com vários terminais rodoviários: Cruzeiro, Taguatinga Sul, Taguatinga Norte, Ceilândia, Brazlândia e Guará.

A concepção arquitetônica destes terminais, em treliça espacial, foi da Novacap¹. A geometria básica constituía-se de pirâmide de base quadrada, soldada, sem parafuso. Tanto as diagonais, como os banzos inferior e superior, eram compostos de cantoneiras laminadas a quente. Para responder aos esforços maiores, em alguns pontos colocavam-se tubos ou, esporadicamente, cantoneiras com chapa dobrada. Os vãos eram pequenos, os pilares eram treliçados e terminavam em forma de capitel (semelhantes aos pilares cogumelo). O projeto de estrutura e de cálculo foi do engenheiro Rodney Farah, que neste momento começava a utilizar o programa de análise estrutural da IBM, chamado Strudal. O primeiro terminal rodoviário foi o do Cruzeiro, inaugurado em maio de 1981. As cantoneiras com chapa dobrada, que haviam sido utilizadas no Ceasa, foram aqui substituídas pelas cantoneiras laminadas a quente, de melhor desempenho.

No terminal rodoviário do Guará (1988) utilizou-se uma nova concepção: as cantoneiras laminadas a quente foram substituídas por tubos, o sistema espacial passou a ser o Cruzeta, mas conservando a mesma

¹

tipologia de pirâmides de base quadrada. A maior parte destes terminais ainda existe, estando razoavelmente bem conservados.

A Associação Médica de Brasília, projeto do arquiteto Paulo Zimbres e Associados, construída entre 1981 e 1983, introduziu o tubo nas malhas espaciais em Brasília. Mas trata-se de um projeto isolado, no qual os tubos, com as extremidades amassadas, penetram entre a chapa de forma circular dupla, que forma a base do sistema, sendo unidos por um parafuso (banzo inferior e superior). Sobre estas chapas circulares, paralelas à interseção dos dois eixos do círculo, são soldadas cantoneiras de duas abas, em forma de “L”, que recebem as diagonais. Os tubos que compõem as diagonais penetram entre cada duas abas de cantoneiras, sendo unidos por um único parafuso.

Mas, sem dúvida alguma, foi a Feira do Guará (projeto: Rodney Farah, execução: Gravia), construída em 1983, que consolidou, aos olhos dos arquitetos, as vantagens de uma solução espacial, sendo considerada o marco no desenvolvimento das estruturas espaciais em Brasília. A partir daí, vários projetos surgiram, explorando as potencialidades do tubo e do novo nó: o Cruzeta.

O arquiteto Rogério Carvalho de Mello Franco teve também um papel significativo no desenvolvimento destas estruturas. O prédio conhecido hoje como Hangar 5, na época escola fundamental INEI, foi o primeiro projeto em malha espacial projetado por ele. Construído entre 1981 e 1982 pela Embraco, com a ajuda do arquiteto Evandro Calume Pires e do engenheiro Rodney Farah, busca na solução espacial vencer grandes vãos, com baixo custo e rapidez de execução.

Não sabendo como fabricar a estrutura, Rogério Mello Franco solicitou a Evandro Calume Pires, que construía estruturas metálicas (mas que apenas tinha feito até então estruturas espaciais com cantoneiras soldadas, sem utilizar o tubo), ajuda na busca de uma solução para esta obra. Para se ter uma idéia, o cálculo inicial desta estrutura foi feito pelo método de Cremona, considerando-a como justaposição de pórticos planos. Conscientes das deficiências de tal método, Rogério Mello Franco e Evandro Calume Pires recorreram a Farah, precursor do cálculo estrutural espacial em Brasília, que desenvolve o cálculo baseado em matrizes espaciais. Esta pode ser considerada a primeira estrutura espacial tubular de Brasília, uma vez que a obra finalizou antes do prédio da Associação Médica, embora ambas tenham começado em 1981. Realizada em nó Típico ou Borboleta, com vãos de 24m por 36m, e balanços de 9m, foi na época considerada uma estrutura audaciosa.

Logo em seguida, em 1982, Rogério Mello Franco foi chamado para fazer a Creche do Itamarati – Fundação Cabo Frio. Como havia tido vários problemas com a estrutura tubular do Hangar 5, ele preferiu retroceder e propor uma solução em cantoneira soldada para a construção do primeiro e do segundo bloco. Em 1993, um terceiro módulo foi construído para responder às necessidades da creche, mas aqui a estrutura apresenta evoluções, não sendo mais soldada (nó Noxframe). Na sua terceira grande obra, a do Colégio INEI, da 604 Sul, utilizou o nó Capacete (na primeira parte da obra/1986) e o nó Noxframe ou Típico, na expansão (quadras poliesportivas/2002).

Mesmo considerando os problemas que uma estrutura em alumínio pode causar, a ALUSUD, empresa responsável pela execução da maior área construída em estruturas espaciais no Brasil, realizou, em Brasília, duas grandes obras em estrutura espacial mista (barras em alumínio e nós em aço), utilizando

sistemas similares ao Cruzeta e ao Típico: o Estádio de Futebol Mané Garrincha (1981-83) e o Pavilhão de Exposição do Parque da Cidade. No Estádio de Futebol Mané Garrincha, a estrutura espacial, em “Nó de aço” (chapas soldadas e galvanizadas a fogo), similar ao Cruzeta, se apóia no pórtico de concreto das arquibancadas, com balanços de 32,00m, tendo um fechamento curvo. Em 1990, o Pavilhão de Exposição do Parque da Cidade, realizado com o nó estampado Kiefer, onde os banzos e diagonais ficam unidos através de um único parafuso central, entrou para o Guinness Book, como a maior área de estrutura espacial (54.000 m²) montada e erguida em menor espaço de tempo (100 dias). Mas, o preço proibitivo do alumínio (cinco vezes o do aço) faz com que as estruturas espaciais sejam, atualmente, em sua grande maioria, em aço.

