



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**HELICIO MÁRIO COELHO DA SILVA
MILLEN RAMOS DE SOUZA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DOS PERFIS
TUBULARES CIRCULARES POR PERFIS EM CANTONEIRA
SIMPLES NA COBERTURA EM ESTRUTURA ESPACIAL DA
RODOVIÁRIA DE BREU BRANCO/PA**

Tucuruí/PA
2014

HELICIO MÁRIO COELHO DA SILVA
MILLEN RAMOS DE SOUZA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DOS PERFIS TUBULARES
CIRCULARES POR PERFIS EM CANTONEIRA SIMPLES NA COBERTURA EM
ESTRUTURA ESPACIAL DA RODOVIÁRIA DE BREU BRANCO/PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil na Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal Pará.

Orientador: Prof^o. D.Sc. Aarão Ferreira Lima
Neto.

Tucuruí/PA
2014

HELICIO MÁRIO COELHO DA SILVA
MILLENO RAMOS DE SOUZA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DOS PERFIS TUBULARES
CIRCULARES POR PERFIS EM CANTONEIRA SIMPLES NA COBERTURA EM
ESTRUTURA ESPACIAL DA RODOVIÁRIA DE BREU BRANCO/PA**

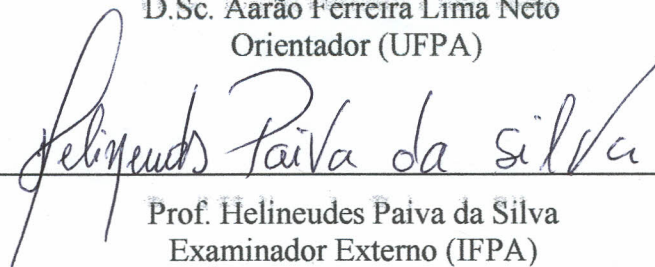
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil na Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal Pará.

Tucuruí/PA, 09 de dezembro 2014.

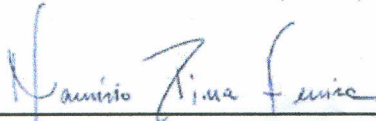
Aprovado por:



D.Sc. Aarão Ferreira Lima Neto
Orientador (UFPA)



Prof. Helineudes Paiva da Silva
Examinador Externo (IFPA)



Prof. D.Sc. Maurício de Pina Ferreira
Examinador (UFPA)

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus por me guiar pelo caminho da educação e por me ajudar a enfrentar as dificuldades impostas pela vida. Aos meus pais, Raimundo Alberto F. de Souza e Célia da R. Ramos, minha irmã Brenda Ramos de Souza e demais familiares pela força para com o incentivo na educação e pelos os esforços imprescindíveis para que conquistasse a educação em seu nível superior.

Milleno Ramos de Souza.

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus e aos meus pais, Manoel Martins e Hosana Coelho (*in memória*) por tudo que fizeram por mim, que possibilita a realização deste momento da minha vida. Aos meus irmãos: Silvaneide, Chirleide, Cleide Lúcia, Hexxon, Welss, Marisan e Suelane que, mesmo distantes, sempre torcem para que eu alcance meus objetivos educacionais.

Helcio Mário Coelho da Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a DEUS em primeiro lugar, que nos concedeu a oportunidade de iniciar este curso e nos abençoou com saúde e perseverança para continuarmos na busca de conhecimento para nossa formação profissional.

Ao nosso orientador Aarão Ferreira Lima Neto pelo apoio técnico e científico no presente trabalho, pela confiança em nós depositada e principalmente por nos permitir um aperfeiçoamento profissional e no ganho de experiência como ser humano.

Aos nossos queridos familiares pelo grande apoio dado no decorrer de nossas vidas, principalmente na área dos estudos e sempre nos incentivando a atingir grandes metas de nossa vida.

À empresa Eletrobrás Eletronorte S/A por ter nos fornecido o projeto estrutural, arquitetônico, além de memoriais descritivos e planilha orçamentária que foram de suma importância para a elaboração deste trabalho.

Aos colaboradores do CAMTUC e ao corpo docente da Faculdade de Engenharia Civil que sempre se dedicou a passar o máximo de conteúdo teórico e prático e não medindo esforços para a formação dos futuros profissionais.

E aos amigos por anos de amizade, confiança, solidariedade e momentos de alegrias proporcionados a todos nós.

RESUMO

As edificações executadas em perfis de aço avançaram muito nas últimas décadas em todo o Brasil, e dentre estas a opção pelo sistema estrutural em treliça espacial, porém, ainda abaixo do grau de utilização do concreto armado. Nas coberturas de grandes áreas, as treliças espaciais em aço são essenciais para vencer grandes vãos, apresentam peso próprio reduzido, facilidade no transporte, armazenamento e montagem. O sistema de ligação (nó) e o tipo de perfil das barras são fatores que influenciam na redução de custos, na agilidade da construção e na segurança estrutural de uma treliça espacial. Desta forma, neste trabalho, é elaborado um estudo sobre a cobertura, em treliça espacial, da rodoviária do município de Breu Branco/PA. Objetivando uma análise comparativa em relação a custo e capacidade de carga entre o sistema estrutural empregado na mesma, com perfil metálico tubular circular e ligação com nó típico, e um novo sistema estrutural com barras em cantoneira de abas iguais e um novo nó para este perfil. Para tanto, foi realizada uma análise computacional com o *software* comercial SAP 2000 v14[®], por meio do qual foi dimensionado o perfil cantoneira adequado para estrutura. Para a análise de custo utilizou-se a Tabela de Composição e Preços para Orçamento (TCPO, 2010), elaborando planilhas de composição de custo unitário, considerando os preços de serviços e de insumos correntes na cidade de Tucuruí/PA e no Sistema Nacional de Preços e Insumos (SINAPI, 2014).

Verificou-se que a diferença no consumo de aço entre os dois tipos de perfis foi pequena, com o percentual de 0,08%. Em relação ao custo a estrutura em cantoneira apresentou redução de valor na ordem de 30,93% em relação ao perfil tubular circular. Quanto à praticidade de execução observou-se que a principal diferença consiste no tipo de ligação, onde o nó típico é realizado por meio da estampagem das extremidades das barras tubulares, fixando-as com um único parafuso. Porém os nós dos perfis cantoneira necessitam de um dispositivo de ligação, nó de aço, feito em chapas soldadas em aço, utilizando maior quantidade de parafusos para fixação, em relação aos perfis tubulares, assim a diferença do custo total diminui, mas, ainda assim a treliça em perfil cantoneira apresenta menor custo que a treliça em perfil tubular. Desta forma, observa-se que o emprego do perfil cantoneira em estruturas espaciais apresenta menor custo em relação aos perfis tubulares. Observou-se também, que além de menor custo, no sistema com perfis cantoneira, a estrutura apresenta maior eficiência na ligação devida a maior rigidez do nó de aço em relação ao nó típico.

Palavras-chaves: Estrutura espacial; sistema de ligação; estruturas em aço; perfis tubulares.

ABSTRACT

The buildings executed in steel profiles have advanced greatly in recent decades in Brazil and among them the choice of structural system in space truss, however, still below the level of use of reinforced concrete. In large coverage areas, the spatial trussed steel are essential to win large spans, have low weight, ease of transportation, storage and assembly. The connection system (node) and the type of profile bars are factors that influence the cost savings, agility of construction and structural safety of a space truss. Thus, in this work, is prepared a study on the coverage, space truss, the road in the city of Breu Branco/PA. Aiming a comparative analysis in relation to cost and load capacity of the structural system used in the same, with circular tubular steel profile and connecting with typical node, and a new structural system with bars angle equal tabs and a new node for this profile. For this, a computational analysis commercial software SAP[®] 2000 v14 was performed whereby the angle profile structure is suitable for scaled. For the cost analysis we used the composition table and Prices Budget (TCPO, 2010), developing spreadsheets composition of unit cost, considering the prices of services and current inputs in the city of Tucuruí/PA and the National System of prices and Supplies (SINAPI, 2014) .

It was found that the difference in steel consumption between the two types of profiles was small, with a percentage of 0,08%. Regarding the cost structure in bracket decreased value in the order of 30,93% over the circular tubular profile. As regards the practical implementation it was noted that the main difference is the type of connection where the node is typically realized by means of embossing the ends of the tubular bars, fixed with a single screw. However, the nodes of the angle profiles require a connection device node steel , made in welded steel sheets, using greater amounts of screws for fastening in relation to tubular profiles, and the difference in the total cost decreases but still the lattice in profile angle has lower cost than the lattice of tubular profile. Thus, it is observed that the use of the angle profile into spatial structures apresenta lower cost compared to tubular profiles. It was also observed that in addition to lower cost, the system with angle profiles, the structure has a higher efficiency due to more rigid connection of steel node compared to typical node.

Keywords: spatial structure; Connection system; steel structures; tubular profiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cúpula do " <i>Halle au Blé</i> " (Mercado de Trigo).....	21
Figura 2.2 - Elementos de uma treliça espacial.	22
Figura 2.3 - Protótipo: torre de observação de Alexander Graham Bell.	23
Figura 2.4 - Acidentes com estruturas espaciais: a - Centro de Convenções de Manaus;	24
Figura 2.5 - Centro de Exposições Anhembi.....	25
Figura 2.6 - Vistas internas e externas do complexo industrial de Jacarepaguá da Cervejaria Brahma.	26
Figura 2.7 - Hangar de Manutenção em Mumbai/Índia.	26
Figura 2.8 - Cobertura do antigo estádio Mané Garrincha.	27
Figura 2.9 - Uso de treliça espacial em estádios modernos (Itaquerao-SP)	27
Figura 2.10 - Treliça espacial da Estação das Docas em Belém/PA.	28
Figura 2.11 - Perfis usados em treliças espaciais: a - cantoneira dupla; b - perfil U;	31
Figura 2.12 - Tipos de estampagem nas extremidades das barras de seção tubular circular. ..	32
Figura 2.13 - vistas de treliças com duas e com três camadas de banzo.	34
Figura 2.14 - Algumas geometrias mais comuns de treliças espaciais e suas classificações...35	
Figura 2.15 - Alguns elementos geométricos formados por malhas espaciais.....	36
Figura 2.16 - Apoio tipo pirâmide invertida “pé de galinha”	36
Figura 2.17 - Formas de apoios mais utilizados.....	37
Figura 2.18 - Elementos do sistema Mero.....	38
Figura 2.19 - Elementos do sistema Unistrut.	39
Figura 2.20 - Sistema Space Deck.....	40
Figura 2.21 - Ilustrações do sistema Triodetic.	41
Figura 2.22 - Elementos do sistema Nodus.....	41
Figura 2.23 - Elementos do sistema Catrus.	42
Figura 2.24 - Nó típico.	43
Figura 2. 25 - Colapso em nó típico.	44
Figura 2. 26 - Nó típico com chapa complementar.	44
Figura 2.27 - Nó de aço.	45
Figura 2.28 - Elementos do nó com chapa de ponteira.	46
Figura 2.29 - Sistemas brasileiros patenteados: a-Bemo Varitec; b-Sistema Axis; c-Sistema Aluaço Space.	47
Figura 3.1 - Terminal rodoviário de Breu Branco/PA.....	51
Figura 3.2 - Pilar e apoios tipo “pé de galinha”.	52

Figura 3.3 - Ligações utilizadas na treliça: a - nó típico; b - nó típico com chapa complementar.	53
Figura 3.4 - Modelagem de estrutura espacial no SAP.	55
Figura 3.5 - Modelagem com perfil tubular circular.	55
Figura 3.6 - Modelagem com perfil cantoneira de abas iguais.....	55
Figura 3.7 - Tela do SAP onde se define a seção das barras.	57
Figura 3.8 - Tela do SAP onde é lançado o valor da sobrecarga.....	57
Figura 3.9 - Visualização do modelo com sobrecarga aplicada.	58
Figura 3.10 - Tela do SAP para definir as seções do perfil cantoneira	59
Figura 4.1 - Perfil tubular circular com extremidades estampadas.	66
Figura 4.2 - Montagem das barras tubulares com nó típico.	67
Figura 4.3 - Elementos do nó de aço.	68
Figura 4.4 - Nó de aço com chapas simples	68
Figura 4.5 - Idéia para ligação do perfil cantoneira.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Comparação do consumo de aço.....	62
Gráfico 4.2 - Comparação do custo unitário.	64
Gráfico 4.3 - Comparação de custos final da estrutura.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Relação altura/vão e seus autores.....	33
Quadro 2.2 - Cotação de preço de estrutura espacial.	48
Quadro 3.1 - Planilha de cargas concentradas sobre os nós.....	57
Quadro 3.2 - Dimensões e propriedades geométricas dos perfis tubulares circulares.	60
Quadro 3.3 - Dimensões e propriedades geométricas de perfis cantoneiras.	60
Quadro 4.1 - Planilha de composição de custo unitário para perfil tubular circular.....	63
Quadro 4.2 - Planilha de composição de custo unitário para perfil cantoneira.....	63
Quadro 4.3 - Planilha de quantidade e preço para perfil tubular.....	64
Quadro 4.4 - Planilha de quantidade e preço para perfil cantoneira.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição de custo de uma estrutura.....	49
Tabela 3.1 - Dimensões das barras em perfil tubular circular.....	58
Tabela 3.2 - Dimensões das barras em perfil cantoneira de abas iguais... ..	59
Tabela 4.1 - Consumo de aço para perfil tubular.....	61
Tabela 4.2 - Consumo de aço para perfil cantoneira.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Apud</i>	citado por, segundo
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
BDI	Bonificação de Despesas Indiretas
cm	centímetro
E	módulo de elasticidade
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
<i>et al</i>	e outros
<i>f_u</i>	tensão de ruptura do aço
<i>f_y</i>	tensão de escoamento do aço
GPa	gigapascal
<i>Ibdem</i>	mesma obra
Kg	quilograma
KN	quilonewton
<i>l</i>	comprimento do vão
m	metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
mm	milímetro
Mpa	megapascal
NBR	Norma Brasileira
PA	Estado do Pará
S/A	Sociedade Anônima
SAP	Structural Analysis Program
SINAPI	Sistema Nacional de Preços e Insumos
SP	Cidade ou Estado de São Paulo
ton	tonelada
TCPO	Tabela de Composições de Preços para Orçamentos
γ	peso específico
ν	coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLOGRÁFICA	20
2.1	ESTRUTURAS METÁLICAS	20
2.2	ESTRUTURAS ESPACIAIS	21
2.3	TRELIÇAS ESPACIAIS.....	22
2.3.1	Definição	22
2.3.2	Surgimento e evolução das treliças espaciais.....	23
2.4	PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS TRELIÇAS ESPACIAIS	25
2.4.1	Exemplos do uso de treliças espaciais.....	25
2.5	VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TRELIÇAS ESPACIAIS.....	28
2.5.1	Vantagens	28
2.5.2	Desvantagens.....	29
2.6	ELEMENTOS PARA PROJETO DE TRELIÇA ESPACIAL	29
2.6.1	Ações a ser consideradas no projeto.....	30
2.6.2	Material e seção transversal das barras	31
2.6.3	Relações dimensionais: altura e tamanho do módulo da treliça.....	32
2.6.4	Tipos de treliças espaciais quanto ao arranjo geométrico	33
2.6.4.1	Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em elevação... 34	
2.6.4.2	Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em planta	34
2.6.4.3	Classificação das treliças espaciais quanto ao volume gerado pela união das barras	36
2.6.5	Tipos de apoio	36
2.6.6	Sistemas de ligação em treliças espaciais.....	37
2.6.6.1	Principais sistemas de ligação de estruturas espaciais utilizados no mundo.....	38
2.6.6.1.1	Sistema Mero.....	38
2.6.6.1.4	Sistema Unistrut	39
2.6.6.1.2	Sistema Space Deck.....	39
2.6.6.1.3	Sistema Triodetic.....	40
2.6.6.1.5	Sistema Nodus	41

2.6.6.1.6	Sistema Catrus	41
2.6.6.2	Principais sistemas de ligação utilizados no Brasil (não patenteados).....	42
2.6.6.2.1	Sistema com nó típico	43
2.6.6.2.2	Sistema de nó típico com chapa complementar	44
2.6.6.2.3	Sistema com nó de aço	45
2.6.6.2.4	Sistema de nó com chapa de ponteira.....	46
2.6.6.3	Sistemas brasileiros patenteados	47
2.6.7	Custos	47
2.8	TRABALHOS RELACIONADOS ÀS ESTRUTURAS ESPACIAIS	49
2.8.1	Simulação numérica do comportamento estrutural de torres de linhas de transmissão em perfis tubulares	50
2.8.2	Estudo de viabilidade de cobertura metálica com alternativas em perfis formados a frio, laminados abertos ou tubulares.....	50
3	METODOLOGIA CIENTÍFICA	51
3.1	PROJETO BASE ADOTADO	51
3.1.1	Caracterização da estrutura espacial da rodoviária de Breu Branco	51
3.1.2	Tipos de ligações (nós) utilizados	52
3.2	PARÂMETROS GERAIS	53
3.3	MÉTODOS	53
3.3.1	Propriedades do aço utilizadas para análise	56
3.3.2	Ações de projeto	56
3.3.3	Dimensionamento do perfil cantoneira	59
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO DE AÇO	61
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS	63
4.3	PRATICIDADE DE EXECUÇÃO DA TRELIÇA ESPACIAL CONSIDERANDO AS LIGAÇÕES PARA PERFIL TUBULAR CIRCULAR E PERFIL CANTONEIRA	65
4.3.1	Produção dos perfis	65
4.3.2	Praticidade de Montagem considerando os tipos de ligações	66
4.3.3	Consumo de aço considerando os elementos de ligação	69
4.3.4	Custo da estrutura considerando os elementos de ligação	70
4.3.5	Eficiência estrutural considerando os elementos de ligação	70
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
5.1	CONCLUSÕES	71
5.1.1	Consumo de Aço	71

5.1.2	Custo da Estrutura	71
5.1.3	Praticidade de Execução.....	72
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXO A – PLANTA DE COBERTURA	77
	ANEXO B – PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA ESPACIAL	78
	ANEXO C – VISTAS DA ESTRUTURA ESPACIAL.....	79
	ANEXO D – DETALHE DO NÓ TÍPICO	80

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas, especialmente as estruturas planas e estruturas espaciais em aço, estão cada vez mais presentes na construção civil, aonde vem sendo empregadas em coberturas de grandes áreas livres, sem intervenções internas (pilares). Atualmente, engenheiros civis e arquitetos têm demonstrado bastante apreço por essas estruturas, por proporcionarem o alcance de grandes vãos, beleza arquitetônica, soluções geométricas complexas, leveza estrutural, redução no tempo de montagem, flexibilidade e agilidade na execução de obras.

