

# Treliças Espaciais – Aspectos Gerais, Comportamento Estrutural e Informações para Projetos

ALEX SANDER CLEMENTE DE SOUZA<sup>1</sup>ROBERTO MARTINS GONÇALVES<sup>2</sup>

## 1. Introdução e aspectos históricos

Estrutura espacial pode ser definida como um sistema estrutural em que não há subsistemas planos principais, definição apresentada pelo Prof. MAKOWSKI, um dos pioneiros nas pesquisas destas estruturas. Pode-se perceber que o termo estrutura espacial é bastante abrangente, envolvendo estruturas reticuladas constituídas por elementos de barra; estruturas contínuas constituídas por placas, membranas ou cascas; estruturas mistas, constituídas pela combinação de elementos discretos e contínuos.

A “treliça espacial” é um caso particular das estruturas reticuladas tridimensionais (estruturas espaciais), formadas por elementos de barra, não coplanares, ligadas umas as outras por dispositivos chamados nós.

Este conceito de elementos não coplanares contrapõem-se as estruturas convencionais, ou seja, com um “plano estrutural” definido como, por exemplo, os edifícios industriais onde o conjunto formado pelos pilares e pela treliça de cobertura define um plano estrutural principal.

O Centro de Exposições do Anhembi, na cidade de São Paulo, construído no final da década de 60, foi o principal marco da construção em treliça metálica espacial no Brasil. A estrutura abrange uma área de 62.500 m<sup>2</sup> e é composta por cerca de 60 mil barras tubulares circulares de alumínio, com um peso total de cerca de 360 toneladas.

O Prof. MAKOWSKI (1981) salienta que, devido à interconexão dos elementos que compõem a treliça espacial, esta apresenta maior capacidade de responder a uma ação localizada e também a capacidade de distribuir amplamente esforços entre os elementos, além das seguintes vantagens adicionais:

- Apresenta boa relação entre peso próprio e vão;
- Possibilita beleza arquitetônica, flexibilidade quanto a

disposição dos pilares e grandes vãos livres;

- Fácil transporte, fabricação e montagem com elementos com peso próprio reduzido;
- Apresenta grande repetição elementos e nós resultando redução de custos (para grandes vãos) se comparado com estruturas convencionais;
- Possibilita ampliação e fácil desmontagem para estruturas não permanentes;

Neste artigo estão destacadas informações e comentários sobre as treliças espaciais de malha dupla, ou seja, banzo inferior e superior, tendo em vista que são as mais utilizadas no Brasil.

## 2. Aspectos gerais das treliças espaciais

### 2.1 Malhas

O comportamento estrutural das treliças espaciais é função do arranjo dos elementos que a compõem. Os principais arranjos dos elementos de duas camadas paralelas estão apresentados na Figura 1.

A disposição mais utilizada é o arranjo das barras quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo ilustradas nas fotos da Figura 2.

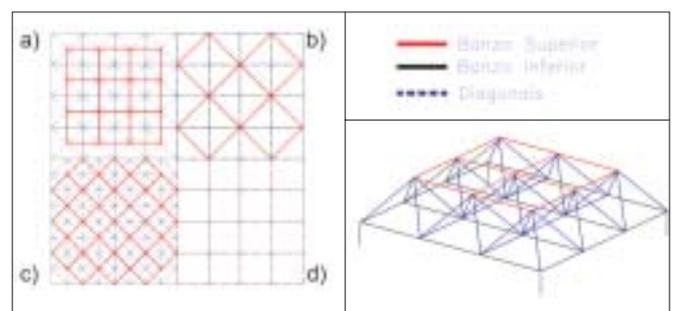


Figura 1 - Arranjo dos elementos em treliças espaciais: a) quadrado sobre quadrado; b) quadrado sobre quadrado em diagonal; c) quadrado diagonal sobre quadrado diagonal; d) quadrado sobre quadrado sem diagonais escondas.

<sup>1</sup> Professor Doutor, Departamento Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

<sup>2</sup> Professor Associado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP



Figura 2 – Exemplos de treliças de quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo

Normalmente, o arranjo que resultar em menor número de barras e principalmente de nós, independente do consumo de material (peso total da estrutura), pode ser a solução

mais econômica. Diferentes arranjos dos elementos conduzem a diferentes distribuições de esforços entre as barras.