No Brasil, a maioria das obras é feita utilizando o nó Cruzeta, que pode não ser muito bonito, mas é de fabricação simples e três vezes mais barato que o Mero. Mas, em um caso excepcional, em que preocupações estéticas se sobrepuseram às considerações de custo, optou-se por um sistema mais caro, o Sphere, derivado do Mero; essa opção foi feita pela empresa Paulo Otávio, na execução da cobertura do Brasília Shopping (1992-94).

Sistemas de Estruturas Espaciais

A eficácia de um sistema estrutural espacial depende da ligação das barras. O nó é a parte essencial de todo sistema pré-fabricado. Ele deve apresentar uma resistência suficiente que permita a transmissão dos esforços, deve ser indeformável sob o esforço de cargas estáticas e dinâmicas, deve assegurar a simplicidade de fabricação, a facilidade e a rapidez de montagem. Assim, o sucesso comercial do sistema depende da simplicidade e da eficácia do nó.

Diversos tipos de nós foram propostos sem, entretanto, responderem satisfatoriamente aos problemas dos esforços solicitantes. Na maior parte dos casos, eles se tornaram muito complexos e, conseqüentemente, caros. Durante os anos 50 e 60, vários sistemas de malhas espaciais proliferaram no mundo, devido às pesquisas dos arquitetos, que exploravam as possibilidades estéticas das configurações espaciais, juntamente com os engenheiros, que buscavam as soluções de ligações para materiais e configurações diversas.

Assim, para as grelhas de dupla camada bidirecional, o sistema Space Deck, baseado na simples repetição de um elemento piramidal em aço, desenvolvido na Grã-Bretanha por Denings of Chard em 1954, se espalhou rapidamente na Inglaterra e em outros países. Nos Estados Unidos, Richard Buckminster Fuller desenvolveu o sistema Octet Truss, cujo nome deriva da geometria octaedro-tetraedro, formado por barras ligadas às extremidades do nó. No Canadá, o sistema Triodetic, utilizando predominantemente o alumínio para a confecção das barras e nós, foi introduzido e comercializado a partir de 1960 pela Fentiman Bros de Ottawa, Ontário. Este sistema foi inovador na introdução de barras afuniladas em sua extremidade, que eram seccionadas segundo um ângulo adequado e introduzidas por pressão nas fendas dentadas do nó. Na França, Stéphane Du Chateau desenvolveu o Tridirecional SDC (1957), o Pyramitec (1960), o Tridimatec (1965), o Unibat (1968), o Spherobat 1979 e o Bamboutec (1984) dentre outros, contribuindo de forma significativa ao desenvolvimento das estruturas espaciais neste século.

Nos anos 80, o sistema Harley, originado na Austrália, surgiu como alternativa competitiva para médios vãos, sendo mais leve e barato que os sistemas convencionais. Durante a década de 80 e início dos anos 90, o Cubic Space Frame, o Spacegrid e o Conder Harley Space Grid, surgidos na Grã-Bretanha, mostraram-se eficientes nas malhas espaciais modulares, juntamente com o Unibat, de Stéphane Du Chateau. Nestes últimos anos, abóbadas de berço em alumínio, muito interessantes, foram construídas na África do Sul pela ABBA Space Structures, de Johannesburg.

Uma vez que a ligação das barras é a condição de eficácia de um sistema estrutural espacial, seu estudo e pesquisa aplicados às realizações, originará inúmeros tipos inventados e desenvolvidos. Entretanto, poucos sobreviverão, pois a maior parte é muito complexa e cara. Nos anos 90, apenas 22 sistemas foram realmente industrializados e aplicados no desenvolvimento de estruturas tridimensionais.

Atualmente, nos países europeus, a pesquisa por novos sistemas visa mais à estética arquitetônica que propriamente à produção e à montagem rápida. É o caso dos sistemas inventados pelo holandês Mick Eekhout que, apesar de se basearem em sistemas anteriores como Mero e Spherobat, são tidos como mais eficientes estruturalmente, conservando a elegância estética. Em outras partes do mundo, principalmente nos Estados Unidos, Brasil e Austrália, maiores produtores de estruturas espaciais, a produção se dá de forma diferente: o sistema capitalista impõe produção, transporte e montagem rápida e eficiente e, principalmente, lucro. Hoje em dia, existem no mundo cerca de cem empresas comerciais, especializadas na fabricação de treliças espaciais de dupla camada.

Sistemas Utilizados em Brasília/Brasil

Em Brasília, os diversos tipos de sistemas estruturais surgiram no início da década de 80. É difícil precisar, com exatidão, a data de sua origem, uma vez que não foram patenteados, e sim idealizados e fabricados por pequenas firmas de engenharia, quando não foram concebidos por pequenas metalúrgicas. Abaixo, estão os sete sistemas que foram mais comercializados, na ordem de sua utilização. Atualmente, apenas três destes sistemas estão realmente disponíveis no mercado e são utilizados em maior escala: nó Típico (de ponta amassada), Cruzeta (nó de chapa) e Sphere (esferas metálicas com furos, onde os tubos são aparafusados).

a) Sistema de Cantoneiras Soldadas

As primeiras estruturas espaciais que surgiram em Brasília, os terminais rodoviários, construídos a partir de 1980, utilizaram uma treliça espacial composta de cantoneiras laminadas a quente (Fig. 1). Não existe propriamente um “nó”, o sistema se constituía de uma pirâmide de base quadrada, com nó soldado, sem nenhum parafuso. A estrutura era formada por banzo inferior, banzo superior e diagonais que, juntos, formavam a base quadrada da pirâmide. Nas regiões que exigiam maiores esforços podia-se notar a presença de alguns tubos ou cantoneiras de chapa dobrada.