Segundo Porto (1999), a integração das estruturas espaciais na construção civil se deu por um aparecimento tardio, isso porque os engenheiros desde 1850 determinam os esforços nas barras de tesouras isostáticas pelos métodos de Culmann ou de Ritter e não dispunham de nenhum meio material para calcular, de um modo exato e rápido, os esforços abundantes que aparecem nas estruturas espaciais em malhas, com alto grau de hiperestaticidade interna. Só com o advento dos computadores pelos escritórios de cálculo entre 1960 e 1970 é que esse sistema estrutural se impôs no mercado.

Os estudos sobre estruturas espaciais tem se reforçado nas últimas décadas devido ao progresso de sua utilização em diversos países, inclusive no Brasil, onde as principais pesquisas estão relacionadas aos tipos de ligações, que tem sido um considerável desafio em relação ao custo/benefício, isto é, com a economia na sua produção e com a diminuição das excentricidades dos esforços, já que os sistemas de ligações são um fator importante para o desenvolvimento e utilização das estruturas espaciais.

Dentre os tipos de estruturas em aço, as treliças espaciais são de bastante emprego em projetos construtivos em que se pretende alcançar grandes vãos como, por exemplo, na construção de rodoviárias, centros de convenções, hangares, depósitos, entre outros. Nesse tipo de estrutura o fator economia é de grande importância, exigindo um alto grau de planejamento das etapas construtivas consideradas desde a concepção e elaboração do projeto, a escolha do material e do tipo de perfil, o tamanho do vão, o sistema de ligação, o processo de montagem, até o acabamento final, para que não haja desperdícios e conseqüentemente prejuízos. Fazendo-se necessário um levantamento de custo, por meio de orçamentos detalhados de todas as etapas de construção.

O custo de uma treliça espacial está diretamente relacionado às dimensões determinadas no projeto arquitetônico e às escolhas do projetista no que diz respeito aos elementos de projeto tais como: material, tamanho e arranjo das barras, tipo de perfil,

tamanho do vão e, principalmente, ao tipo de ligação (nó) que pode ser adotado. Esses elementos são interligados e influenciam na praticidade de construção da estrutura. A adoção de treliça espacial para uma obra se justifica, principalmente pelo tamanho do vão, ao passo em que o vão cresce, a estrutura se torna mais efetiva do ponto de vista financeiro. Também um reduzido número de nós e barras diminuem custos.

As treliças espaciais são, geralmente, constituídas de perfis metálicos tubulares, por proporcionar maior resistência aos momentos fletores e torsões. Estas estruturas não são constituídas em aço apenas, mas também podem ser em alumínio, em que utiliza a forma básica triangular, considerada uma forma geométrica indeformável, para produzir um conjunto tridimensional resistente, de alta eficiência estrutural.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como meta principal comparar os resultados de dimensionamento estrutural e orçamentário da estrutura espacial da cobertura da rodoviária municipal de Breu Branco/PA, utilizando dois tipos de perfis metálicos: perfil tubular circular, que já constituem a cobertura existente, e perfil cantoneira de abas iguais simples.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Comparar o consumo de aço entre perfil cantoneira de abas iguais e perfil tubular circular, utilizado na treliça espacial;
- ✓ Comparar o custo da execução da estrutura, considerando o preço dos perfis e da mão de obra empregada;
- ✓ Observar a praticidade de execução da treliça espacial com perfil tubular circular, tendo o nó típico como ligação, e com perfil cantoneira de abas iguais, considerando o nó de aço como ligação.

1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização das estruturas em aço na construção civil vem crescendo a cada ano no Brasil. E dentre os sistemas estruturais mais adotados as treliças espaciais vem ganhando

espaço no mercado, e para essas estruturas normalmente os perfis metálicos tubulares são os mais empregados, porém são perfis onerosos, gerando custos para o total da obra e os principais tipos de ligações para os tubos são patenteados. E desta forma torna-os ainda mais caros, e os tipos de ligações não patenteados como o nó típico são simples e baratos, contudo não garante uma segurança estrutural. Então com o intuito de reduzir os custos inerentes ao perfil de tubo circular e a praticidade de execução, é que se propõe neste trabalho uma análise de custos e agilidade de execução, empregando perfis cantoneira simples, que é um perfil de mais fácil produção, como opção para substituir os perfis tubulares em estruturas espaciais. O que pode proporcionar uma economia significativa nos custos de execução das estruturas como um todo e também no incentivo a estudo específico para elaboração de um tipo de sistema de ligação adequado para a cantoneira.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, baseada em consultas a diversos trabalhos acadêmicos, realizados no Brasil nos últimos anos, necessários para dar suporte teórico e um melhor entendimento sobre estruturas espaciais, abordando a definição, o surgimento e evolução do uso de treliças espaciais, suas aplicações, suas vantagens e desvantagens, destacando os elementos necessários para a elaboração de um projeto de treliça espacial. Ao final do capítulo aborda-se sobre o custo de construção desse tipo de estrutura.

O capítulo 3 apresenta o terminal rodoviário municipal de Breu Branco/PA como o projeto de pesquisa, descrevendo a características da estrutura espacial da cobertura. Define e a metodologia utilizada para a realização da análise. E apresenta o *software* comercial SAP 2000 v.14[®], por meio do qual se faz estimativa da carga de projeto e dimensiona os perfis cantoneiras. Apresenta também, as dimensões do perfil tubular circular e do perfil cantoneira de abas iguais usados para esta análise comparativa.

O capítulo 4 apresenta os resultados da comparação do consumo de aço e dos custos para execução da treliça espacial, por meio do levantamento de custo, baseado na Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010) e no preço da mão de obra e dos materiais praticados no mercado de Tucuruí. Também são apresentadas algumas considerações sobre a praticidade de execução da treliça espacial usando o nó típico para perfil tubular circular e nó de aço para perfil cantoneira de abas iguais.

No capítulo 5 são expostas as conclusões, tiradas a partir das análises comparativas, e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

O termo estrutura metálica abrange estruturas construídas a partir do uso de vários materiais tais como o alumínio, o ferro e o aço, utilizados na produção de componentes estruturais. É importante distinguir estes materiais, principalmente o ferro e o aço, pois muitas vezes são entendidos, equivocadamente, como materiais que possuem as mesmas características, quando, de fato, são materiais com propriedades estruturais diferentes, ainda que ambos possuam, em comum, o minério de ferro e o carvão como suas matérias-primas básicas. Além da distinção entre o ferro e o aço, existem variações nas características de seus produtos finais, tais como ferro fundido, ferro forjado, e os aços com características específicas para fins estruturais, ou seja, com elevada resistência mecânica e resistência à corrosão. Essas propriedades específicas são proporcionadas de acordo com a composição e o teor de seus elementos químicos, como, por exemplo, o teor de carbono dos aços utilizados na construção civil, é da ordem de 0,18 a 0,25% (BANDEIRA, 2008).

Segundo Chamberlain *et al.* (2013), o ferro vem sendo usado como adornos nas construções ou para fins militares desde aproximadamente 8.000 anos, pelas civilizações antigas no Egito, na Babilônia e na Índia. Entretanto, a primeira estrutura metálica considerada como um avanço tecnológico foi uma ponte, em ferro fundido, sobre o rio Severn na Inglaterra, concluída em 1779. Já a aplicação do ferro em edifícios tem como marco o ano de 1851, com a construção do Palácio Cristal em Londres, onde foram utilizados processos de fabricação e montagem semelhantes aos processos empregados atualmente na construção metálica.

Bandeira (2008) afirma que as estruturas metálicas ressurgiram nos anos 70 do século XX, principalmente na Europa, empregando o aço aparente na arquitetura resultando em obras que representam beleza arquitetônica, alta eficiência estrutural e tecnológica e boa funcionalidade.

Conforme Silva, M. (2010), as estruturas metálicas compõem as estruturas principais dos sistemas de vedação (vedação lateral e principalmente de coberturas), sendo responsáveis por sustentar as cargas do peso próprio dos elementos de vedação, do peso próprio das terças, cargas devido à ação do vento e eventuais cargas suspensas. Alguns sistemas de estruturas metálicas são: treliças planas e seus diversos tipos como os arcos, treliças tipo “shed”, tesouras de duas águas, etc.; e as estruturas espaciais utilizadas principalmente em coberturas

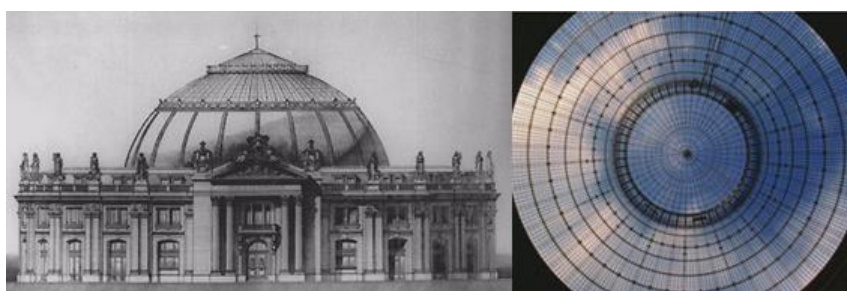
de grandes vãos, caracterizadas por duas direções horizontais principais e a altura (direção vertical). As estruturas espaciais são comumente chamadas de estruturas tridimensionais ou, simplesmente, treliças espaciais.

2.2 ESTRUTURAS ESPACIAIS

O termo estrutura espacial abrange as estruturas tridimensionais (três dimensões: comprimento, largura e altura) constituídas por malhas planas ou curvas.

Segundo Makowski (1987 *apud* MAGALHÃES e MALITE, 1998; PORTO, 1999), as estruturas espaciais podem ser agrupadas em três categorias principais: estruturas reticuladas, constituídas por barras e unidas entre si por nós, como exemplo, as cúpulas, abóbadas, e treliças espaciais; estruturas contínuas constituídas por placas, como exemplo, as membranas metálicas ou cascas em que os revestimentos colaboram com a resistência; e as construções suspensas em cabos, como exemplo, telhados sobre cabos, pontes estaiadas e pontes pênsil.

Conforme Sampaio (2004), as primeiras estruturas metálicas reticuladas tridimensionais foram algumas cúpulas construídas na Europa no início do século XIX, sendo o ferro fundido aplicado como material estrutural. Em 1811, o "*Halle au Blé*" (Mercado de Trigo) foi construído em Paris por Joseph Bélanger e Brunet, arquiteto e engenheiro, respectivamente. O mercado conta com uma cúpula formada por domos hemisféricos em ferro fundido (figura 2.1).



**Figura 2.1 - Cúpula do "*Halle au Blé*" (Mercado de Trigo).
Fonte: Sampaio (2004).**

Atualmente, o desenvolvimento de estruturas espaciais na Europa está voltado mais para a eficiência estrutural e para a elegância estética e arquitetônica. Já em outros países, como exemplo, Estados Unidos, Brasil e Austrália, maiores produtores de estruturas espaciais, as pesquisas são voltadas para desenvolver sistemas que, além da eficiência estrutural, resultem em ganhos capitalistas como rapidez e eficiência na produção, no transporte e na montagem, objetivando o lucro como resultado final (PORTO, 2002).

Em se tratando de eficiência estrutural, Silva, M. (2010) afirma que o alto grau de indeterminação (hiperestaticidade) e a triangulação interna entre as barras são os fatores básicos para a alta capacidade de carga de um dos tipos de estruturas reticuladas mais utilizadas em todo mundo, as treliças espaciais.

2.3 TRELIÇAS ESPACIAIS

2.3.1 Definição

Sampaio (2004) define treliças espaciais como estruturas constituídas por elementos lineares que formam duas ou mais camadas (malhas) de banzos, em geral camadas paralelas, interligadas por meio de diagonais e/ou montantes nos pontos de ligações chamados nós, onde geralmente recebe a aplicação dos carregamentos. A figura 2.2 destaca os principais elementos de uma treliça espacial.

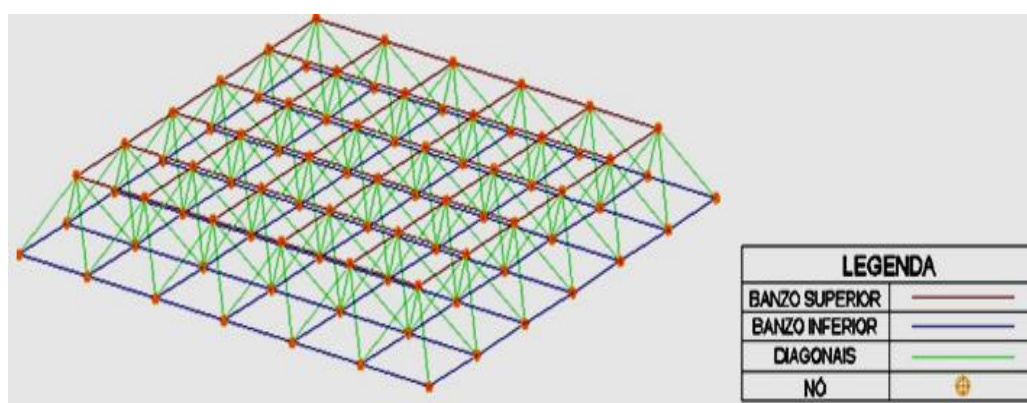


Figura 2.2 - Elementos de uma treliça espacial.

Na treliça espacial cada barra tem função estrutural de suportar as cargas axiais, os nós possuem a capacidade de distribuir os esforços às demais barras, impedindo que o sistema entre em colapso. Dessa forma, um conjunto de barras suporta as cargas adicionais caso uma barra atinja sua capacidade máxima, pois os elementos trabalham de forma integrada. Ressalta-se que a estrutura espacial deve ser indeformável sob a ação de esforços de cargas estáticas e dinâmicas. Além das características estruturais das barras, a eficácia estrutural e a simplicidade na fabricação dos nós, são fatores importantes para proporcionar facilidade e rapidez na montagem da estrutura (MAGALHÃES e MALITE, 1998).

A redistribuição dos esforços devido à falha de um elemento é vista por muitos autores como aspecto positivo, mas, Murtha-Smith (1988 *apud* MAIOLA, 1999) alerta que a

redistribuição dos esforços da barra que entra em colapso pode causar uma sobrecarga nas barras adjacentes, provocando colapsos sucessivos, caracterizando assim, em um mecanismo de colapso progressivo.