## 2.2 Tipos de Apoios e dimensões

As treliças espaciais podem ser apoiadas em pilares de concreto armado ou de aço, diretamente em um nó do banzo inferior ou superior. Quando as reações de apoio são elevadas é usual adotar elementos adicionais para absorver essas

reações, minimizando os esforços normais nas diagonais que convergem para o nó de apoio. Esses elementos podem ser vigas de transição utilizando dois nós para apoio, ou pirâmides invertidas, também conhecidas como “pés de galinha”. Os tipos de apoios mais comuns são os apresentados na Figura 3.

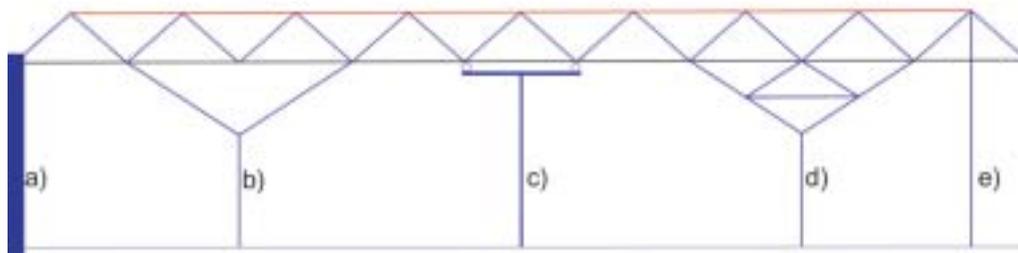


Figura 3 – Tipos de apoios: a) apoio direto no banzo inferior; b) “pé de galinha”; c) apoio com viga de transição; d) “pé de galinha” com travejamento interno; e) apoio direto no banzo superior.

## 2.3 Relações dimensionais

Para a altura das treliças espaciais, encontram-se na literatura as recomendações desde  $\frac{h}{20}$  a  $\frac{h}{40}$  onde  $h$  é o maior vão, ressaltando-se que a arquitetura muitas vezes define estas dimensões. Salienta-se que a definição da altura estabelece as dimensões da malha e recomenda-se manter o ângulo das diagonais entre 40° e 55°.

## 2.4 Seções transversais dos elementos e materiais

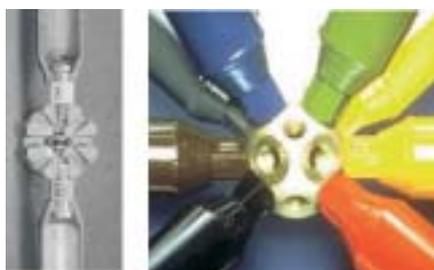
No Brasil, o aço é o material mais utilizado na construção de treliças espaciais; o alumínio também é utilizado, no entanto, em menor escala.

Em linhas gerais, qualquer tipo de seção transversal pode ser utilizado nos elementos de uma treliça espacial. A definição do tipo de seção depende principalmente do sistema de ligação. As treliças espaciais no Brasil são

construídas, predominantemente, com barras de seção tubular circular devido a simetria em qualquer plano, facilidade no detalhamento da ligação e as características favoráveis desta seção quanto a flambagem.

## 2.5 Ligação entre barras – Nós

O encontro das barras de uma estrutura denomina-se nó e para as treliças espaciais o tipo de seção transversal das barras irá determinar o tipo de nó. Existem vários tipos de nós desde os mais simples utilizando superposição de barras com amassamento nas extremidades conectadas por um parafuso, até os mais elaborados com peças esféricas fundidas e usinadas com elementos especiais rosqueados. Entre estes últimos destaca-se o nó tipo Mero, apresentado na Figura 4 juntamente com outros sistemas de ligações comuns no exterior.



Nó tipo MERO - Fonte: [www.mero.com](http://www.mero.com)



Nó tipo TRIODETIC - Fonte: [www.triodetic.com](http://www.triodetic.com)



Nó tipo ECO - Fonte: [www.ecospacesystem.it](http://www.ecospacesystem.it)



Nó tipo VESTRUT - Fonte: [www.vestrut.com](http://www.vestrut.com)

Figura 4 - Exemplos de nós utilizados em treliças espaciais

Existem ainda muitos outros sistemas de ligação, patenteados ou não, para estruturas espaciais, porém, a maioria deles é de uso restrito e regional sem grandes êxitos comerciais.