Podemos analisar este sistema como se fossem vigas treliçadas planas que se cruzam ortogonalmente, sendo travadas neste ponto de união (banzo inferior), originando assim uma treliça espacial com seção triangular. As vigas planas, constituídas de cantoneiras soldadas, colocadas lado a lado, originam uma

malha (banzo inferior e diagonais). Em seguida, duas cantoneiras são soldadas às pirâmides, fechando os nós na parte superior. Esta treliça espacial era montada sobre uma mesa, levantada por grua até a posição definitiva e, em seguida, se colocavam os pilares. Este sistema primitivo utilizava solda de campo e, embora respondesse satisfatoriamente às solicitações, foi substituído por um mais eficaz, uma vez que o método de produção não era prático.

Nestas estruturas pioneiras, os pilares também eram treliçados, de cantoneiras laminadas a quente, com aço A-36. Os vãos eram pequenos, da ordem de 15m numa direção e 10m na outra, com balanços longitudinais de 5m e transversais de 4m.

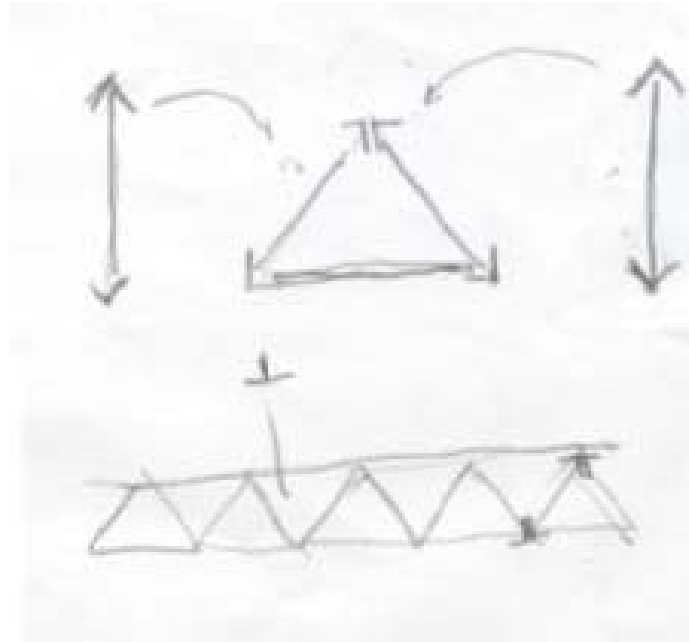


Figura 1: Sistema de Cantoneiras Soldadas

b) Nó Típico (1981)

O sistema espacial mais comum desenvolvido no Brasil é o do nó Típico ou com as pontas amassadas das barras (Fig. 2), popularmente denominado de “borboleta” (porque numa vista superior, vê-se um parafuso central e quatro asas, como uma borboleta). Este nó também é denominado sistema Sarton, sendo composto basicamente da união de tubos, com suas extremidades achatadas, por um único parafuso. As pontas destas barras, amassadas, sobrepondo-se uma às outras, formam os banzos e as diagonais, sendo presas por parafusos de alta resistência.

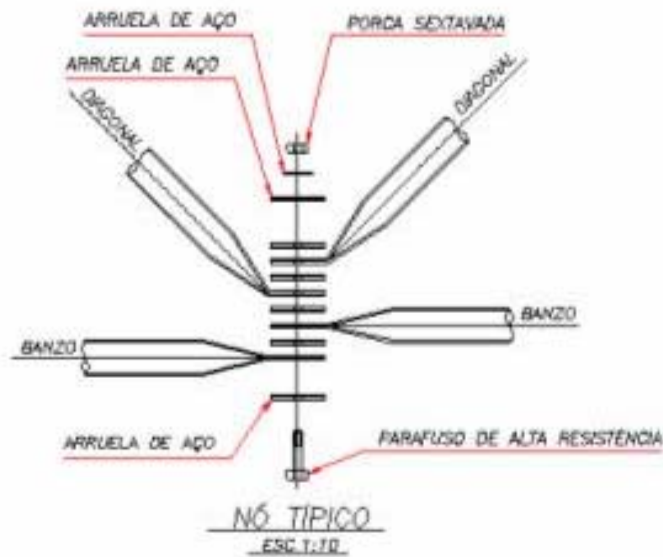


Figura 2: Nó Típico

O nó Típico lembra um pouco o sistema Cactus, desenvolvido em 1970 pelo escocês El-Sheikh, à diferença que neste as barras achatadas e dobradas são utilizadas apenas para formar as diagonais da pirâmide. No sistema nó Típico, elas também compõem os banzos. Apesar da vantagem do custo reduzido e de não necessitar de uma mão de obra especializada para a sua fabricação, este sistema apresenta a inconveniência de não garantir a concentricidade das forças no nó, gerando esforços de segunda ordem e pequenas rotações. O achatamento do tubo pode também comprometer de 30% a 40 % a resistência da peça, embora esta diferença possa ser compensada com o emprego de tubos mais espessos.

c) Nó em forma de Prato (por volta de 1982)

Este nó surgiu das pesquisas particulares do empresário Adalberto Pereira da Silva, já falecido, que, apesar de não ser nem arquiteto nem engenheiro, era um curioso no domínio das estruturas espaciais. Em suas viagens aos Estados Unidos, ele visitava feiras de exposições e fotografava os sistemas, que eram depois adaptados na sua oficina, localizada na cidade satélite do Gama.

Através da sua empresa Metalnox, ele comercializava os sistemas. Assim, após a introdução do nó Típico, o nó em forma de Prato aparece como um sistema transitório, formado de uma chapa estampada, com furos para serem aparafusados. Esta chapa era prensada, originando a sua geometria tridimensional. Cantoneiras de aço laminado a quente eram conectadas aos furos, através de parafusos (Fig. 3). Este sistema é similar ao americano Unistrut, de 1955.