2.3.2 Surgimento e evolução das treliças espaciais

A primeira treliça espacial foi construída em 1907 pelo escocês Alexander Graham Bell, o famoso inventor do telefone. Ele desenvolveu um protótipo de estruturas tridimensionais pré-fabricadas para construção de uma torre de observação para experiências com aeroplanos no Canadá. Este protótipo (figura 2.3) era composto por barras de mesmo comprimento, ligadas por nós padronizados e bastante simples, compondo assim uma estrutura em elementos modulares tetraédricos pré-fabricados em usina e unidos no canteiro de obra (PORTO, 1999). Com isso mostrou-se que poderia fabricar estruturas simples, leves e resistentes, e com sua industrialização poderia resultar em redução de custos (MAGALHÃES e MALITE, 1998).

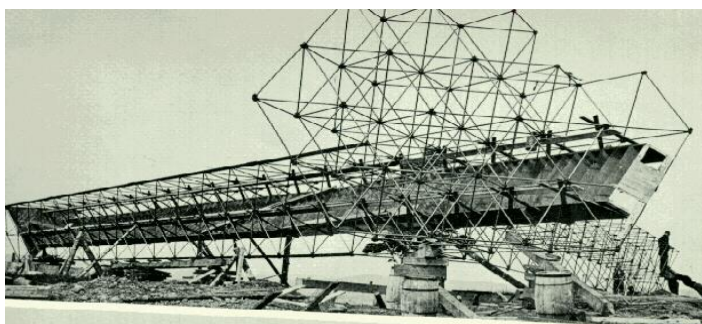


Figura 2.3 - Protótipo: torre de observação de Alexander Graham Bell.
Fonte: Porto (1999).

A evolução e o uso mais acentuado das treliças espaciais ocorreram tardiamente por razões como: problema de ligação das peças, pois, na época, só se dispunha de rebites e de parafusos o que dificultava a confecção dos nós; a preferência dos engenheiros pelo concreto armado e a construção metálica com vigas de alma cheia; e as dificuldades para determinar os deslocamentos e esforços nas barras das estruturas com auto grau de hiperestaticidade, pois calculava-se, usando métodos manuais que demandava por muito tempo (PORTO, 2002).

Pelas razões já citadas, a utilização de treliça espacial só começou a se expandir a partir 1940, após o aperfeiçoamento da solda como meio de ligação e o desenvolvimento de alguns sistemas de ligação. Mas ela só veio a ter uma utilização mais significativa no mercado de construção civil entre 1960 e 1970, graças à utilização dos computadores pelos escritórios

de cálculo e aos avanços das pesquisas teóricas e práticas, realizadas a partir desse período, que muito contribuíram para o desenvolvimento de técnicas numéricas que possibilitaram os cálculos e análises das estruturas espaciais de maneiras mais eficazes (SOUZA, Alex, 2003).

Souza, Arnaldo, e Malite (2005) consideram que a primeira conferência sobre estruturas espaciais, realizada em Londres em 1966, foi o marco para a integração e a intensificação das pesquisas voltadas a este tema. Outro fato importante ocorreu no ano seguinte, 1977 quando foi criado, pela Associação Americana de Engenharia Civil (ASCE) - *American Society of civil engeneers*, nos Estados Unidos, um comitê voltado para o desenvolvimento de pesquisa sobre estruturas tridimensionais. Souza, Alex, (2003) afirma que este comitê divulgou diversos trabalhos a respeito do comportamento, elaboração de projeto e construção destas estruturas, difundindo assim as treliças espaciais de aço e alumínio em muitos países, aonde vem sendo desenvolvidas e utilizadas de várias formas.

No Brasil, as pesquisas sobre treliças espaciais só se intensificaram a partir de meados da década de 1990, motivadas pela necessidade de investigar as causas de acidentes ocorridos com estas estruturas, como exemplo, o colapso total do Centro de Convenções de Manaus (figura 2.4a) ocorrido no final do ano de 1994 e a ruína parcial da cobertura do Aeroporto Internacional de Belém/PA em 1999 (figura 2.4b).



(a) (b)
**Figura 2.4 - Acidentes com estruturas espaciais: a - Centro de Convenções de Manaus;
B - Aeroporto Internacional de Belém/PA.**

Fonte: Sampaio (2004).

Fatos como estes motivaram a área de estruturas metálicas do departamento de engenharia de estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP) a desenvolver algumas pesquisas relacionadas às treliças espaciais em aço e alumínio, abordando a realidade da construção metálica brasileira (SAMAPIO, 2004).

2.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS TRELIÇAS ESPACIAIS

O crescente interesse pela utilização das treliças espaciais é explicado pela necessidade de se construir espaços cobertos sem a interferência de pilares internos como é o caso de sua aplicação em grandes coberturas de espaços públicos para a realização de eventos culturais e esportivos, como exemplo cobertura de estádios, coberturas de piscinas, ginásios de esportes, teatros, pavilhões de feiras de exposições e muitas outras construções com superfícies cobertas que tem pouco ou nenhum ponto de apoio em sua zona central, constituindo-se em um grande vão, como terminais aeroportuários (hangares), terminais rodoviários, terminais de metrô, shopping centers, hipermercados, centro de distribuição, indústrias, revenda de automóveis, etc. (PORTO, 1999; SAMPAIO, 2004).

2.4.1 Exemplos do uso de treliças espaciais

Souza, Arnaldo (2002) descreve e apresenta algumas obras que exemplificam a utilização de treliças espaciais no Brasil e no mundo:

- a) Centro de Exposições Anhembi em São Paulo - construído no final da década de 60, sua cobertura tem a maior estrutura em alumínio tubular do mundo, com vãos de 53,33m e 60m, cobre uma área de 260m x 260m e representa um marco nas estruturas espaciais construídas no Brasil. A figura 2.5 mostra uma vista de cima e uma vista interna do Centro de Exposições Anhembi.



Figura 2.5 - Centro de Exposições Anhembi.

Fonte: Souza, Arnaldo (2002).

- b) Complexo industrial de Jacarepaguá da Cervejaria Brahma no Rio de Janeiro - construído em 1995, é composto por vários prédios, sendo que dois deles são interligados. Esta cobertura em treliça espacial vence vãos máximos que variam entre 30m e 60m, cobrindo uma área de 114.351 m², sendo esta a maior área contínua coberta

em treliça espacial de aço do mundo. A figura 2.6 mostra algumas vistas deste complexo industrial.

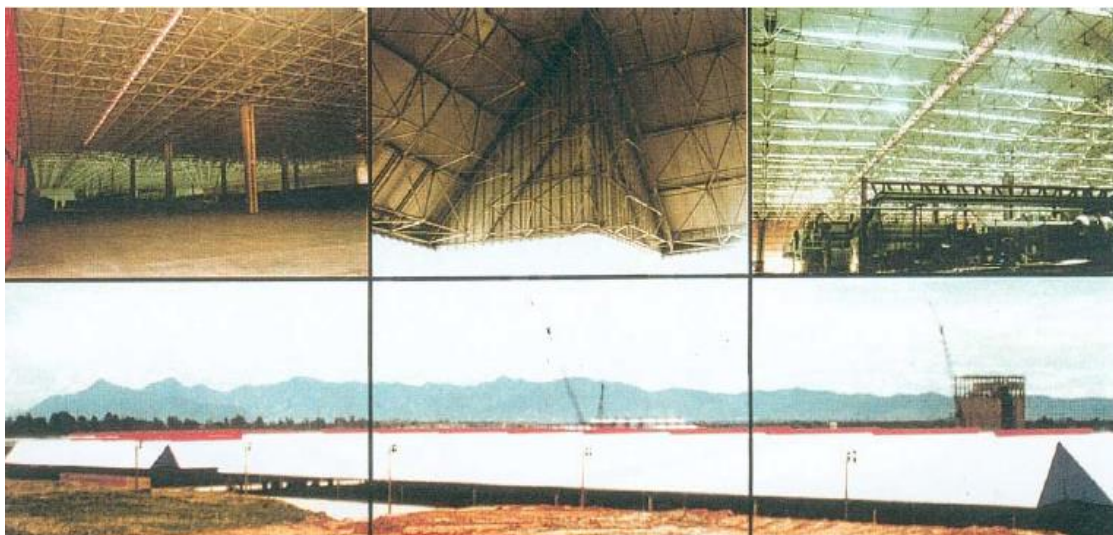


Figura 2.6 - Vistas internas e externas do complexo industrial de Jacarepaguá da Cervejaria Brahma.
Fonte: Souza, Arnaldo (2002).

c) Hangar de Manutenção em Mumbai/Índia - construído em 1994, composto por três partes principais: viga de borda frontal que é uma treliça espacial formada por cinco camadas de banzos, com 8,444m de largura e vence um vão livre de 129,384m; viga interna com vão livre de 129,384m e largura de 12,667m; e treliça principal com três camadas de banzo e altura de 4,871m. O hangar é equipado com duas pontes rolantes de 10 ton e três pontes de 3 ton fixadas na treliça espacial de cobertura (Figuras 2.7).

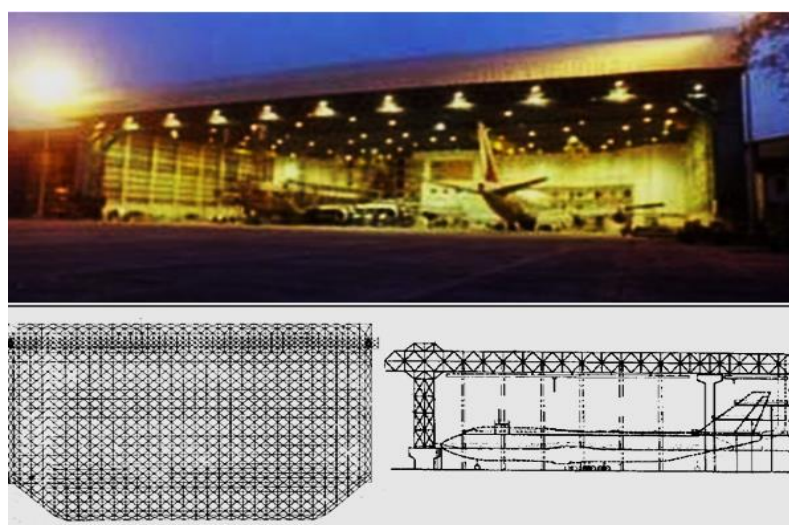


Figura 2.7 - Hangar de Manutenção em Mumbai/Índia.
Fonte: Souza, Arnaldo (2002).

- d) Cobertura do antigo estádio Mané Garrincha em Brasília - construída em 1983 em perfil tubular de alumínio, com cerca de 170m de extensão, a treliça espacial (figura 2.8) era apoiada em 21 pórticos de concreto, com três aparelhos de apoio de aço em cada um. Esta cobertura destacava-se pelo balanço de aproximadamente 31,5m, o maior já executado no país com este tipo de estrutura até aquela data.



Figura 2.8 - Cobertura do antigo estádio Mané Garrincha.
Fonte: Souza, Arnaldo (2002).

Atualmente grande parte das coberturas dos estádios construídos no Brasil usa treliças espaciais, a exemplo do Itaquerão em São Paulo (figura 2.9).



Figura 2.9 - Uso de treliça espacial em estádios modernos (Itaquerão–SP)
Fonte: <http://copadomundo.uol.com.br/album/2014>

Nesses diversos tipos de obras, a exemplo das novas arenas esportivas, observam-se a opção pelo uso do aço, influenciado pelos fatores como velocidade construtiva, segurança estrutural, sustentabilidade, flexibilidade e, sobretudo, boa arquitetura. Além disso, o aço é um material muito utilizado para reformas e ampliação de espaços já existentes, devido a sua capacidade de adaptação, assim também são as treliças espaciais que apresentam boa flexibilidade para uso na cobertura desses espaços, um bom exemplo disso é a Estação das

Docas em Belém/PA (figura 2.10) reformada e ampliada tendo partes cobertas por treliças espaciais (REVISTA ARQUITETURA E AÇO, 2010).



Figura 2.10 - Treliça espacial da Estação das Docas em Belém/PA.
Fonte: <http://mondobelem.wordpress.com.br>

2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TRELIÇAS ESPACIAIS

2.5.1 Vantagens

Makowski (1981, *apud* SOUZA, Alex, e GONÇALVES, 2007) salienta que a principal vantagem das treliças espaciais é a grande capacidade de responder a uma ação localizada distribuindo amplamente os esforços desta ação entre as barras dos banzos (superior e inferior) e as diagonais e/ou montantes, porém, as treliças espaciais são destacadas por apresentarem outras vantagens adicionais como: boa relação entre peso próprio e comprimento do vão; proporciona beleza arquitetônica, flexibilidade quanto à disposição dos pilares, proporciona grandes vãos livres; facilidade no transporte e armazenamento, fabricação e montagem com elementos com peso próprio reduzido; redução de custos (para grandes vãos) devido à repetição de elementos e nós com mesmo tipo e mesmas dimensões; possibilita ampliação de espaços e fácil desmontagem para estruturas não permanentes.

Outras vantagens das treliças espaciais são a precisão e a rapidez na montagem, porque são formadas de pequenas peças pré-fabricadas confeccionadas com precisão na fábrica, e as pequenas dimensões das barras simplificam muito o manejo e a montagem das mesmas; a elevada rigidez garante a vantagem de evitar grandes deslocamentos; e acomodam facilmente as instalações de sistemas elétricos, hidráulicos, aquecimento, ventilação e refrigeração que podem ser instalados no espaço entre as malhas dos banzos superior e inferior (MAKOWSKI, 1981, *apud* MAGALHÃES e MALITE, 1998).

Para Sampaio (2004), o fato de terem boa aparência estética permite que as treliças espaciais proporcionem beleza e funcionalidade, ao mesmo tempo, aos ambientes, pois além de estrutura para a cobertura, elas podem servir como suportes para fixação de forros e condutores de instalações, e também, ficando à mostra, podem servir como parte da ornamentação.

2.5.2 Desvantagens

Quanto as desvantagem das estruturas espaciais, Silva, M. (2010) cita a elaboração do projeto estrutural e a construção desse sistema de estrutura como muito complexos, principalmente a dificuldade de elaboração do projeto e fabricação dos nós, devido à complexidade da geometria das treliças; e cita também a baixa tolerância aos defeitos na fabricação dos componentes como, por exemplo, a variação nas dimensões das barras.

Maiola (1999) enfatiza que o uso de sistemas de ligação muito complexos aumenta os custos das coberturas em relação a outros sistemas como as coberturas que usam estruturas planas; e que alguns tipos de sistemas de estruturas espaciais apresentam uma boa relação de custos e bom comportamento estrutural, no entanto, estes sistemas mais simples e mais baratos, podem apresentar excentricidade nos nós que, se não for considerados nos cálculos de projeto, podem comprometer a estabilidade da estrutura.

2.6 ELEMENTOS PARA PROJETO DE TRELIÇA ESPACIAL

Silva, K. (1999) considera que a elaboração de um projeto de sistema estrutural espacial segue duas fases importantes: a primeira envolve a idealização e a concepção da estrutura, isto é, a escolha e o cálculo do sistema estrutural e o procedimento construtivo a ser seguido, e a elaboração dos projetos para fabricação. A segunda fase é a parte da execução da estrutura com o ajuste do projeto aos meios escolhidos, como o estudo do sistema de fabricação e montagem, o transporte e colocação no local da obra.

Segundo Iffland (1982 *apud* SOUZA, Alex, 2003), para a otimização de projetos de estruturas espaciais alguns parâmetros devem ser considerados ainda na fase de anteprojeto, sendo que os fatores que mais influenciam no sucesso do projeto são: o arranjo das barras em planta e em elevação, a seção transversal das barras, a relação vão/altura e vão/módulo, os tipos de apoio e o sistema de ligação.

Silva, K, (1999) destaca que para a viabilidade de um projeto de estrutura espacial devem-se fazer algumas considerações como: análise criteriosa do projeto arquitetônico; determinação da geometria da malha, considerando o vão a ser vencido; elaboração do orçamento completo e detalhado contando com os custos de mão-de-obra, custos de materiais, custos de fabricação, custos de pré-montagem, custos de transporte e custos de montagem; e principalmente, deve-se considerar a padronização dos nós e das barras da estrutura.