### 2.5.1 Nós utilizados no Brasil

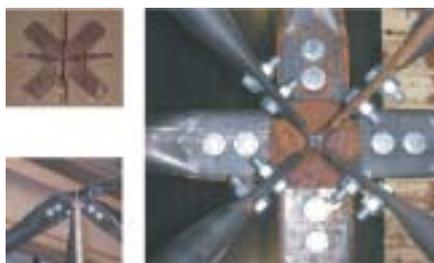
A Figura 5 ilustra alguns exemplos dos sistemas de ligação mais utilizados no Brasil.



Nó tipo "amassado" (típico) - um único parafuso



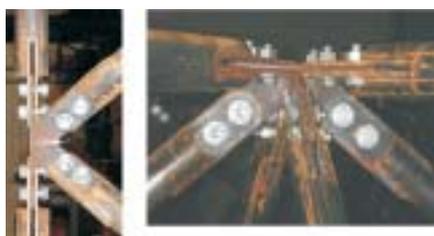
Nó com chapa de banzo



Nó de aço - aletas



Nó de aço - vários ângulos



Nó de aço - barras com chapas de "ponteira"



Nó de aço - chapas de "ponteira" enrijecidas

Figura 5 - Exemplos de nós utilizados em treliças espaciais

Salienta-se que os nós são fundamentais no comportamento estrutural das treliças espaciais e oportunamente será publicado um artigo específico sobre este assunto.

### 3. Algumas considerações sobre a análise de treliças espaciais

As estruturas espaciais, e em particular as treliças, apresentam particularidades para a análise estrutural, entendendo-se como tal a obtenção dos esforços internos e o dimensionamento de elementos e nós, devido a tridimensionalidade, grande número de elementos estruturais e o alto grau de hiperestaticidade interna.

#### Análise Estrutural

Tradicionalmente, o cálculo corrente da maioria das treliças espaciais é realizado com uma análise elástica linear adotando-se o modelo de treliça ideal, ou seja, considerando nós como articulações perfeitas e barras ideais, sem imperfeições iniciais e tensões residuais.

Estas hipóteses não consideram, portanto, excentricidades, variações de temperatura não previstas no projeto, esforços provenientes da montagem, variações de seção nas extremidades das barras e tipo do nó que podem influenciar significativamente na resposta estrutural das barras e da estrutura como um todo quer nos resultados dos deslocamentos, quer na distribuição dos esforços internos.

A análise não linear reflete melhor as condições reais da estrutura e podem ser considerados dois tipos de não linearidade:

Geométrica: o cálculo é efetuado na posição deslocada da estrutura;

Física: considera o comportamento não linear do material na relação tensão/deformação;

Para as treliças espaciais é conveniente que a não linearidade geométrica seja considerada. Os deslocamentos da estrutura podem alterar significativamente o equilíbrio, podendo conduzir, para algumas barras, a esforços superiores aos previstos na análise teórica elástica linear. Estes esforços internos adicionais podem provocar a falha prematura de barras ou de toda a estrutura.

A não linearidade física esta relacionada ao comportamento do material podendo subestimar os deslocamentos e superestimar os esforços internos, associando as regiões de concentração de tensão, em particular os nós, onde os efeitos da não linearidade física são importantes.

### 3.1 Ações

As principais ações a serem consideradas na análise de treliças espaciais são:

**Ações Permanentes** - peso próprio dos elementos da estrutura, barras e nós (0,10 a 0,30 kN/m<sup>2</sup>); estruturas de suporte das telhas e fechamentos laterais, terças, longarinas, correntes, suportes (0,03 a 0,09 kN/m<sup>2</sup> em função da dimensão dos módulos); elementos de vedação, telhas, foros e demais itens de fechamento (função do tipo telhas e forros utilizados); demais elementos, tais como: passarelas, escadas de manutenção, tubulações de água, esgoto, águas pluviais, gás, dutos e cabos elétricos.

**Ações variáveis** - ações resultantes do uso da edificação, vento, variação de temperatura, sobrecargas devidas ao empoçamento de águas pluviais<sup>3</sup>, sobrecargas em escadas e passarelas

de manutenção, sobrecargas de instalações não permanentes, sobrecargas de equipamentos industriais e pontes rolantes.