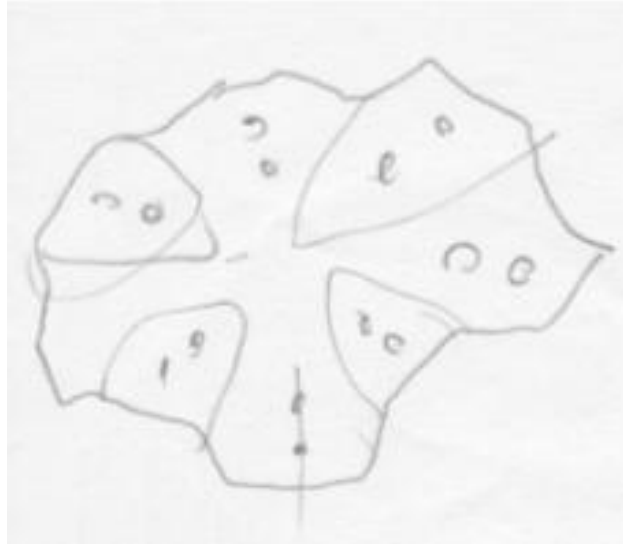


Figura 3: Nó em forma de Prato

Com o sistema Nó em forma de Prato foram realizados alguns galpões que entraram em colapso, devido a problemas de fabricação e à geometria do nó. Impossibilitado de continuar a fabricá-lo, Audo Geremias Filho começou a estudar uma outra solução, que originaria o nó Capacete.

d) Nó Facetado (1986)

A idéia deste nó, desenvolvido por Adalberto Pereira da Silva, auxiliado pelo engenheiro Audo Geremias Filho, provavelmente partiu de uma estrutura americana, cujo nó era composto de diversas faces e furos (Fig. 4a). Mas, como fabricar isto no Brasil? Ele resolveu fazê-lo em ferro fundido, mostrando desconhecimento total da resistência do material. Como a concepção do nó parecia correta para o empresário, ele começou a produzi-lo em escala comercial e vendeu o primeiro sistema para a Onogás, que construiu um galpão no Setor de Inflamáveis (1986). Era muito difícil, na época, realizar um controle de qualidade na produção dessas peças. Os nós, feitos de ferro fundido, eventualmente apresentavam bolhas e rachavam. Alguns tiveram de ser substituídos, porém a estrutura ainda existe e se apresenta em bom estado de conservação. Devido aos problemas que este nó apresentou, Adalberto Pereira da Silva e Audo Geremias Filho resolveram desenvolver um novo sistema, conhecido como nó Capacete.

Em 1995, no Terraço Panorâmico do Aeroporto de Brasília, a Cabrini Construções Metálicas utilizou um nó de sua produção, também Facetado, semi-esférico, com tubos rosqueáveis, em aço cromado. Neste sistema, as extremidades dos tubos possuem ponteiros para serem aparafusadas no nó (Fig. 4b).

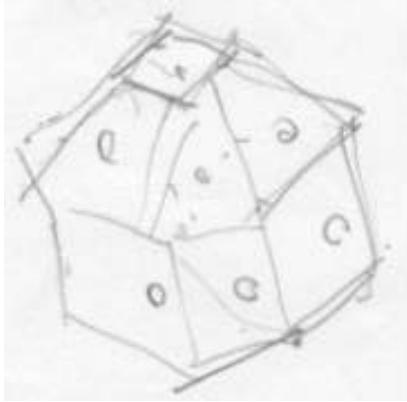


Figura 4a: Nó Facetado



Figura 4b: Nó Facetado – Cabrini Construções

e) Nó Capacete (1986)

Este nó recebe o nome de Capacete, em alusão à sua semelhança com um capacete militar. Também de difícil fabricação, para realizar este nó, Pereira da Silva e Geremias Filho usaram a criatividade. O nó era composto de duas partes: a calota esférica e o corpo cilíndrico, unidos por solda. Para o corpo cilíndrico, utilizava-se um tubo de aço extrudado a quente, de alta resistência mecânica (tubo para ar comprimido, pressão, vapor), da Manesmann, chamado Schedall. Este tubo era cortado em anéis, que podiam facilmente ser soldados às pequenas calotas. Estas calotas eram chapas prensadas em aço SAC-41 ou em qualquer outro aço patinado, com furos. Os tubos Schedall eram furados no gabarito e, em seguida, soldados com solda mig², processo eficiente, mas caro. O sistema era pouco competitivo quando comparado à estrutura convencional plana, feita por serralheiros, mas o cliente podia ser convencido de sua maior eficácia (Fig. 5).



Figura 5: Nó Capacete

Devido ao preço elevado do nó Capacete, Adalberto Pereira da Silva e Audo Geremias Filho resolveram continuar suas pesquisas, criando o nó Noxframe, sistema que se estabeleceu no mercado devido a sua eficácia e a seu custo.

f) Nó Cruzeta ou Noxframe (a partir de 1981)

O sistema consiste de tubos conectados a uma chapa, através de parafusos de alta resistência. Ele é chamado de cruzeta porque tem uma chapa base (que recebe os banzos superior e inferior) e sobre esta dois perfis que se cruzam (daí o nome cruzeta), recebendo as diagonais (Figs. 6a e 6b). Neste sistema de tubos e nós, fabricado em aço, é desprezível a excentricidade e, conseqüentemente, o efeito de 2ª ordem. As extremidades dos tubos podem ter um ou dois parafusos, de acordo com os esforços. Para os esforços maiores, normalmente se utiliza uma “luva”, isto é, uma chapa é soldada dentro do tubo através de um rasgo no mesmo, e é a seção desta chapa saliente em relação ao tubo que é conectada ao nó cruzeta.