É muito comum os projetistas lançarem mão de análise linear no cálculo estrutural, considerando o modelo de treliça ideal, com nós rotulados, barras e materiais sem imperfeições. No entanto, para as treliças espaciais é recomendado que se faça uma análise não linear, considerando excentricidades, variações de seção nas extremidades das barras, variações de temperatura não previstas no projeto, ações provenientes da montagem, e o tipo do nó que pode ter forte influência no comportamento estrutural das barras e da estrutura como um todo (SOUZA, Alex, e GONÇALVES, 2007).

2.6.1 Ações a ser consideradas no projeto

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) recomenda, por meio da *Norma Brasileira de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - NBR 8800 (2008)*, que para análise estrutural, o projetista deve considerar todas as ações cuja influência possa provocar efeitos significativos para a estrutura, levando-se em conta os estados-limites últimos e de serviços.

Souza, Alex, e Gonçalves (2007) destacam que para a análise de treliças espaciais as principais ações a considerar são:

- a) *Ações permanentes* - as cargas provenientes do peso próprio das barras e nós (0,10 a 0,30 kN/m²); do peso próprio das estruturas de suporte das telhas e fechamentos laterais, terças, longarinas, correntes, suportes (0,03 a 0,09 kN/m² em função do tamanho dos módulos); do peso próprio dos elementos de vedação, telhas, forros e demais itens de fechamento; e do peso próprio de outros elementos, tais como: passarelas, escadas de manutenção, tubulações de água, esgoto, águas pluviais, gás, dutos e cabos elétricos.
- b) *Ações variáveis* – ações devido ao uso e ocupação da edificação, variação de temperatura, sobrecargas devidas ao acúmulo de águas pluviais, sobrecargas em escadas e passarelas de manutenção, sobrecargas de instalações não permanentes, sobrecargas de equipamentos industriais e pontes rolantes, e sobrecargas devidas à ação do vento que devem ser determinadas de acordo com NBR 6123 (1988).

- c) *Sobrecarga* – a NBR 8800 (2008) recomenda sobrecarga nominal mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$ nas coberturas comuns, não sujeitas a acúmulos de quaisquer materiais. Para os equipamentos como as talhas e pontes rolantes, recomenda-se usar seus respectivos coeficientes de impacto.

2.6.2 Material e seção transversal das barras

Os materiais mais utilizados em estruturas espaciais são o aço e o alumínio, porém, devido ao alto custo, o uso do alumínio vem caindo acentuadamente (SOUZA, Alex, 1998). As treliças espaciais podem ser construídas a partir de barras com seção transversal de diversas formas de perfis como, por exemplo, perfis de seção tubular circular e retangular, perfil “I” soldados e laminados, cantoneiras, entre outros. Numa estrutura pode-se usar mais de um tipo de perfil e adotar perfil reforçado, com maior espessura, para barras mais solicitadas, geralmente as próximas de apoios. Para a escolha do perfil leva-se em consideração a magnitude das cargas, a concepção arquitetônica, a finalidade da estrutura, alguma função adicional, por exemplo, suporte para fixação de telhas, fixação de condutores, etc. Deve-se considerar, principalmente, o tipo de ligação que se queira ou que se pode utilizar (SOUZA, Arnaldo, 2002). A figura 2.11 ilustra alguns tipos de perfis usados em treliças espaciais.

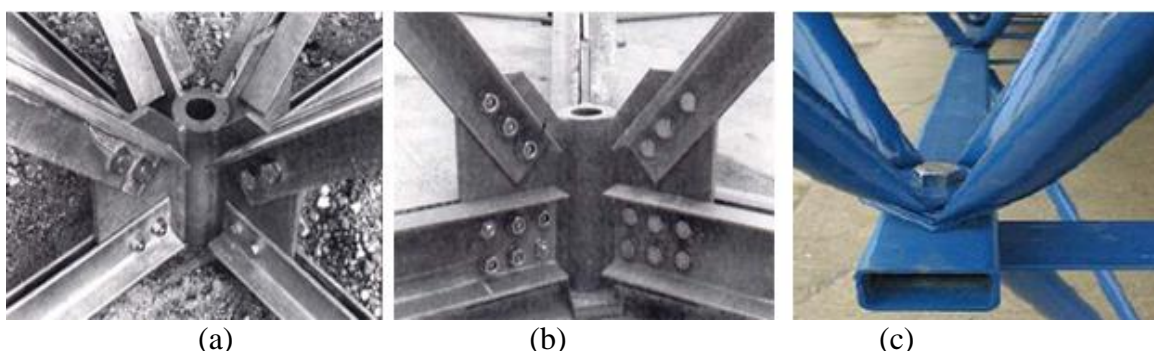


Figura 2.11 - Perfis usados em treliças espaciais: a - cantoneira dupla; b - perfil U; c - perfil tubular (circular e retangular) e barra chata.

Fonte: Souza, Alex, (2003).

Os perfis tubulares circulares são os preferidos devido às suas vantagens como raio de giração constante (simetria em qualquer plano), não apresentam variação de inércia, apresentando menor índice de esbelte e maior resistência à flambagem, relativa facilidade no detalhamento de ligação, além do mais pode gerar ganhos econômicos no custo final da estrutura em relação a outros tipos de perfis (SILVA, K, 1999).

No Brasil predomina o uso de barras de seção tubular circular com extremidades estampadas (variação de inércia) ou com chapas de extremidades (ponteiras). As formas de estampagem mais utilizadas nas extremidades das barras são apresentadas por Souza, Alex, (1998) na Figura 2.12.

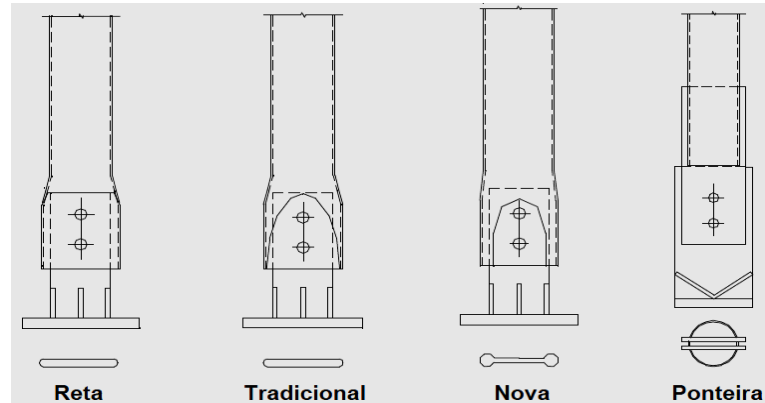


Figura 2.12 - Tipos de estampagem nas extremidades das barras de seção tubular circular.
Fonte: Souza, Alex, (1998).

Maiola (1999) alerta que essas variações geométricas (estampagem da extremidade das barras ou o uso de ponteiras) conduzem a uma significativa redução da inércia à flexão nesta região, implicando numa redução da sua resistência à compressão. Geralmente, nos projetos de treliças espaciais, este efeito não é considerado na determinação da força normal resistente das barras, o que pode conduzir a uma situação muito desfavorável à segurança.

2.6.3 Relações dimensionais: altura e tamanho do módulo da treliça

No projeto de treliças espaciais deve-se considerar a distância entre os apoios (vão), e a distância entre a malha superior e inferior (altura) da estrutura, bem como o ângulo formado entre a diagonal e o plano dos banzos, pois estas relações dimensionais influenciam no comportamento estrutural da treliça. Muitas vezes, a altura é definida já no projeto arquitetônico, porém deve-se verificar se esta altura, pré-definida, não vai comprometer as dimensões da malha (muito grande ou muito pequena), e deve-se observar também a inclinação das diagonais (SOUZA, Alex, e GONÇALVES, 2007).

Souza, Alex, (2003) afirma que a relação altura/vão é influenciada diretamente por fatores como a magnitude do carregamento, o tipo de arranjo dos elementos, localização e tipos dos apoios, e pela rigidez do sistema de ligação adotado. Devido a estes fatos, os estudiosos não têm um consenso sobre uma relação altura/vão exata, sendo que os valores da

altura variam entre $\ell/10$ a $\ell/60$, onde ℓ é a distância entre os apoios da treliça. No quadro 2.1 estão algumas relações altura/vão e os autores que as defendem.

Altura da Treliça	Autor (ano)
$\frac{\ell}{30}$ a $\frac{\ell}{40}$	DADDI (1969) MORONI (1976)
$\frac{\ell}{20}$ a $\frac{\ell}{40}$	MAKOWSKI (1981)
$\frac{\ell}{20}$ a $\frac{\ell}{25}$	ZIGNOLI (1981)
$\frac{\ell}{15}$ a $\frac{\ell}{20}$	WALKER (1986) AGERSKOV (1986)
$\frac{\ell}{20}$ a $\frac{\ell}{60}$	IFFLAND (1982)
$\frac{\ell}{10}$ a $\frac{\ell}{20}$	MARSH (2000)

Quadro 2.1 - Relação altura/vão e seus autores.
Fonte: Souza, Alex, (2003).

Os sistemas utilizados na construção de treliças espaciais no Brasil têm adotado, comumente, uma altura na faixa entre $\ell/15$ e $\ell/20$, sendo ℓ o maior vão da treliça (*Ibidem*).

Os módulos básicos (tetraedro, cubo, octaedro) repetidos que formam a estrutura devem ser organizados de maneira que a inclinação das diagonais não deve ser inferior a 30° , pois podem receber grandes esforços e se tornarem muito longos; nem deve ser superior a 60° , pois pode necessitar de uma grande quantidade de diagonais aumentando o número de ligações, dificultando a execução da estrutura (WALKER, 1981 *apud* SAMPAIO, 2004).

Segundo Makowski (1981 *apud* SOUZA, Alex, 2003), o comprimento do módulo pode superar os 3m para vãos maiores que 50m e pode variar entre 1m e 1,5m para vão com comprimento entre 30m e 40m, sendo recomendado um módulo com comprimento variando entre uma e duas vezes a altura da treliça. Para a definição das dimensões dos módulos deve-se levar em consideração fatores como: o tamanho dos vãos, os carregamentos, o sistema de ligação, a aparência arquitetônica, o tipo dos elementos de fechamento e a facilidade de transporte.

2.6.4 Tipos de treliças espaciais quanto ao arranjo geométrico

As treliças espaciais são classificadas por Makowski (1981 *apud* MAGALHÃES e MALITE, 1998) quanto à sua geometria, levando em consideração o arranjo das barras em elevação (vista em um plano vertical), e em planta (vista em planta).

2.6.4.1 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em elevação

Quanto ao arranjo das barras em elevação, as treliças espaciais são classificadas de acordo com o número de camadas (malhas, banzos ou cordas), geralmente as treliças de uma só camada são empregadas em estruturas de cobertura que apresentam curvatura como em cúpulas e em abóbadas, e em cobertura de pequenos vãos. As treliças espaciais de duas camadas são as mais utilizadas e as de três camadas ou mais são utilizadas para vãos muito grandes (FREITAS, 2008). A figura 2.13 apresenta vistas em perspectiva e em elevação de treliças com duas e com três camadas de banzo.

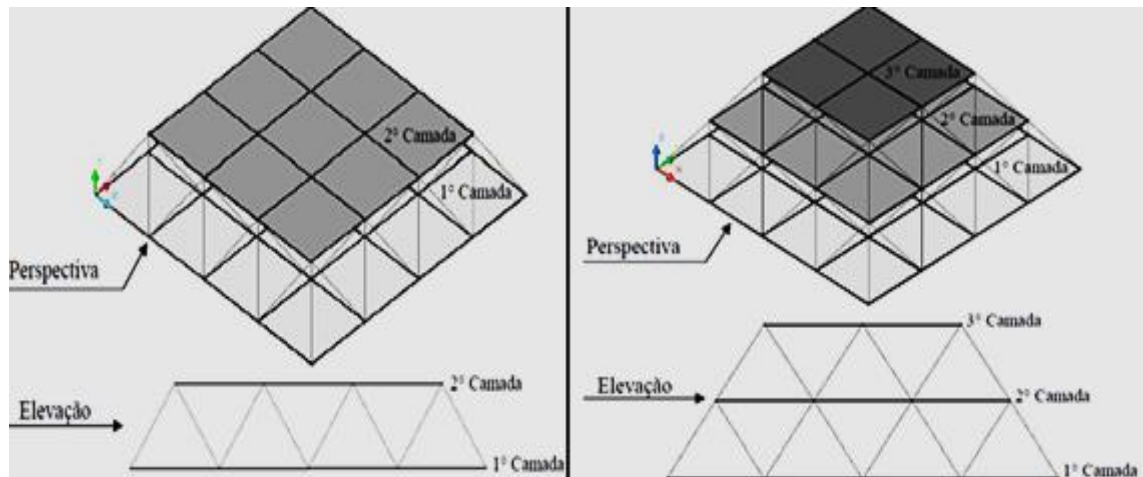


Figura 2.13 - vistas de treliças com duas e com três camadas de banzo.

Fonte: Freitas (2008).

Conforme Wang e Li (1999 *apud* SOUZA, Alex, 2003), treliças espaciais com três camadas apresentam barras com menores esforços e com comprimentos reduzidos, implicando em um menor consumo de aço, também apresentam melhor estabilidade estrutural que as de duas camadas. No entanto, as treliças com três camadas de banzos têm o inconveniente de aumentar o número e a complexidade das ligações.

2.6.4.2 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em planta

Em planta, a classificação das treliças espaciais é de acordo com o arranjo entre as barras e com o número de direções que elas tomam. Podendo ser classificadas quanto à geometria da figura formada pela interseção das barras dos banzos (MAKOWSKI, 1981 *apud*

MAGALHÃES e MALITE, 1998). A Figura 2.14 mostra exemplos de geometrias de malhas mais utilizadas e suas classificações.

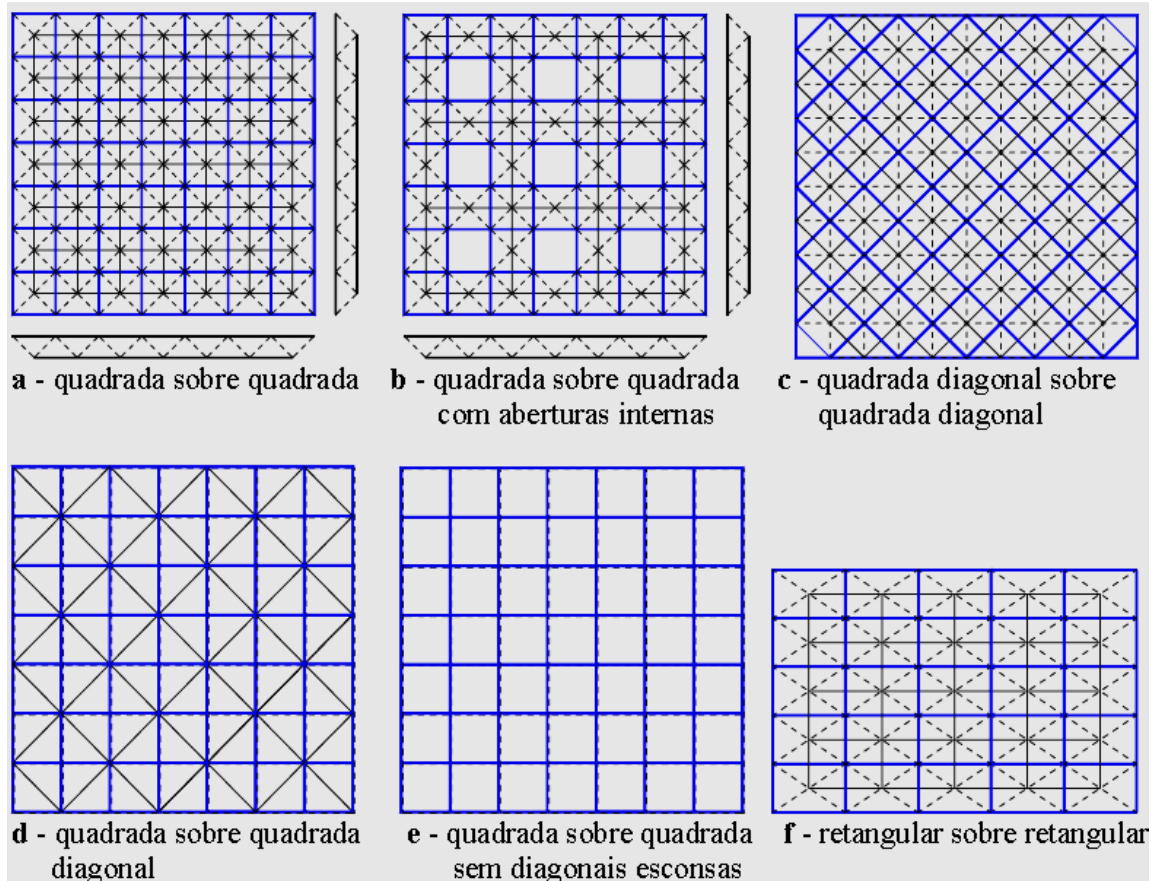


Figura 2.14 - Algumas geometrias mais comuns de treliças espaciais e suas classificações.