**Sobrecarga** - sobrecarga nominal mínima de 0,25 kN/m<sup>2</sup> é recomendada pela NBR 8800 (1986) nas coberturas comuns, não sujeitas a acúmulos de quaisquer materiais.

Equipamentos – talhas, pontes rolantes, considerar os respectivos coeficientes de impacto recomendados pela NBR 8800(1986), que são:

☞ para talhas (movimentos rotativos), ☞=1,5 equipamentos com movimentos alternados. Para as pontes rolantes devem ser consideradas as ações dinâmicas

para as quais a NBR 8800 (1986) estabelece relações para ações estáticas equivalentes.

As ações do vento são as apresentadas na NBR 6123 (1988), especial atenção deve ser tomada na questão dos coeficientes externos e internos para o caso de balanços laterais e marquises em estrutura espacial, com os coeficientes de forma sendo obtidos, normalmente, pela soma dos coeficientes de forma das paredes com os da cobertura. Em muitos casos recomenda-se a realização de ensaios em túnel de vento para a determinação mais apropriada dos coeficientes de pressão para estruturas espaciais.

### 3.2 Estado limite de utilização – Flechas

As recomendações de limites para as flechas são as apresentadas na NBR 8800 (1986). As treliças espaciais normalmente são utilizadas para grandes vãos livres onde se recomenda a utilização de contraflechas para as ações permanentes, que devem ser executadas por meio de alterações nos comprimentos das barras dos banzos, que pode ser redução no comprimento das barras do banzo inferior ou acréscimo no comprimento das barras do banzo superior, Figura 6.

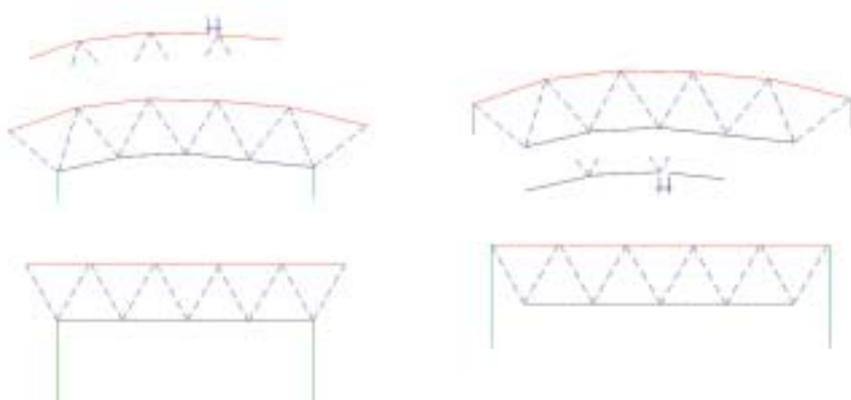


Figura 6 – Contraflecha em treliças espaciais

Quando o acréscimo ou redução nas barras é realizado nas duas direções gera-se uma contraflecha esférica, para a alteração no comprimento das barras do banzo em apenas uma direção tem-se a contraflecha cilíndrica.

<sup>3</sup> Para declividade do telhado inferior a 5% especial atenção deve ser dada às sobrecargas provenientes de empoçamento de águas pluviais, quer pela demora no escoamento das águas em coberturas muito extensas, quer pela existência de deslocamentos (flechas).

## Conclusões

O sucesso ou insucesso do sistema estrutural denominado treliça espacial é determinado pela correta escolha de alguns parâmetros que definem sua geometria. Os principais parâmetros que interferem no comportamento final da estrutura, como também nos

custos e nas técnicas construtivas são: relação altura/vão, comprimento dos módulos, tipos de apoios, localização e distribuição destes apoios. Estas variáveis devem ser convenientemente avaliadas e definidas ainda na fase de anteprojeto.

Outro aspecto relevante no projeto de treliças espaciais é o tipo de ligação

entre barras, vários sistemas diferentes estão disponíveis, com diferentes graus de eficiência.

Para se definir o sistema de ligação a utilizar devem-se analisar os vãos, a magnitude dos carregamentos e esforços nas barras, facilidade de fabricação e montagem e, finalmente os custos envolvidos. ■

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR-8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios: método dos estados limites. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). NBR-6123 - Forças devidas ao vento em edificações: procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR-8681 Ações e segurança nas estruturas: procedimentos. Rio de Janeiro.