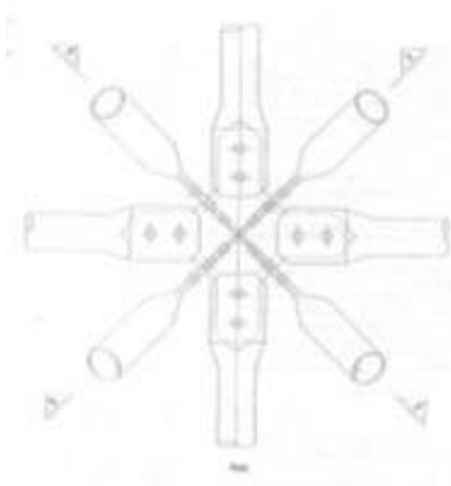


Figura 6a: Sistema Cruzeta: detalhe do nó – planta

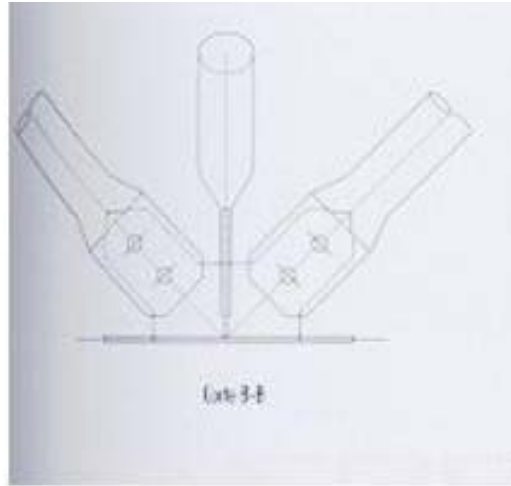


Figura 6b: Sistema Cruzeta: corte B-B

No Brasil e em Brasília, a maior parte das obras é feita com o sistema Cruzeta, por ser extremamente eficiente e de fabricação simples, sendo necessárias apenas uma prensa e uma máquina de solda. Na realidade, este sistema já existia anteriormente. Ele é muito semelhante ao Octatube, desenvolvido na Holanda em 1973, embora neste a conexão seja feita com dois parafusos na extremidade da barra. O Brasil adaptou o sistema pela facilidade de fabricação e pela ausência de excentricidade, principal preocupação com os sistemas espaciais. Vários ensaios foram feitos pela ABCEM³ de São Paulo, comprovando a eficácia do sistema e o baixo custo de produção.

O sistema é apto para cúpulas e estruturas planas, não havendo limitação para a malha. Para vãos pequenos, da ordem de 12m, atingem-se 16 a 25 kgf/m² de estrutura. A modulação ideal da malha é de 2,5 x 2,5m e a geometria mais usual é a do Quadrado/Quadrado 45°, os centros dos quadrados da malha interna apresentando-se deslocados de meio lado com relação aos da malha externa, formando o tetraedro. O diâmetro dos tubos variam de 1 3/4” a 2 1/2” polegadas. O Cruzeta foi desenvolvido e fabricado por vários industriais e engenheiros, cada um adaptando-o de acordo com o projeto e os vãos a vencer.

O sistema Cruzeta também é chamado por alguns, em Brasília, de Noxframe (Fig. 7a), devido provavelmente à empresa Metalnox. Concebido por Adalberto Pereira da Silva, auxiliado por Audo Geremias Filho, este nó não é tão bom, não tem uma geometria e uma resistência como a do nó Capacete, mas tem a vantagem de ser muito barato. Com a forma plana de um octógono, é formado por duas placas

octogonais. A barra que era superposta ao nó (apoiada lateralmente) no sistema inicial, no terceiro anexo da Creche Cabo Frio (1993) foi amassada e entrou no nó (placas) para evitar esforços de cisalhamento e os momentos e cortantes isolados num ponto. Este sistema é eficiente para vãos de até 36m, mas se torna frágil para vãos maiores. Pode também ser utilizado para pequenas cúpulas.

O sistema Cruzeta, em Brasília, atualmente já evoluído, com as barras presas ao nó por dois parafusos de alta resistência, reduzindo o cisalhamento, nada mais é que o nó Noxframe aperfeiçoado. A empresa Berno do Brasil produz um nó semelhante ao Cruzeta, com o nome de Berno-Varitec. E a firma de Estrutura Espacial Trimetal, de Belo Horizonte, desenvolveu um nó também parecido, com o nome de Triform (Figs. 7b e 7c).

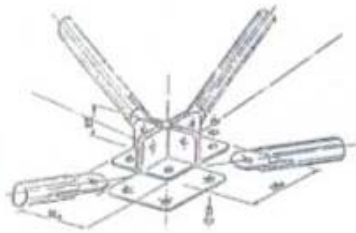


Figura 7a : Sistema Noxframe: detalhe do nó

Figura 7b: Nó Berno-Varitec

Figura 7c: Nó Triform

g) Nó Sphere (1992)

Baseado no sistema Mero, o nó Sphere é composto de esferas metálicas com furos, onde os tubos são aparafusados. Os tubos são conectados a estes nós espaciais esféricos, rombicuoctaédrico ou cilíndrico, sem parafusos aparentes. A grande diferença do sistema Mero reside na quantidade de barras que podem chegar ao nó: enquanto o nó Mero pode receber até 20 barras, no Sphere só é possível 12 barras (Fig. 8).

Desenvolvido pelo engenheiro Nazir A. Abdo, e fabricado com exclusividade, no Brasil, pela Aluço Metalúrgica, este nó, embora caro, possui acabamento perfeito. Foi o escolhido, por sua beleza e eficácia, para cobrir o vão do Brasília Shopping e Towers, projeto de Rui Ohtake e da Paulo Octávio Empreendimentos, em Brasília. Entre outras obras, está presente também no Renaissance São Paulo Hotel e no Centro Empresarial Nações Unidas, em São Paulo.