Fonte: Magalhães e Malite (1998).

A escolha do arranjo das malhas depende de cada projeto, considerando determinadas características, como a forma e o tamanho do contorno da treliça, a disposição dos pontos de apoio, o tipo de material utilizado, as componentes do carregamento e considerando também a maneira como a estrutura será montada. A geometria mais utilizada no Brasil é a malha quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo (figura 2.14a), na Europa, além desta, a malha quadrado diagonal sobre quadrado diagonal com defasagem de meio módulo (figura 2.14c) e a malha quadrado sobre quadrado diagonal (figura 2.14d) têm sido as preferidas dentre as várias geometrias possíveis (SAMPAIO, 2004).

De acordo com Souza, Alex, (2003), o arranjo mais vantajoso, do ponto de vista econômico, é o que exigir a menor quantidade de barras e principalmente o menor número de ligações (nós), independentemente do consumo de material em relação ao peso total da estrutura.

2.6.4.3 Classificação das treliças espaciais quanto ao volume gerado pela união das barras

Quanto ao volume gerado pela união das barras, Magalhães e Malite (1998) afirmam que dois grupos são formados:

- reticulados constituídos por vigas treliçadas de banzos paralelos que se cruzam formando volumes prismáticos (grelhas espaciais).
- reticulado espacial propriamente dito, onde os volumes formados pela união das barras resultam em módulos básicos, isto é, unidades geométricas que se repetem ao longo da estrutura. As principais formas geométricas formadas são pirâmides e/ou troncos de pirâmides. A figura 2.15 representa alguns elementos geométricos formados por malhas espaciais.

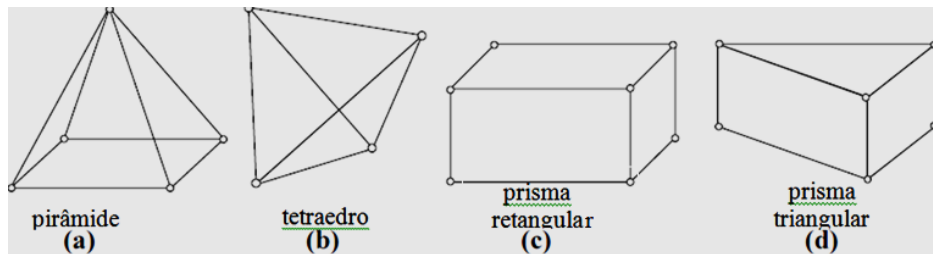


Figura 2.15 - Alguns elementos geométricos formados por malhas espaciais.

Fonte: Silva, K. (1999).

2.6.5 Tipos de apoio

As treliças espaciais podem ser sustentadas por pilares de concreto armado ou pilares em aço, apoiadas diretamente em um nó, seja este do banzo superior ou inferior. Para não sobrecarregar um único nó utilizam-se mecanismos para que a carga de reação dos apoios seja distribuída a outros nós, como por exemplo, vigas de transição entre dois nós, pirâmides invertidas “pé de galinha” (figura 2.16), dentre outros (SOUZA, Alex, 2003).

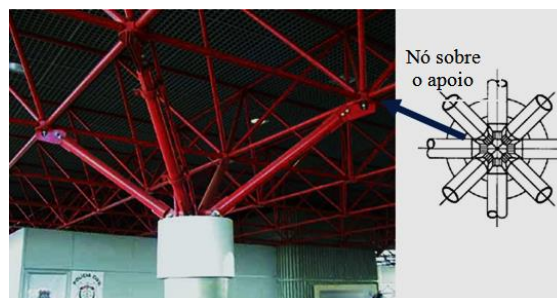


Figura 2.16 - Apoio tipo pirâmide invertida “pé de galinha”.

Fonte: Souza, Alex, (2003).

Conforme Sampaio (2004), o comportamento das treliças espaciais é influenciado pela quantidade e disposição dos apoios e também pela forma da ligação entre o apoio e a treliça, que restringe ou não os movimentos de translação e de rotação, isto é o grau de liberdade permitido pela ligação entre os elementos da treliça e o apoio. Convencionalmente os apoios são dispostos de maneira a permitir grandes áreas livres de interferências de pilares, por isso são colocados no perímetro e/ou nos vértices das estruturas. A figura 2.17 mostra algumas formas de apoios mais utilizados, onde: a) apoio direto no banzo inferior; b) apoio tipo “pé de galinha”; c) apoio com viga de transição; d) apoio “pé de galinha” com travejamento interno; e) apoio direto no banzo superior.

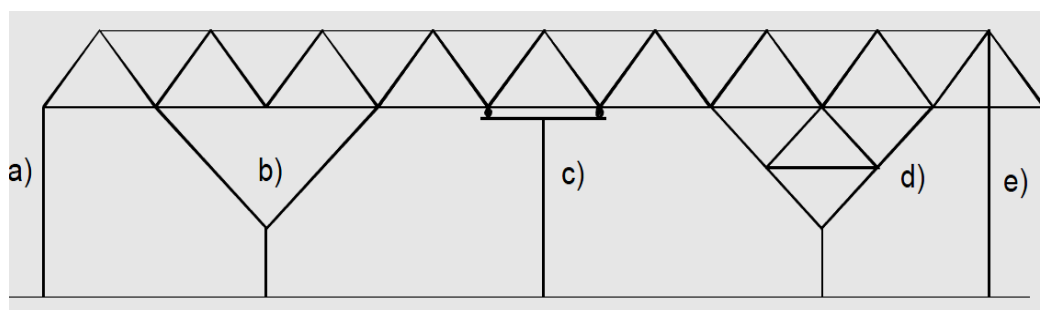


Figura 2.17 - Formas de apoios mais utilizados.
Fonte: Sampaio (2014).

A localização dos apoios é um dos fatores que tem maior influência no comportamento das treliças espaciais. A propagação da ruína é mais significativa nas situações em que os apoios se localizam apenas nos vértices da estrutura (MURTHA-SMITH, 1988; MURTHA-SMITH e LEARY, 1993 *apud* MAIOLA, 1999).

2.6.6 Sistemas de ligação em treliças espaciais

As ligações metálicas são definidas na NBR 8800 (2008), como elementos de conexão, como exemplos, os enrijecedores, as chapas de ligação, as cantoneiras, e os meios de ligação (soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos).

Na definição de um sistema de ligação estão envolvidas diversas características, como o tipo de nó, o tipo de perfil das barras, e a quantidade e a disposição das barras que incidem no nó. O nó, local da ligação entre as barras dos banzos e diagonais e/ou montantes, é parte fundamental de todo o sistema de estrutura espacial pré-fabricado, destacando-se como um dos fatores de maior influência na confiabilidade, no comportamento estrutural e no custo final da estrutura (SOUZA, Arnaldo, 2002).

Porto (2002) considera que o nó é responsável por assegurar coesão e estabilidade ao sistema. Os nós mais comuns conectam até oito barras (quatro banzos e quatro diagonais), mas, existe nó que pode fazer a ligação até entre dezoito barras, no entanto, um nó com muitas barras pode resultar em uma estrutura muito grande e pesada dificultando a montagem e aumentando o custo final da obra. Portanto, a ligação ideal é a que oferece resistência suficiente para a estabilidade estrutural e que permita a transmissão dos esforços às barras da treliça.

2.6.6.1 Principais sistemas de ligação de estruturas espaciais utilizados no mundo

Segundo Maiola e Malite (2002), os primeiros sistemas de ligação de estruturas espaciais desenvolvidos e patenteados e que apresentam boa resistência aos esforços solicitados por grandes vãos, resultando em sucesso comercial, surgiram no mercado da construção civil a partir da década 40. Cada sistema tem suas características próprias tendo o nó como o grande diferencial entre eles, dentre os quais são destacados: o sistema Mero (1942), sistema Space Deck (1954), sistema Triodetic (1955), o sistema Unistrut (1955) e mais recente surgiram os sistemas britânicos Nodus nos anos 70 e o Catrus (1996).

2.6.6.1.1 Sistema Mero

O sistema Mero é o primeiro sistema de estrutura espacial do mundo, criado pelo Dr.º Max Mengerhausen, na Alemanha em 1942. Porto (1999) afirma que o nó, elemento fundamental deste sistema, continua inalterado até hoje, trata-se de uma esfera em aço com 18 furos rosqueados que pode receber o mesmo número de barras sem nenhuma excentricidade. As barras podem ser em perfil circular ou quadrado com seção vazada, sendo fixadas nas esferas através de parafusos (figura 2.18).

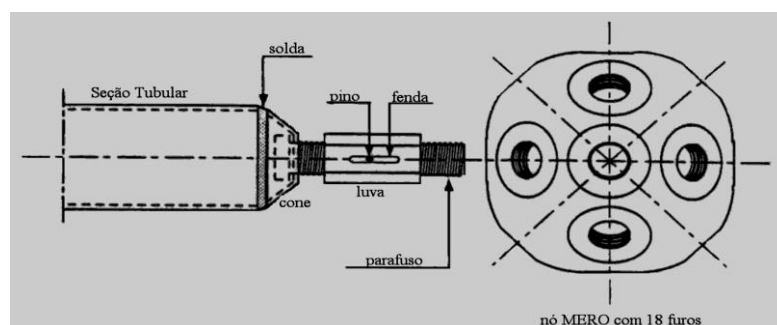


Figura 2.18 - Elementos do sistema Mero.

Fonte: Maiola (1999).

O Mero é um sistema muito leve e praticamente todo pré-fabricado por meio de máquinas especiais capazes de produzir peças com grande precisão. Atualmente já existe o sistema Mero (o nó e as barras) em materiais poliméricos (plásticos). A eficiência do Mero o torna um dos sistemas espaciais mais difundidos mundialmente, sendo utilizado em mais de 50 países (PORTO, 1999).

2.6.6.1.4 Sistema Unistrut

O Unistrut é um sistema idealizado por volta do ano de 1955 nos Estados Unidos. Na definição de Sampaio (2004) o Unistrut constitui-se de um nó formado por uma chapa conformada a frio de maneira que as barras de aço, em seção U e comprimento constante, possam ter suas extremidades parafusadas a esta placa provida de furos. Elementos do Unistrut estão representados na figura 2.19.

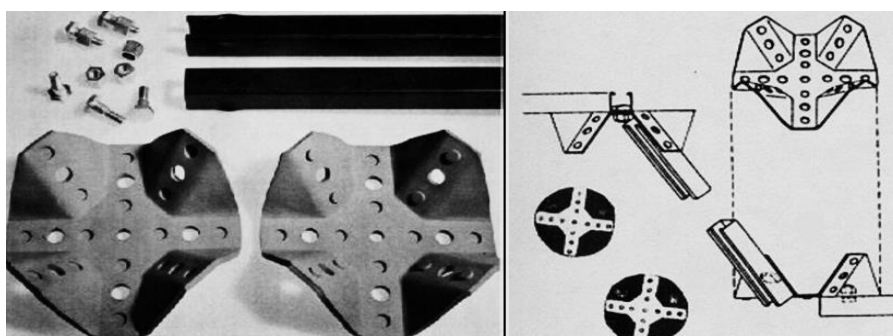


Figura 2.19 - Elementos do sistema Unistrut.
Fonte: Sampaio (2004).

As placas do nó e as barras do sistema Unistrut são produzidas utilizando gabaritos especiais deixando as distorções pequenas e uniformes o que possibilita ligações sem muitas dificuldades. Este sistema tem algumas limitações como uma única configuração geométrica e dois tipos de estruturas em módulos de 1,21m e 2,52m destinados a vãos entre 12,19m e 18,28m. Como vantagem, o sistema Unistrut apresenta grande flexibilidade e facilidade para montagem e desmontagem da estrutura (PORTO, 1999).

2.6.6.1.2 Sistema Space Deck

O Space Deck surgiu na Inglaterra em 1954, este sistema consiste na repetição de um elemento piramidal de aço formando uma dupla grelha auto-sustentável. As barras que o compõem são posicionadas de maneira a formar módulos em forma de pirâmides de base

invertida (semi-octaedro), cujas bases quadradas, dispostas umas ao lado das outras, compõem o banzo superior da estrutura. As barras das diagonais, em perfis vazados de seção circular, são soldadas aos vértices do módulo no banzo superior e aos nós do banzo inferior, sendo este banzo formado por tubos maciços de aço de alta resistência com roscas nas extremidades (PORTO, 2002; SAMPAIO, 2004). Ilustrações do sistema Space Deck são mostradas na figura 2.20.

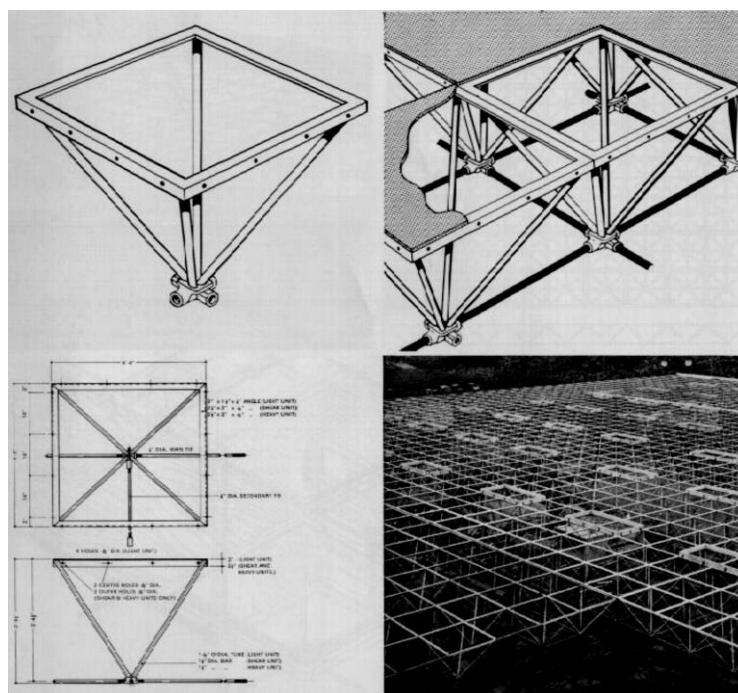


Figura 2.20 - Sistema Space Deck.
Fonte: Porto (1999).

Além de Inglaterra, também foi muito utilizado em outros países, como República dos Camarões, Estados Unidos, Singapura, Itália e Bélgica. O Space Deck é empregado, principalmente para vencer grandes vãos (PORTO, 1999).

2.6.6.1.3 Sistema Triodetic

O sistema canadense Triodetic surgiu em 1955, é descrito por Souza, Arnaldo, (2002) como um meio de ligação constituído por um nó cilíndrico com seis a nove fendas ranhuradas que interliga barras vazadas de aço ou alumínio em perfil circular, com as extremidades estampadas sob um ângulo apropriado para ser introduzidas por pressão nas fendas dentadas deste nó cilíndrico. A ligação entre barras ocorre sem a utilização de solda e

sem furação nas barras para parafuso. Ilustrações do sistema Triodetic estão representadas na figura 2.21.

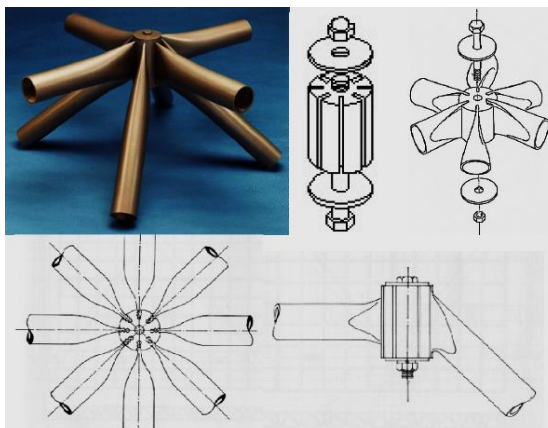


Figura 2.21 - Ilustrações do sistema Triodetic.
Fonte: Sampaio (2004).