MAKOWSKI, Z.S., A worldwide review of space structures in sports buildings. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPACE STRUCTURES FOR SPORTS BUILDINGS, Beijing, Oct. 1987. Proceedings. London, Elsevier Applied Publishers.

SOUZA A.S.C., Análise teórica e experimental de treliças espaciais. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

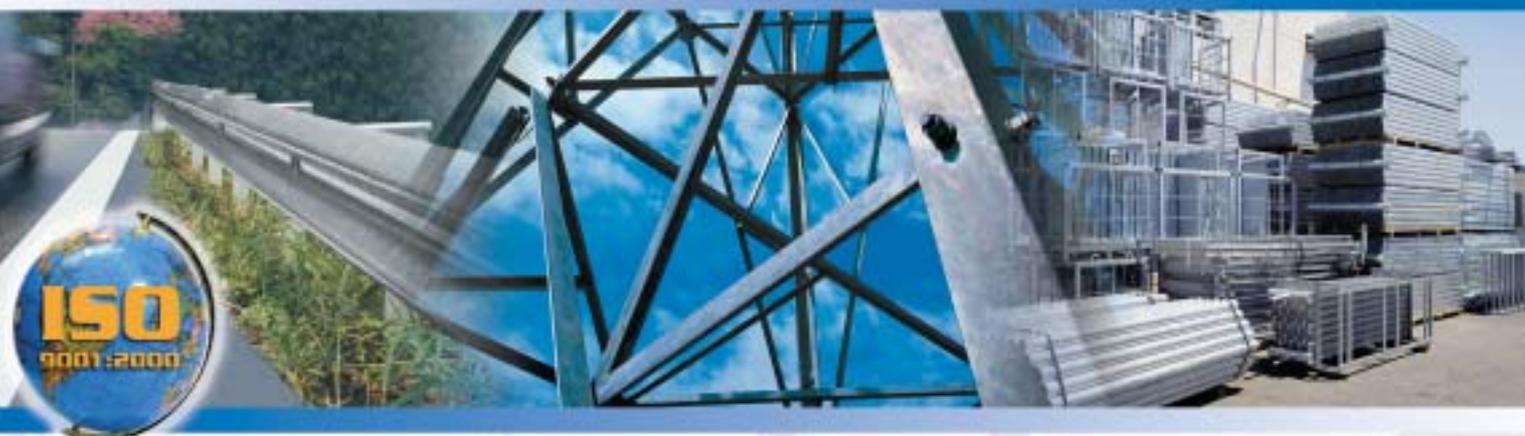
SOUZA, A.C.S.; GONÇALVES, R.M.; MALITE, M.; MAIOLA, C.H.; Theoretical analysis of the structural performance of space trusses commonly used in Brazil. International Journal of Space Structures. v.18, n.3, p.167-179, 2003.

SOUZA, A.C.S.; GONÇALVES, R.M., Mechanism of Collapse on Space Trusses with Steel Hollow Circular Bars with Flattened Ends. International Journal of Space Structures. v.20, n.4, p.201-209, 2005.

SOUZA, A.N. (2002). Análise da concepção do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

## Galvanização a Fogo Mangels. Protegendo seu Aço da Corrosão.

A Mangels é pioneira no tratamento da superfície de peças de aço com a utilização da Galvanização a fogo. Confiabilidade, durabilidade, versatilidade, menor custo e beleza são as vantagens desse processo.



## Defensa Metálica Mangels. Qualidade no Produto, Segurança na Estrada.

As Defensas Metálicas Mangels são largamente utilizadas nas rodovias e avenidas como meio seguro de proteger o condutor e passageiros de acidentes.

Proporciona ótima resistência ao impacto e grande capacidade de absorção de energia cinética do veículo desgovernado. Atende às NBR 6970/6971 e 6323.

Rua Panambi, 220 Cumbica Guarulhos SP 07224-130  
Tel/Fax: (11) 6412-8911 galvanizacao@mangels.com.br  
[www.mangels.com.br](http://www.mangels.com.br)

**Maxizinco**  
A fórmula Mangels de galvanizar

**Mangels**