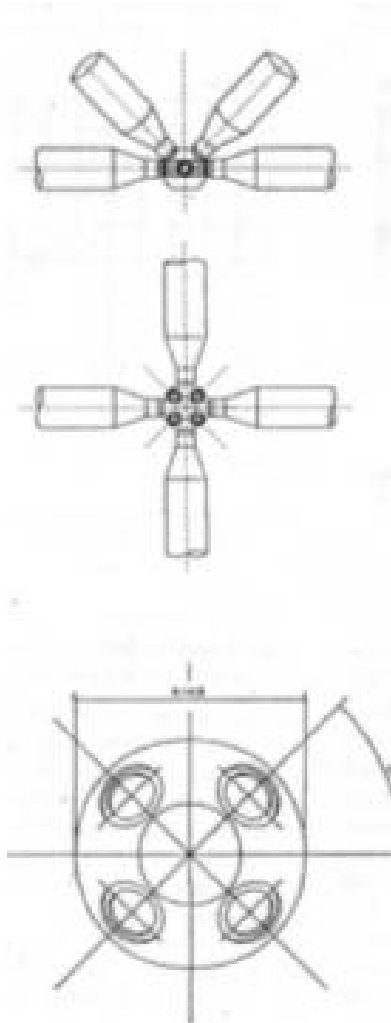


Figura 8: Detalhes do nó Sphere, usinado, desenvolvido por Nazir Abdo

Conclusão

O interesse tardio dos arquitetos e construtores brasileiros pelas estruturas metálicas pode ser explicado culturalmente: como construir e dominar as técnicas de construção de um material ainda pouco difundido no país, enquanto se tem pleno domínio do uso do concreto? O aço começou a desenvolver-se com a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, fundada em 1943 pelo presidente Getúlio Vargas. Em decorrência disto, a maioria dos engenheiros brasileiros dedicava-se até aquele momento ao concreto.

Embora ainda seja pequeno o número de profissionais que se dedicam às estruturas em aço (10%), eles são especialistas no tema e considerados dos melhores do mundo. Na década de 80, era muito difícil especificar um aço estrutural que fosse garantido pela usina quanto à soldabilidade, ao limite de escoamento e à ruptura, mas isto mudou no início da década de 90. Apesar de predominar em nossa produção os perfis de chapa dobrada ou de chapa soldada, a Usiminas começou há um ano a produzir perfis eletrossoldados e a Açominas iniciou em maio de 2002 a produção de perfis laminados, o que possibilitará reduções expressivas no custo das estruturas metálicas.

No Brasil, a construção do Centro de Exposições do Anhembi em 1971, com 260.000 m² de estrutura espacial, mostrou todas as possibilidades desta nova técnica de construção e abriu o caminho para que engenheiros e arquitetos, confiantes nas possibilidades que tal sistema oferece, começassem a pesquisar e a projetar sistemas espaciais em aço.

Não é objetivo deste trabalho o levantamento de todas as obras realizadas em estrutura espacial no Plano Piloto e cidades satélites do Distrito Federal, até porque muitas destas obras constituem mera repetição de um nó, sem nenhum acréscimo tecnológico do sistema adotado. Outras são feitas por serralheiros locais, baseadas em sistemas já consagrados.

Assim, entre os principais projetos realizados pelos arquitetos, engenheiros e construtores que se dedicaram ao estudo e ao aperfeiçoamento dos sistemas estruturais espaciais nestas duas últimas décadas, 78 foram catalogados e, dentre estes, 44 foram detalhados. Neste contexto, verificamos que a maior parte destes projetos vence vãos médios e grandes, com casos esporádicos de fachadas (paredecortina), onde o sistema espacial é utilizado para valorizar a obra.

Terminais rodoviários, aeroportos, shopping centers, feiras populares, supermercados, concessionária de veículos, clubes, ginásios esportivos, escolas e fábricas constituem as principais tipologias arquitetônicas que buscam nos sistemas espaciais a solução para vãos livres, com um processo de construção industrializado rápido e eficaz.

Em Brasília, todas as estruturas são malhas espaciais (treliça espacial de dupla camada superposta, ligada por triangulação), não tendo sido até o momento construídas cúpulas, embora os sistemas adotados permitam a construção de cúpulas de dupla camada.

O primeiro sistema espacial adotado na cidade foi o de Cantoneiras Soldadas, no início da década de 80, com os Terminais Rodoviários. Mas, assim que passou a ser viável a produção dos tubos a preços competitivos, as cantoneiras foram substituídas. Embora os nós devam ser escolhidos em função do tipo de estrutura a ser executada, em Brasília predomina o sistema Cruzeta, por apresentar a melhor relação custo/benefício. Mas, num mesmo projeto podem haver variações do nó, com angulações diferentes da “cruz” do sistema, assim como da quantidade de parafusos e da forma do perfil soldado. Se a carga for muito elevada e os vãos muito grandes, os tubos que compõem o banzo superior e o inferior são aparafusados na placa, com um parafuso para cada tubo, e as diagonais saem da cruzeta. No sistema convencional, os banzos são fixados na parte central do nó, abaixo da placa, com apenas um parafuso. Há, na realidade, uma superposição de tubos amassados neste local, como no sistema Típico.

Embora tenham sido citados vários sistemas de estruturas espaciais difundidos no mercado internacional, no Brasil o único comercializado por um curto período foi o sistema Mero, pela empresa italiana Cabrini. Em São Paulo, a Alaxis Tecnologias Inovativas, do engenheiro Nazir A. Abdo, fabrica um nó semelhante ao Mero, chamado Sphere.

A geometria que predomina é a de pirâmide de base quadrada, com a malha deslocada no espaço, com a diagonal apoiando-se no banzo inferior e superior, formando o tetraedro. O nó delimita estas estruturas, não havendo estruturas de geometria triangular, devido à complexidade do nó exigido para tal solução. A

modulação ideal da malha é a quadrada (2,00 x 2,00m, 2,50 x 2,50m, etc). O diâmetro padrão do tubo varia, normalmente se situa entre 1 ¼ “ e 2 ½” polegadas.

Quanto à altura adotada em Brasília para as treliças espaciais, podemos dizer que os valores entre L/10 e L/15, sendo L o vão considerado, são mais conservadores que os propostos, por exemplo, por Makowski, que recomenda que a altura permaneça entre L/20 e L/40 do vão. É importante salientar que estes valores sofrem influência do tipo de malha, do tipo de perfis adotados, assim como da rigidez do sistema utilizado, ou seja, como trabalha o conjunto barras-nó. As coberturas espaciais conseguem manter a altura do pé-direito constante em toda a edificação. A distância, porém, entre o banzo superior e inferior inibe a escolha do sistema para uso em residências e ambientes com pé-direito reduzido, uma vez que a estrutura espacial pode chegar a 2 metros, ocupando a metade do espaço em locais com pé-direito de 4 metros.