2.6.6.1.5 Sistema Nodus

No início da década de 70 surgiu o sistema britânico Nodus (figura 2.22). Segundo Sampaio (2004) este sistema é composto por barras tubulares com rosca na extremidade que se conectam por meio de luvas e parafusos. O nó do Nodus pode fazer a ligação entre oito elementos, que podem ser tubulares de seções circulares ou retangulares.

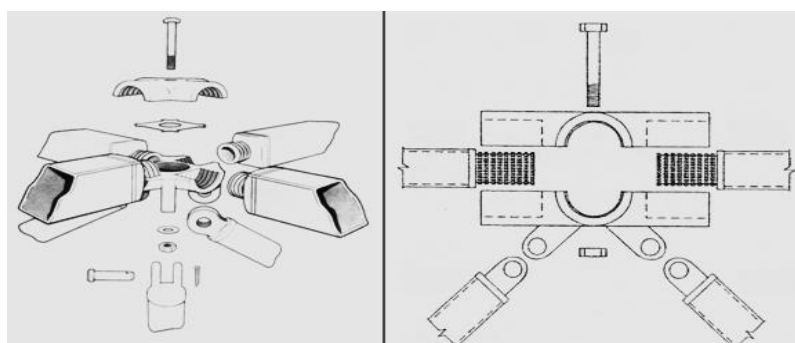


Figura 2.22 - Elementos do sistema Nodus.
Fonte: Sampaio (2004).

2.6.6.1.6 Sistema Catrus

O sistema Catrus foi apresentado por El-Sheikh e El-Bakry em 1996. Segundo Souza, Arnaldo, (2002), neste sistema as barras das diagonais e dos banzos são conectadas através de um único parafuso no nó. Os banzos são barras contínuas que se cruzam e se conectam às

diagonais nas interseções. As barras dos banzos superiores são perfis tubulares retangulares, as dos banzos inferiores são barras chatas e as diagonais são tubulares circulares com as extremidades estampadas, conforme a figura 2.23.

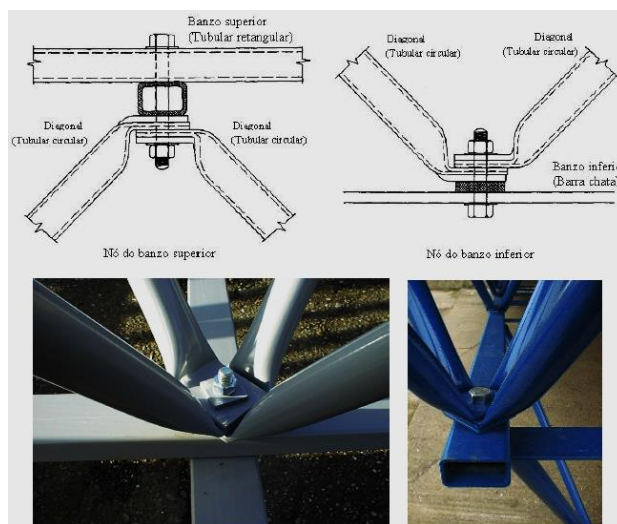


Figura 2.23 - Elementos do sistema Catrus.
Fonte: Sampaio (2004).

O Catrus é um sistema baseado em um nó simples, que não necessita de elementos especiais para ligações, sendo utilizados poucas furações e parafusos, representando facilidade na montagem, porém pode apresentar significativas excentricidades no nó, contribuindo para a rotação do conjunto e facilitando a formação de rótulas plásticas que compromete a estabilidade da estrutura (MAIOLA, 1999).

Além dos supracitados, já foram criados, patenteados e comercializados, a nível internacional, outros diversos sistemas de ligação para reticulados espaciais como, por exemplo, o *Tridirecional SDC*, o *Pyramitec*, o *Circotec*, o *Tridimatec*, o *Unibat*, o *Spherobot*, o *Pyramibat*, o *Dodecavis*, o *Octatruss*, o *Pyramroof*, o *Space grid*, o *Tubaccord*, o *Tetragrid*, o *Segmo* e etc. muitos destes sistemas desenvolvidos não tiveram grande aceitação comercial, principalmente devido à complexidade dos seus elementos (SAMPAIO, 2004).

2.6.6.2 Principais sistemas de ligação utilizados no Brasil (não patenteados)

No Brasil utilizam-se bastante nós criados a partir da própria experiência do fabricante ou nós feitos a partir da imitação de sistemas estrangeiros patenteados. A maioria das estruturas espaciais construídas no Brasil utiliza nós que se caracterizam pelas extremidades das barras amassadas (estampadas), nos quais as ligações são realizadas por um

único parafuso (nó Típico), ou utilizando ligação através de chapas planas de aço soldadas, chamadas nó de aço, estes sistemas empíricos, não são patenteados e apresentam baixo custo e facilidade na montagem em relação aos nós patenteados com eficiência estrutural comprovada utilizados em outros países, por isso é raro o uso destes nas construções brasileiras (SOUZA, Arnaldo, 2002).

2.6.6.2.1 Sistema com nó típico

O nó típico, desenvolvido e mais utilizado no Brasil, também conhecido por outros nomes populares como nó borboleta e também denominado de sistema Sarton, é composto, simplesmente, pela união de perfis metálicos tubulares circulares com suas extremidades amassadas (estampadas) e ligadas por um único parafuso de alta resistência (PORTO, 2002).

Souza, Arnaldo, (2002) descreve o nó típico como sistema composto pelo conjunto das extremidades estampadas das barras, sobrepostas e unidas por um único parafuso e duas aruelas quadradas que confinam o conjunto, ver figura 2.24. Ele é o sistema mais utilizado no país, devido ao seu baixo custo de fabricação e montagem.

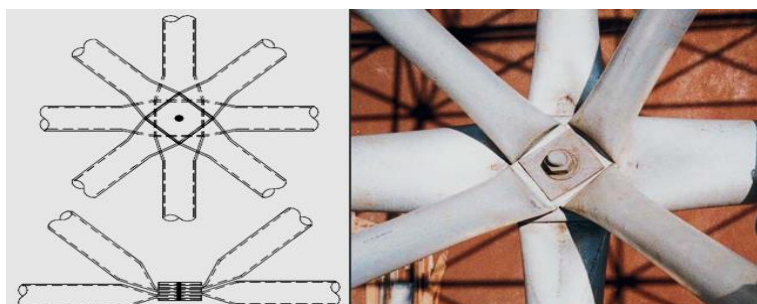


Figura 2.24 - Nó típico.
Fonte: Sampaio (2004).

O nó típico apresenta vantagens como custo reduzido na fabricação dos elementos e de não exigir mão-de-obra especializada, em contrapartida apresenta alguns problemas que, de acordo Souza, Alex (2003) estão relacionados ao fato das barras serem ligadas por um único parafuso e à variação de inércia, devido à estampagem em suas extremidades, permitem o surgimento de excentricidades nas ligações nas quais ocorrem efeitos de segunda ordem, tendo como consequência o surgimento de momentos fletores, principalmente nas diagonais. E também, segundo Porto (1999), o achatamento do tubo pode comprometer de 30% a 40% da resistência da peça, embora isto possa ser compensado com emprego de barras mais espessas, estes problemas ocasionam plastificação precoce, levando a estrutura ao colapso.

Em uma análise teórica e experimental realizada por Maiola (1999), usando um protótipo com nó típico, verificou-se que a ruína ocorre na ligação com rotação do nó ou flexão nas extremidades das barras, conforme a figura 2.25.



Figura 2. 25 - Colapso em nó típico.
Fonte: Maiola (1999).

Os resultados obtidos por Maiola (1999) mostram que as hipóteses de cálculo adotadas para análise deste tipo de estrutura considerada como uma treliça ideal, com barras sem variação de inércia e nós perfeitamente articulados sem excentricidades, não são satisfatórias, ou seja, as condições adotadas nos cálculos são diferentes das condições reais, isso pode acarretar em resultados não condizentes com a realidade da estrutura. Portanto, do ponto de vista estrutural, deve-se ter muito cuidado ao adotar este sistema. As análises de protótipos de estruturas espaciais planas utilizando nó típico mostram que os resultados de carga última da estrutura são inferiores aos valores obtidos teoricamente.

2.6.6.2.2 Sistema de nó típico com chapa complementar

O nó típico com chapa complementar (Figura 2.26) se diferencia do nó típico por utilizar chapas horizontais que ligam as barras do banzo por meio de parafusos que aumentam a resistência da ligação, essas chapas são usadas em banzos onde os esforços são elevados e o uso de um só parafuso é insuficiente para a estabilidade da estrutura (SOUZA, Alex, 1998).



Figura 2. 26 - Nó típico com chapa complementar.
Fonte: Souza, Alex (1998).

Este sistema de ligação apresenta, além das limitações do nó típico, uma pequena rigidez a flexão das chapas que fazem a ligação dos banzos. Isso permite que, uma pequena excentricidade nos banzos comprimidos comprometa o desempenho da ligação, que pode entrar em colapso com forças normais inferiores à capacidade da barra (SAMPAIO, 2004).

2.6.6.2.3 Sistema com nó de aço

O nó de aço é um sistema de conexão formado por uma peça com aletas de aço soldadas, nas quais as extremidades amassadas das barras de seção tubular circular são encaixadas e parafusadas, (ver figura 2.27). Este sistema também é de simples concepção, entretanto, exige trabalho mais especializado para a sua execução, pois a confecção de chapas de aço soldadas acarreta em aumento de seu custo final, em comparação ao custo do nó típico (MAIOLA, 1999).



Figura 2.27 - Nó de aço.
Fonte: Maiola (1999).

Segundo Souza, Alex (2003), entre os sistemas de ligações não patenteados no Brasil, o nó de aço é o que apresenta melhor desempenho, verificando-se um melhor comportamento estrutural, pois teoricamente, não existem problemas com excentricidade uma vez que as barras concorrem para um único ponto. Resta somente o problema da variação de inércia nas extremidades das barras. Souza, Arnaldo (2002) menciona que existem variedades de modelos de nós de aço, optar por um deles depende de fatores como a geometria da estrutura, dos níveis de esforços e padrões do fabricante.

Ensaio realizados por Maiola (1999) mostraram que a ruína em treliças espaciais com nó de aço ocorre por instabilidade como a flambagem das barras comprimidas ou escoamento dos elementos, ou seja, há um bom desempenho deste tipo de ligação, evidenciando assim sua eficiência estrutural.

2.6.6.2.4 Sistema de nó com chapa de ponteira

O nó com chapa de ponteira é parecido com o nó de aço, porém têm duas chapas paralelas (ponteiras) soldadas em um rasgo na extremidade das barras, essas ponteiras são conectadas às chapas do nó por meio de parafusos, as ilustrações da figura 2.28 mostram os elementos do nó com chapa de ponteira.

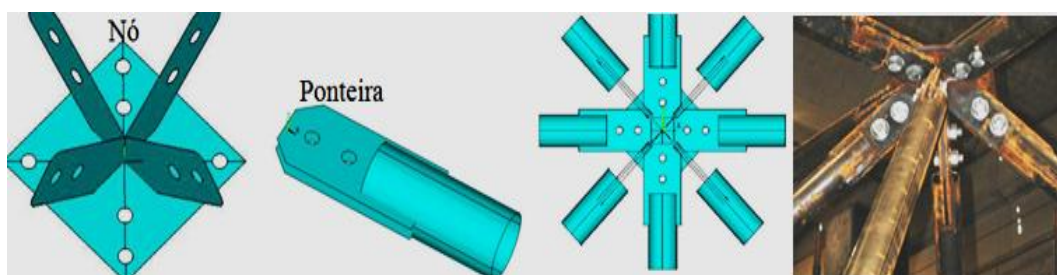


Figura 2.28 - Elementos do nó com chapa de ponteira.
Fonte: Sampaio (2004).

Segundo Souza, Alex, (1998), este tipo de nó pode apresentar problemas construtivos, porém, teoricamente não introduz excentricidades nas ligações. No entanto, podem apresentar reduções na capacidade de força normal resistente caso as chapas de extremidades (ponteiras) apresentam baixa rigidez perpendicular a seu plano.

Caramelli (1993 *apud* MAIOLA, 1999) alerta para os cuidados quanto à utilização de sistemas de treliça espacial sem se conhecer o seu real comportamento estrutural, pois somente o bom senso e a confiança por parte do projetista não são parâmetros suficientes para garantir estabilidade estrutural. Nesse aspecto, é recomendada uma simulação numérica sofisticada, análise em programa computacional de modelos e até mesmo ensaios práticos e experimentais em protótipos para se constatar a confiabilidade estrutural do sistema.

Os quatro sistemas de nós brasileiros, acima apresentados, têm larga aplicação pelo fato principal, do baixo custo em relação aos sistemas de ligação patenteados. Entretanto, assim como muitos outros sistemas utilizados no Brasil, ainda não existem estudos com explicações detalhadas e conclusivas que determinam quantitativamente o comportamento estrutural dessas ligações ou que validem as hipóteses de cálculo de treliças ideais, normalmente adotadas pelos projetistas (SOUZA, Alex, 1998).

2.6.6.3 Sistemas brasileiros patenteados

Nos últimos anos algumas empresas brasileiras têm buscado desenvolver sistemas de ligação para estruturas espaciais, inclusive já existem algumas marcas patenteadas como é o caso do sistema Bemo-Varitec (figura 2.29a), constituído de um nó em aço fundido e barras de seção circular com chapas de ponteiros soldadas nas extremidades. Outro sistema brasileiro é o Axis (figura 2.29b), aplicação para estruturas espaciais de alumínio, produzido e comercializado pela empresa Perfil do Rio Grande do Sul. Também existe o sistema Aluaço Space (figura 2.29c), trata-se de um nó esférico com capacidade para unir até quatorze barras com extremidades em roscas (SOUZA, Alex, 1998).

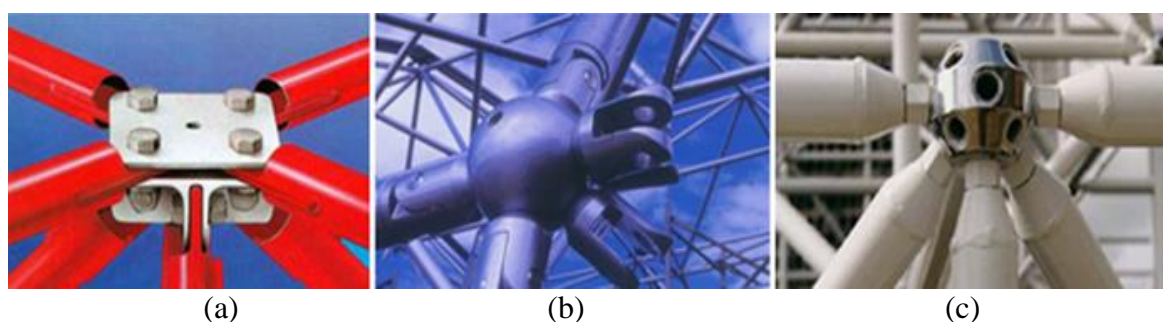


Figura 2.29 - Sistemas brasileiros patenteados: a-Bemo Varitec; b-Sistema Axis; c-Sistema Aluaço Space. Fonte: www.bemo.com.br; www.perfil.com.br (apud SOUZA, Alex, 2003); www.aluaco.com.br.

Esses sistemas brasileiros patenteados ainda são pouco utilizados, por razões de terem surgido recentemente, ainda são poucos conhecidos e seus custos são mais elevados que os sistemas não patenteados que são de uso público e bastante conhecidos (FREITAS, 2008).

SOUZA, Arnaldo, (2002) ressalva que para um sistema de estrutura espacial ter boa aceitação comercial e ser competitivo diante de outras formas de cobertura, precisa apresentar características como: leveza, facilidade de fabricar e transportar os elementos, rapidez na montagem, ter aparência estética agradável e baixo custo de construção e de manutenção.

“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.” (SOUZA, Alex, e GONÇALVES, 2007).

2.6.7 Custos

Os principais fatores que determinam o custo de uma treliça espacial são: o consumo de material, a quantidade de barras e de nós, o local da obra e o tipo de montagem. Sendo que

destes o mais significativo é o número de nós que é influenciado pelo tamanho dos módulos e pela inclinação das barras. O ideal seria um arranjo com módulos que aliem baixo consumo de material e poucos nós, pois o custo dos nós pode variar entre 25% a 75% do custo da treliça (IFFLAND, 1982 *apud* SAMPAIO, 2004).