Embora os nós variem num sistema espacial, o modo de conexão da estrutura espacial com os pilares não difere muito do utilizado em outras estruturas metálicas para coberturas, como as treliças. Encontramos, nas edificações analisadas, os dois mais comuns: apoio em forma de “pé-de-galinha”, com os tubos do encaixe saindo abaixo da estrutura espacial, ou apoio direto no banzo inferior. Com pequenas variações, uma placa metálica é chumbada e grauteada no topo do pilar. A chapa tem uma base com pés para o encaixe dos tubos.

Para trabalhar as dilatações da estrutura espacial, podem ser colocados trilhos de teflon na peça de ligação, que permitem o deslizamento do sistema sobre o pilar de concreto. O travamento adequado dos tubos no pilar pode impedir que a cobertura danifique-se ou até desprenda-se com a ação do vento, pois é muito leve e suscetível a movimentos. Em média, uma cobertura espacial com 40m de vão pesa 20 kgf/m² de aço e 3 kgf/m² de telhas de alumínio. Dependendo do local, a sucção do vento pode chegar a 70 kgf/m².

A sustentação das telhas segue um princípio mais simples: calços montados nos nós apóiam as terças sobre as quais as placas são colocadas. O método não muda para cúpulas ou outras coberturas em curva. Nestes casos, as peças tubulares são montadas de forma a se circunscreverem na cobertura, prendendo todas as placas.

As telhas metálicas são as mais utilizadas nas coberturas de estruturas espaciais, pois acompanham melhor as dilatações e contrações das barras tubulares, além de possuírem peso próprio reduzido, o que não sobrecarrega o sistema. Por ser um sistema vazado, este tipo de estrutura permite a penetração da luz natural, iluminando o ambiente, através de telhas transparentes. Para garantir um melhor isolamento termoacústico, os fornecedores sugerem o uso de telhas com miolo de EPS, poliuretano ou lã de vidro. Porém, a acústica interna continuará prejudicada, pois o sistema vazado não permite o fechamento hermético das divisões internas da edificação.

As estruturas espaciais podem ser instaladas pelo método de içamento, no qual o sistema todo é montado no solo e, em seguida, erguido por guias, torres ou guindastes. Este método é recomendado quando o piso não possui desnível e não há obstáculos para o içamento. A montagem é realizada no solo, sobre pequenos suportes de madeira. Apenas as peças de fixação com os pilares são instaladas no alto. Deve-se, portanto, escolher o momento ideal para erguer a estrutura, de preferência sem vento, pois um grande sistema solidário, se balançado, pode entrar em movimento pendular e cair dos guindastes. Outro processo, muito

utilizado atualmente, é o da montagem no alto. O processo é realizado sobre vigas e andaimes e se inicia por um pilar, formando uma linha que se estende até o apoio mais próximo. Quando os banzos já estão sustentados, são colocados os tubos que ligam essas faixas. Depois de pronta, a manutenção da estrutura espacial é simples e deve ser feita a cada 5 anos: consiste na inspeção dos nós e dos tubos, verificando a pintura e o surgimento de trincas.

Podemos ressaltar a vantagem na utilização das estruturas espaciais em função do seu custo final, que pode variar com o tipo de sistema e de material empregado. Em geral, estes preços são poucos superiores aos das estruturas convencionais (entre 20 e 25 dólares o m² de estrutura pintada e montada), contudo a diminuição de peso da estrutura espacial pode conduzir a uma sensível economia relativa ao conjunto. Esta redução de custo pode crescer tanto quanto maiores forem os vãos a serem vencidos, podendo chegar a 20%. Numa estrutura convencional (treliça metálica plana) não se pode espaçar os apoios mais que 6 metros, devido às peças secundárias – terças e caibros – que possuem tamanhos mais ou menos padronizados no mercado. Além do maior número de fundações, a estrutura convencional necessita de travamento, enquanto que a espacial, além de vencer vãos maiores, já está toda intertravada.

Não há dúvida que os sistemas de estruturas espaciais são imbatíveis para coberturas de grandes vãos. Mas, atualmente, consegue-se realizar estruturas metálicas para cobertura de vãos até 40 metros, utilizando 15 kfg/m² de aço. Este sistema se torna mais vantajoso que os espaciais para vãos menores, uma vez que o consumo de material, nas estruturas espaciais, para um vão similar, se situa entre 20 e 25 kgf/m². Outros optam, segundo o engenheiro Rodney Farah, por estruturas em shed para cobrir grandes galpões, por permitir uma melhor ventilação e iluminação do espaço. As estruturas em shed possuem, porém, a desvantagem de exigir maior altura da viga de sustentação, aumentando o preço final da obra.

Curiosamente, em Brasília, as encomendas de obras de estruturas espaciais não se restringem às solicitações governamentais. A maior parte dos projetos advém das construtoras, como a Paulo Octávio Empreendimentos, que há quatro anos solicita os serviços da CPC – Construções e Processos Científicos.

O arquiteto Rogério Carvalho de Mello Franco resalta a importância de se dar maior ênfase ao estudo das estruturas espaciais nas universidades, pois, segundo ele, os arquitetos que buscam nesta solução a resposta aos seus projetos são “curiosos, que conhecem o sistema de estrutura espacial através de livros e outros projetos”. Os alunos optam por outros sistemas, como os de concreto ou de madeira, por simples desconhecimento. É essencial que professores pesquisem o tema e incentivem os alunos no aprendizado e utilização deste tipo de estrutura.

Em Brasília, há um vasto campo para as estruturas espaciais, sistema que alia grandes vãos e custo reduzido. Nos próximos dez anos, sem dúvida, o grande filão será as novas universidades e escolas.