A escolha das dimensões do módulo e da altura da treliça são os determinantes principais para o peso e para o custo. Estudos indicaram que alturas com relação correspondentes aos valores de vão/11 e vão/15 pode resultar em diminuição de custos (LAN e QIAN, 1986 *apud* SOUZA, Arnaldo, 2002).

De acordo Cuoco (1997 *apud* SOUZA, Alex, 2003), nos Estados Unidos, o processo de montagem representa de 30% a 40% do custo total de uma obra. Portanto é necessário ter muita atenção para que se possa escolher um sistema de ligação que combine eficiência estrutural com simplicidade de fabricação e montagem, e escolher barras com seções padronizadas, no máximo, de seis a nove seções diferentes para a estrutura.

O preço relativo a estruturas espaciais é publicado no Portalmetálica (2014), uma página eletrônica que disponibiliza a cotação de preço com valores médios, levando em consideração o tamanho dos módulos formados pelos vãos e a área total da estrutura. O quadro 2.2 mostra os valores atualizados em 28/07/2014.

Área (m ²)	módulo (m)	kg/m ²	R\$/m ²	R\$/kg
até 2.000	20 x 20	18	252,00	14,00
	25 x 25	20	280,00	14,00
	22 x 20	18	252,00	14,00
de 2.000 até 5.000	25 x 25	20	280,00	14,00
	30 x 30	25	350,00	14,00

Quadro 2.2 - Cotação de preço de estrutura espacial.

Fonte: www.metalica.com.br.

Para Bellei, (2006), a otimização dos custos de uma estrutura depende da compatibilidade e harmonia entre o sistema estrutural e os processos de fabricação e montagem. Isso pode ser alcançado por meio de um detalhamento bem elaborado das conexões e especificação de materiais de acordo com as premissas do projeto. O custo da estrutura acabada também está relacionado ao consumo de materiais, como, por exemplo, a quantidade de toneladas (ton) de aço utilizada em uma determinada cobertura, representado pela relação custo/tonelada (R\$/ton). Entretanto, além do custo do material, vários outros fatores têm grande influência na composição do custo final de uma estrutura, como:

- a) escolha do sistema estrutural;

- b) projeto dos elementos estruturais individuais;
- c) projeto e detalhe das conexões;
- d) processo utilizado na fabricação;
- e) especificação para fabricação e montagem;
- f) sistema de proteção à corrosão;
- g) processo de montagem;
- h) proteção contra incêndio e dentre outros.

Os principais itens e sua participação percentual na composição de custos de uma estrutura estão representados na tabela 2.1.

Tabela 1 - Composição de custo de uma estrutura.

ITEM	COMPOSIÇÃO DE CUSTO (%)
Projeto estrutural	1 a 3
Detalhamento	2 a 6
Material e insumos	20 a 50
Fabricação	20 a 40
Limpeza e pintura	10 a 30
Transporte	1 a 3
Montagem	20 a 35

Fonte: Bellei (2006).

2.8 TRABALHOS RELACIONADOS ÀS ESTRUTURAS ESPACIAIS

Os trabalhos sobre estruturas espaciais ainda são poucos se compararmos a outros temas no meio estrutural. Entre os principais trabalhos relacionados a esse tema estão o de Porto (1999), já citado em tópicos anteriores, que mostra os principais conceitos de estruturas espaciais, seus pioneiros em pesquisas, os principais tipos de ligações nacionais e internacionais para esses sistemas estruturais. No trabalho de Maiola (1999), além de dar os conceitos gerais sobre estruturas espaciais, ele apresenta um estudo com barras de extremidades estampadas utilizando instrumentação com extensômetros elétricos tendo objetivo de avaliar os esforços de compressão, evolução da flexão nas barras e a concentração de tensões junto aos nós. Já nas pesquisas de Sampaio (2004), foi realizado uma análise

numérica via elementos finitos nos tipos ligações nó típico, nó de aço e nó com chapa ponteira.

2.8.1 Simulação numérica do comportamento estrutural de torres de linhas de transmissão em perfis tubulares

No entanto, para uma pesquisa comparativa entre perfis do tipo tubular redondo e cantoneira de abas iguais, no trabalho de Gabrielli (2004), para torres de linha de transmissão, fez-se uma comparação entre a cantoneira e o perfil tubular, tendo como o principal objetivo estudar a viabilidade do uso de torres de transmissão de energia em perfis tubulares. Neste trabalho foi realizado várias comparações entre a torre em perfis-cantoneira e a torre em perfis tubulares, a fim de demonstrar as vantagens dos perfis tubulares em relação aos perfis cantoneira. Nas torres em perfis-cantoneira há um grande número de contraventamentos secundários para reduzir o comprimento destravado dos elementos principais, já que com os perfis cantoneira os comprimentos de flambagem não devem ser muito grandes. Os perfis tubulares já admitem comprimento de flambagem maiores, logo se fossem projetadas torres levando em conta as peculiaridades dos perfis tubulares, certamente seriam geradas torres mais leves.

2.8.2 Estudo de viabilidade de cobertura metálica com alternativas em perfis formados a frio, laminados abertos ou tubulares

No trabalho de Pillar (2013) foi apresentado o dimensionamento de três soluções para uma cobertura metálica de grande vão. Na solução em perfis tubulares mostra que este perfil foi a solução que apresentou menor custo total, apesar de o perfil tubular ser mais caro que os perfis laminados e perfis formados a frio. Por ser a solução mais leve, mais barata e de melhor aparência, esta é a solução mais vantajosa; na solução com perfis formados a frio proporcionam flexibilidade maior para escolha do formato e dimensões mais adequados, como desvantagem deste tipo de perfil, deve-se destacar a ocorrência da flambagem local, que reduz a resistência das peças; enquanto nos perfis laminados a quente foi a que mostrou maior peso total e custo bastante superior às outras soluções, tem tensão de escoamento menor que os aços escolhidos para as outras soluções e as ligações são obrigatoriamente soldadas devido à configuração da estrutura, que não permite ligações parafusadas.

3 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Neste capítulo estão descritos as características do projeto em estudo, a metodologia adotada, além dos parâmetros utilizados, como: as propriedades dos materiais (aço), o processo de definição da carga de projeto e o processo para dimensionamento da seção transversal do perfil cantoneira adequada para a treliça espacial analisada.

3.1 PROJETO BASE ADOTADO

Para o presente trabalho utilizou-se como base o projeto estrutural da cobertura da rodoviária municipal de Breu Branco/PA, cedido pela Eletrobras Eletronorte S/A.

Construído em 2011 para comportar vans, micro-ônibus e ônibus, e garantir abrigo e conforto para seus usuários, o terminal rodoviário (figura 3.1) é composto por: área de alimentação, banheiros, agências de vendas de passagens e espaço para depósitos de bagagens (guarda-volumes).



Figura 3.1 - Terminal rodoviário de Breu Branco/PA.

O fechamento (vedação) é executado em telhas trapezoidais de aço com espessura de 0,5mm, com pintura eletrostática nas duas faces, fixadas com parafusos à estrutura secundária composta de suportes (montantes) e longarinas (terças), estas confeccionadas em perfis de chapa dobradas a frio, em aço USI-SAC-300, com acabamento em pintura eletrostática.

3.1.1 Caracterização da estrutura espacial da rodoviária de Breu Branco

A área coberta tem forma retangular com dimensões de (60 x 48)m, conforme a planta de cobertura (ver anexo A), cuja estrutura principal, objeto do presente trabalho, é uma treliça espacial metálica de perfil tubular circular.

O arranjo das malhas da treliça espacial é quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo, conforme se verifica na planta baixa (ver anexo B). A estrutura é composta por duas camadas de banzos, conforme se verifica nas vista da planta no anexo C.

As barras dos banzos têm seção tubular circular com 76,2mm de diâmetro e 4,75mm de espessura, comprimento padronizado de 2,63 m, formando módulos básicos na forma de pirâmides de base quadrada. As diagonais também são barras tubulares circulares, comprimento padronizado de 2,56m, com 50,0mm de diâmetro e 3,75mm de espessura, dispostas numa inclinação de $43,43^\circ$ com o plano dos banzos, resultando numa altura que corresponde a 1,76m.

Toda a estrutura é sustentada por nove pilares de concreto armado de 6m de altura e 0,75m de diâmetro, dispostos simetricamente em três fileiras, uma no centro e duas próximas às laterais (ver anexo C). A partir do topo de cada pilar são fixados, com chumbadores, os apoios tipo “pé de galinha”, compostos por quatro tubos de aço em seção tubular circular, diâmetro de 150mm (ver figura 3.2). A maior distância entre os apoios (maior vão) corresponde a 15,8m. Verifica-se um balanço de 5,25m em todas as laterais da estrutura.



Figura 3.2 - Pilar e apoios tipo “pé de galinha”.

3.1.2 Tipos de ligações (nós) utilizados

O tipo de ligação predominante é o nó típico, onde apenas um parafuso faz a fixação dos banzos com as diagonais, conforme o detalhe de ligação do projeto no anexo D. No entanto, em algumas ligações existe a presença de chapas como meio de ligação entre a barra

e o nó, o que caracteriza o chamado nó típico com chapa complementar. A figura 3.3 mostra exemplos dos dois tipos de nós utilizados nas ligações da treliça espacial.

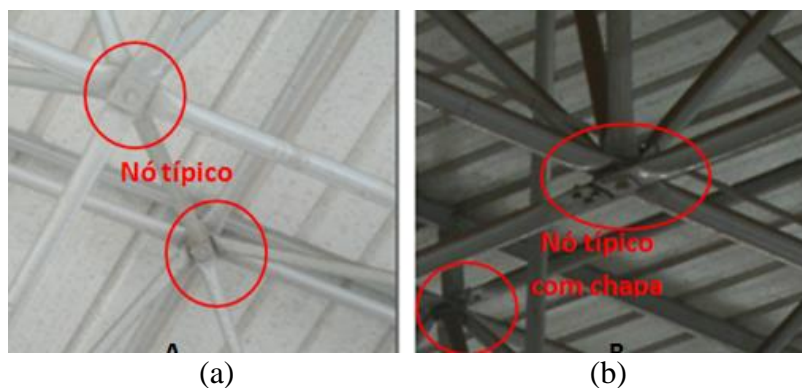


Figura 3.3 - Ligações utilizadas na treliça: a - nó típico; b - nó típico com chapa complementar.

3.2 PARÂMETROS GERAIS

Para as análises e dimensionamento da estrutura espacial, utilizou-se o *software* comercial *SAP 2000 v.14*[®], apropriado para análise e dimensionamento estrutural, inclusive para estrutura tridimensional. Após ter determinado os parâmetros de projeto, os dados foram lançados para realização das análises.

Para o levantamento de preços, fez-se a composição de custo unitário, considerando os preços de serviços e de insumos disponíveis na cidade de Tucuruí/PA, no Sistema Nacional de Preços e Insumos (SINAPI, 2014) e na Tabela de Composição e Preços para Orçamento (TCPO, 2010). Contando-se ainda, com documentos importantes que são a planilha orçamentária e o memorial descritivo, além do projeto estrutural (anexo B) e do projeto arquitetônico (anexo C).

3.3 MÉTODOS

Utilizou-se o *software* comercial *SAP 2000 v.14*[®], baseado no método dos elementos finitos (MEF), por meio do qual analisou a estrutura, adotando o método de análise linear elástica, ou seja, considerando os efeitos de segunda ordem, não levando em considerações a plastificação da estrutura, e também as deformações geométricas em decorrências da estampagem das extremidades das barras, e nem as deformações nos nós. No qual, o método

linear já é considerado automaticamente no *software*, que analisa considerando as propriedades do material empregado e a seção adotada.

Primeiramente fez-se a análise da estrutura atual, com perfil tubular, para se definir a carga de projeto. Posteriormente fez-se uma análise da treliça espacial utilizando perfis cantoneiras de abas iguais. A partir dos resultados obtidos, fizeram-se: estudos comparativos de consumo de aço, considerando o peso próprio dos perfis metálicos tubulares e cantoneiras; análise comparativa de custos entre os perfis tubulares e cantoneiras; e considerações a respeito da praticidade na execução da treliça espacial, comparando rapidez e facilidade de montagem e destacando os materiais e elementos necessários para as ligações usando nó típico, empregado, de fato, na estrutura com perfil tubular circular, e usando nó de aço, que pode ser adotado para treliça espacial com perfil cantoneira.

Para verificação e dimensionamento procedeu-se da seguinte forma:

- Inicialmente fez-se o desenho com o eixo dos futuros perfis da estrutura no Auto Cad[®], e logo depois foi exportado para o SAP 2000v14[®], seguindo as dimensões impostas pelo projeto arquitetônico;
- Já no SAP 2000v14[®], definiu-se as propriedades do material da estrutura espacial, seguindo os parâmetros do aço USI-SAC-300;
- Adicionou-se a cargas-teste, analisando os perfis tubulares, até definir uma carga estimada para o projeto;
- Depois, com a carga estimada, definiram-se as dimensões dos perfis cantoneira para os banzos superiores, banzos inferiores e para as diagonais da treliça espacial; e
- Finalmente fez-se a análise comparativa entre o perfil tubular e perfil cantoneira considerando o consumo de aço em tonelada, o custo, e a praticidade na execução da treliça espacial.

Todos os dados do projeto foram atribuídos ao modelo, obedecendo à norma de estruturas de aço NBR 8800 (2008), analisando-se até que se encontrasse a carga estimada de projeto, e a partir desta, dimensionou-se o perfil cantoneira de abas iguais para a treliça espacial.

A estrutura foi modelada e analisada como pórtico espacial, ao qual, o SAP 2000 v14[®] possibilita a visualização do modelo em análise, mostrando a geometria e as dimensões dos elementos de acordo com as características e propriedades que forem inseridas nas telas

de definição de propriedades e seções dos materiais. A figura 3.4 representa a modelagem da estrutura como pórtico espacial. As figuras 3.5 e 3.6 representam os modelos de uma treliça com perfil tubular e perfil cantoneira, respectivamente.

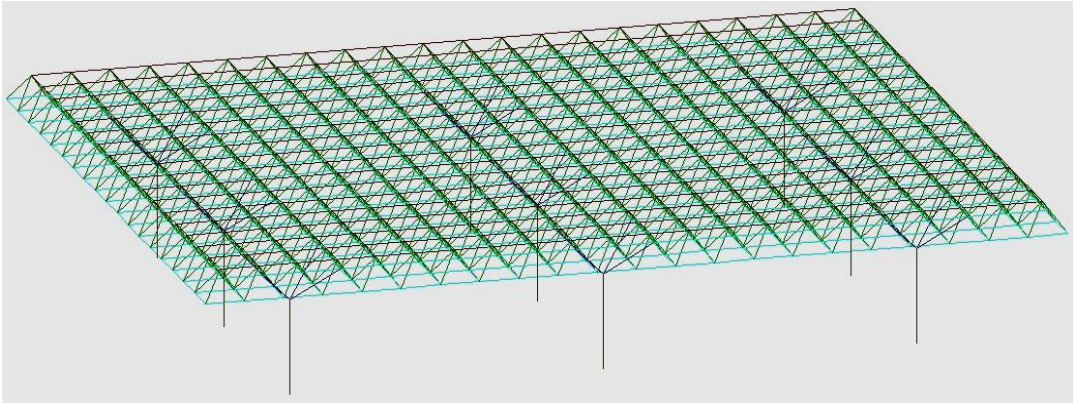


Figura 3.4 - Modelagem de estrutura espacial no SAP.

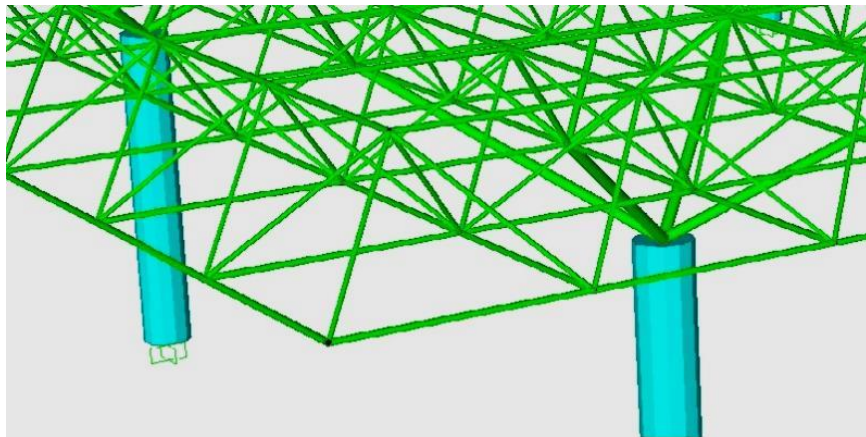


Figura 3.5 - Modelagem com perfil tubular circular.