Este trabalho apresenta os principais sistemas industrializados no mundo e no Brasil. O know-how não está propriamente no cálculo da estrutura espacial, mas sim na concepção do nó. No Brasil, temos verificado uma certa constância e prevalência na adoção de apenas um modelo de estrutura espacial, o Cruzeta. É necessário que os arquitetos conheçam as características dos outros sistemas, para melhor especificarem e descobrirem outras possibilidades plásticas, respondendo mais adequadamente à concepção estrutural do projeto.

Notas

¹ Companhia Urbanizadora da Nova Capital – empresa responsável pela construção de Brasília, criada em 1956 por Juscelino Kubitschek.

² Solda feita com eletrodo, utilizando uma máquina de corrente contínua ou alternada.

³ Associação Brasileira dos Construtores de Estruturas Metálicas.

Referências Bibliográficas

ABDO, Nazir. Repensando as estruturas espaciais. Revista Finestra/Brasil, São Paulo, Ano 6, nº 23, p. 59-63, out/dez 2000.

BORREGO, John. Space Grid Structures. The MIT Press - Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts and London, England, 1968.

CHILTON, John. Space Grid Structures. Architectural Press, Oxford, 2000.

CPC – Estruturas Metálicas. Catálogo publicado pela CPC – Construções e Processos Científicos Ltda, Brasília. 13 p.

EEKHOUT, Mick. Structures Tubulaires en Architecture. TUDelft – Delft University of Technology, edité par le CIDECT, Genève, 1994.

EEKHOUT, Mick. Architecture in space structures. Uitgeverij 010 Publishers, Rotterdam, 1989.

Entrevista com o engenheiro Rodney Farrah: 26/08/2002 e 03/10/2002 (Brasília-DF).

Entrevista com o arquiteto Rogério Carvalho de Mello Franco: 23/08/2002 (Brasília-DF).

Entrevista com o arquiteto Sérgio Parada: 22/08/2002 e 27/08/2002 (Brasília-DF).

Entrevista com o engenheiro Welder Silva de Miranda: 05/08/2002 (Brasília-DF).

Entrevista com o engenheiro José Humberto de Paula: 22/04/2002 e 25/04/2002 (Brasília-DF).

Entrevista com o engenheiro Athail Rangel Pulino Filho: 29/01/2002 (Brasília-DF).

Estruturas Espaciais, Trabalho para informação e auxílio geral no projeto de treliças espaciais. Alaxis Tecnologias Inovativas S/C Ltda, São Paulo, 1998. 15 p.

L'Art de l'Ingénieur- constructeur, entrepreneur, inventeur, sous la direction d'Antoine Picon. Editions du Centre Pompidou / Le Moniteur, Paris, 1997.

MAKOWSKI, Zygmunt S. Constructions spatiales en acier, edité par le Centre Belgo-Luxembourgeois d'Information de l'Acier, Bruxelles, Bélgica, 1964.

MARKS, Robert W. The Dymaxion world of Buckminster Fuller. Southern Illinois University Press, USA, 1960.

OHTAKE, Ruy. Escultura em vidro e alumínio: Centro Empresarial Brasília shopping Towers. Revista Finestra/Brasil, São Paulo, Ano 4, nº 13, p.100-105, abril/junho 1998.

PORTO, Cláudia E. L'évolution des structures dans l'architecture du XXème Siècle. 1990. 349 f. Dissertação (Mémoire de D.E.A.) - Université de Paris I – Panthéon-Sorbonne, Paris, setembro 1990.

PORTO, Cláudia E. L'évolution des structures spatiales à travers l'oeuvre de Stéphane du Chateau. 1993. 2 v. 426 f. e 222 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Paris I-Panthéon-Sorbonne. Paris, junho de 1993.

PORTO, Cláudia E. A concepção estrutural na obra de Stéphane du Chateau: das treliças metálicas à evolução dos sistemas espaciais. Cadernos Eletrônicos da Pós, FAU/UnB, 1999, 20 p.

PORTO, Cláudia E. Estruturas Espaciais: estado da questão em 1950. Cadernos Eletrônicos da Pós, FAU/UnB, 1999, 21 p.

SILVA, Kepler C. Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais. 1999. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, fevereiro de 1999.

SUBRAMANIAN, N. Principles of Space Structures. Wheeler, Madras, 1983.

ZANETTINI, Siegbert. Razão e Sensibilidade. Revista Finestra/Brasil, São Paulo, Ano 7, nº 25, p. 63-66, abril/junho 2001.

Crédito das Ilustrações

Figura 1: Sistema de Cantoneiras Soldadas (Desenho Rogério Carvalho de Mello Franco)

Figura 2: Nó Típico (Desenho Carlos Vinicius Lima Meirelles)

Figura 3: Nó em forma de Prato (Desenho Rogério Carvalho de Mello Franco)

Figura 4a: Nó Facetado (Desenho Rogério Carvalho de Mello Franco)

Figura 4b: Nó Facetado – Cabrini Construções: nó e tubo (Arquivo Cláudia Estrela Porto)

Figura 5: Nó Capacete (Desenho Rogério Carvalho de Mello Franco)

Figura 6a: Sistema Cruzeta: detalhe do nó – planta (ABDO, Nazir. Repensando as estruturas espaciais. Revista Finestra/Brasil, São Paulo, Ano 6, nº 23, out/dez 2000, p. 63)

Figura 6b: Sistema Cruzeta: corte B-B (ABDO, Nazir., op. cit., p. 63)

Figura 7a: Sistema Noxframe: detalhe do nó (Desenho Carlos Vinicius Lima Meirelles)

Figura 7b: Nó Berno-Varitec (OLIVEIRA, Gley K. L.; PORTO, Cláudia E. Possibilidades do uso de estruturas metálicas espaciais em estádios do século xx. Ensaio em Teoria e História de Arquitetura e Urbanismo. FAU-UnB, Brasília, agosto 1996, p. 59)

Figura 7c: Nó Triform (Arquivo Cláudia Estrela Porto)

Figura 8: Detalhes do nó Sphere, usinado, desenvolvido por Nazir Abdo (ABDO, Nazir., op. cit., p. 59)