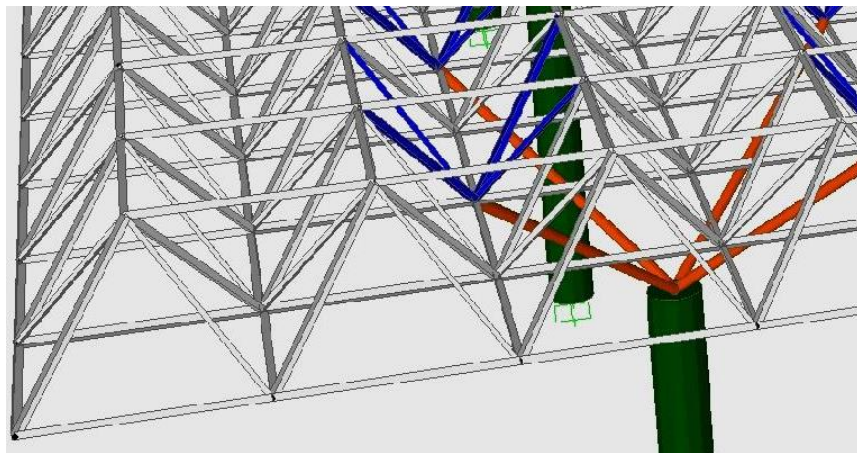


Figura 3.6 - Modelagem com perfil cantoneira de abas iguais.

3.3.1 Propriedades do aço utilizadas para análise

O aço empregado tanto nos perfis tubulares circulares quanto nos perfis cantoneiras é do tipo USI SAC-300, apresentando as seguintes propriedades:

- Peso específico (γ) = 78,5 kN/m³;
- Módulo de Elasticidade (E) = 205 GPa;
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3;
- Tensão de Escoamento (f_y) = 300 MPa;
- Tensão de Ruptura (f_u) = 400 MPa.

3.3.2 Ações de projeto

Conforme o memorial descritivo disponibilizado pela Eletrobras Eletronorte, os cálculos para a determinação das peças estruturais deverão obedecer às normas: NBR 8800 (2008): Projeto e execução de estruturas de aço; NBR 8681 (2003) Ações de segurança nas estruturas; NBR 6120 (1980): Cargas para cálculo de estruturas; NBR 6123 (1988): Forças devido ao vento em edificações; e normas complementares que se fizerem necessárias. No entanto, os valores do carregamento que foi adotado para cálculo da estrutura, não estão explícitos no projeto estrutural e arquitetônico e nem no memorial descritivo e não se teve acesso ao memorial de cálculo. Devido a este fato, procurou-se estimar o carregamento último que a estrutura suporta, teoricamente, por meio de análise computacional lançando mão das propriedades dos perfis tubulares circulares utilizados na treliça. O resultado do carregamento estimado foi adotado como sendo a carga de projeto.

Inicialmente foram consideradas cargas distribuídas por área de cobertura (kgf/m²), posteriormente fez-se a concentração destas cargas, utilizando o método de área de influência, transformando cargas distribuídas em cargas pontuais coincidindo, exatamente, sobre os nós do banzo superior que recebem diretamente as montantes que sustentam a estrutura secundária, que por sua vez, sustenta as telhas, conforme verificado no projeto e constatado na estrutura por meio de visita ao local. Com isso verificou-se que as montantes de sustentação da estrutura secundária não se distribuem simetricamente, por isso foram encontradas três diferentes áreas de influência, e fez-se também identificação dos nós que recebem as cargas

das montantes. Desta forma, as cargas pontuais para os nós, referente a cada área, foram calculadas por meio de planilha do Microsoft Excel como se observa no quadro 3.1.

ÁREA DE INFLUÊNCIA (m ²)	CARGA DISTRIBUÍDA (kgf/m ²)				CARGAS CONCENTRADAS (kgf)
	50	80	94	95	
6,92	346,00	553,60	650,48	657,40	CARGAS CONCENTRADAS (kgf)
10,36	518,00	828,80	973,84	984,20	
13,83	691,50	1106,40	1300,02	1313,85	

Quadro 3.1 - Planilha de cargas concentradas sobre os nós.

Utilizando o software SAP 2000 v 14[®], a estrutura foi analisada para verificar o valor do carregamento suportado pelas barras. Isso foi realizado mantendo fixas as dimensões reais das seções tubulares, conforme mostra a figura 3.7. Já na tela onde se insere as cargas, foram lançados os valores das sobrecargas concentradas, conforme mostra a figura 3.8.

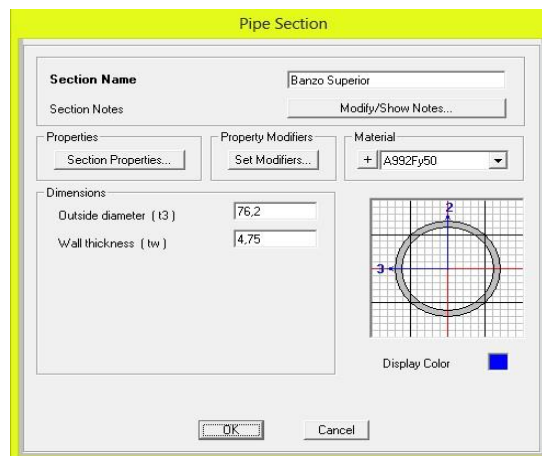


Figura 3.7 - Tela do SAP onde se define a seção das barras.

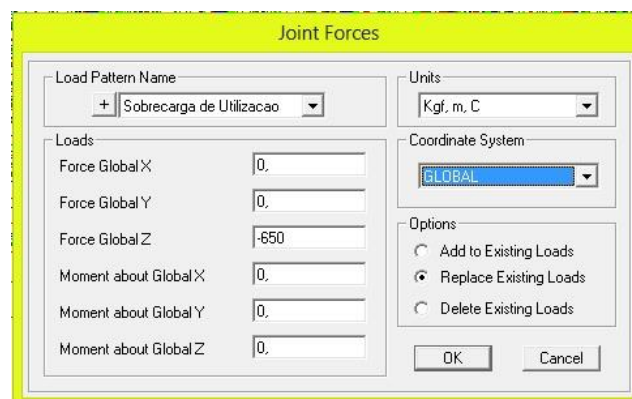


Figura 3.8 - Tela do SAP onde é lançado o valor da sobrecarga.

Com as sobrecargas pontuais lançadas sobre os nós do modelo, de acordo com sua respectiva área de influência, pode-se visualizar na tela do *SAP* toda a estrutura “carregada” e pronta para ser analisada, conforme a figura 3.9.

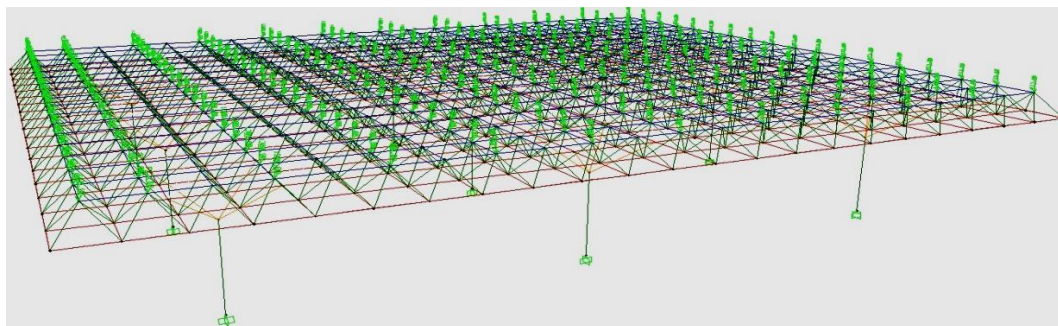


Figura 3.9 - Visualização do modelo com sobrecarga aplicada.

Vários valores de sobrecarga foram analisados, a exemplo dos indicados no quadro 3.1, com uma carga de 50 kgf/m² verificou-se que todas as barras passavam com folga; já com uma carga de 80 kgf/m² foi observado que a grande maioria das barras passava com folga, no entanto, poucas barras, exatamente, aquelas localizadas mais próximas dos apoios, falharam. Para uma melhor homogeneização dos resultados da análise, adotou um artifício de aumentar o diâmetro e/ou a espessura da parede dos tubos, reforçando assim, os elementos que falharam. Com isso continuou-se analisando a estrutura com acréscimo de cargas até chegar ao valor limite de 94 kgf/m². Verificou-se que com um carregamento de 95 kgf/m² as barras falharam distribuidamente. Portanto, neste trabalho adota-se 94 kgf/m² como carga de projeto para análise da estrutura utilizando perfil cantoneira de abas iguais.

Para a carga adotada de 94 kgf/m² considerou-se, para efeito de cálculo estrutural e de orçamento das barras em perfil tubular circular, as dimensões (76,2x 4,75)mm e (50x3,75)mm. Nota-se que são utilizadas apenas duas dimensões de seções (diâmetro x espessura), isto é importante para facilitar a especificação de material e a montagem da estrutura. O quantitativo e descrição dos perfis estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 2 - Dimensões das barras em perfil tubular circular.

Elementos	Nº de barras	Diâmetro x espessura (mm)	Comprimento (mm)
Diagonais	1.440	50,0 x 3,75	2.560,00
Banzo Superior	752	76,2 x 4,75	2.630,00
Banzo Inferior	832	76,2 x 4,75	2.630,00
Reforço/diagonais	144	76,2 x 4,75	2.560,00

3.3.3 Dimensionamento do perfil cantoneira

Para dimensionar os perfis cantoneiras procedeu-se fixando a carga no valor de 94 kgf/m², e agora variando a largura e a espessura das abas das cantoneiras. Isso foi realizado no software SAP 2000 v 14[®], inserindo os dados na tela onde se define as dimensões das seções dos materiais analisados, conforme a figura 3.10.

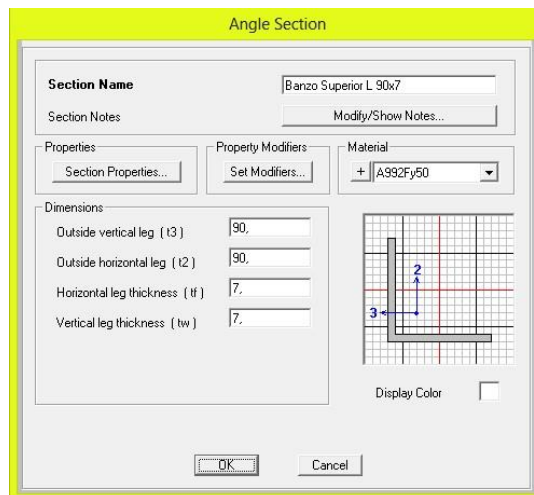


Figura 3.10 - Tela do SAP para definir as seções do perfil cantoneira

Desta forma, várias dimensões de seções foram analisadas, definindo-se as dimensões dos perfis cantoneiras que suportam ao carregamento de 94 kgf/m². Assim, para efeito de cálculo estrutural e de orçamento das barras em perfil cantoneira de abas iguais definiu-se as seguintes dimensões, cujos quantitativos estão descritas na tabela 3.2.

Tabela 3 - Dimensões das barras em perfil cantoneira de abas iguais.

Elementos	Nº de barras	Abas x espessura (mm)	Comprimento (mm)
Diagonais	1.440	80,00 x 4,00	2.560,00
Banzo Superior	752	80,00 x 5,00	2.630,00
Banzo Inferior	832	80,00 x 8,00	2.630,00
Reforço/diagonais	144	90,00 x 8,00	2.560,00

Além do reforço das 144 diagonais dos apoios, poderia adotar o mesmo mecanismo para as próximas barras a falharem, porém, como se trata de uma análise comparativa seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o perfil tubular circular, além do mais, não é recomendado adotar várias seções de um mesmo perfil para uma mesma estrutura.

As dimensões e as propriedades geométricas, tanto dos perfis tubulares circulares usados na treliça espacial da rodoviária municipal de Breu Branco, quanto dos perfis cantoneiras, dimensionados neste trabalho, estão dispostos nos quadros 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tubo redondo						
Diâmetro externo	Espessura parede	Massa por compri. Unitário	Área da seção	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Elasticidade
D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	r (cm)	W (cm ³)
76,2	4,75	8,37	10,66	68,35	2,53	17,94
50	3,75	4,35	5,54	15,43	1,66	6,07

Quadro 3.2 - Dimensões e propriedades geométricas dos perfis tubulares circulares.

Fonte: www.guiametalica.com.br

Cantoneira simples de abas iguais						
Dimensão da aba	Espessura parede	Massa por compri. Unitário	Área da seção	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo de Elasticidade
d (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I x=Iy (cm ⁴)	rx=ry (cm)	W (cm ³)
90	8	10,9	13,9	104	2,74	16,1
80	8	9,66	12,3	72,3	2,42	12,6
80	5	6,08	7,75	48,6	2,5	8,35
80	4	4,73	6,24	46,4	2,77	-

Quadro 3.3 - Dimensões e propriedades geométricas de perfis cantoneiras.

Fonte: www.guiametalica.com.br

Essas dimensões e propriedades geométricas são de suma importância para o processo de dimensionamento de perfis em aço, pois são úteis na inserção de dados para análises por meio de programas computacionais e, principalmente, para o dimensionamento realizado por meio de cálculos manuais.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da análise e comparação referente ao consumo de aço, ao custo e a praticidade de montagem da estrutura espacial da cobertura da rodoviária de Breu Branco, usando perfil cantoneira como alternativa ao perfil tubular circular, originalmente adotado, são apresentados neste capítulo. Como se trata de um estudo comparativo, não se levou em conta os impostos e os Benefícios e Despesas Indiretas (BDI), relativos à estrutura em estudo, contudo os preços se obtiveram em relação aos custos dos materiais e da mão de obra.

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO DE AÇO

É importante ressaltar que, para esta análise foi considerando apenas o aço para as barras, não contando com o material dos elementos de ligação e fixação, como chapas, parafusos, porcas e arruelas, elementos básicos do nó típico; nem outros elementos e dispositivos que podem ser necessários para as ligações da treliça com perfis cantoneiras.

Considerando as dimensões usadas para efeito de cálculo estrutural e de orçamento das barras, encontrou-se a área da seção líquida de aço, a partir da qual se fez uma relação com o comprimento de cada barra, com número de barras de cada elemento e considerando 7.850 kg/m^3 como o peso específico (γ) do aço, encontrando assim o consumo total de aço, em tonelada (ton), que é a quantidade de aço utilizada nas barras que compõe a treliça, isto é, o peso próprio das barras em perfil tubular circular da estrutura espacial.

A tabela 4.1 mostra o número de barras de cada tipo de elemento, as dimensões e o consumo de aço para perfil tubular circular.

Tabela 4 - Consumo de aço para perfil tubular.

Elementos	Nº de barras	Diâmetro x espessura (mm)	Seção (mm²)	Comprimento (mm)	Consumo (ton)
Diagonais	1440	50,00 x 3,75	540	2.560,00	15,63
Banzo Superior	752	76,20 x 4,75	1070	2.630,00	16,61
Banzo Inferior	832	76,20 x 4,75	1070	2.630,00	18,38
Reforço/diagonais	144	76,20 x 4,75	1070	2.560,00	3,10
				TOTAL	53,72

Considerando as barras em perfil cantoneira de abas iguais, dimensionadas anteriormente, o consumo de aço para a estrutura resulta em 53,76 ton. A tabela 4.2 mostra o

número de barras de cada tipo de elemento, as dimensões e o consumo de aço para perfil cantoneira.

Tabela 5 - Consumo de aço para perfil cantoneira.

Elementos	Nº de barras	Abas x espessura (mm)	Seção (mm ²)	Comprimento (mm)	Consumo (ton)
Diagonais	1440	80,00 x 4,00	620	2.560,00	17,94
Banzo Superior	752	80,00 x 5,00	700	2.630,00	10,87
Banzo Inferior	832	80,00 x 4,00	1.220	2.630,00	20,96
Reforço/diagonais	144	90,00 x 8,00	1.380	2.560,00	3,99
				TOTAL	53,76

Observa-se que a diferença da quantidade de aço consumida entre perfil tubular circular e perfil cantoneira é muito pequena, o mesmo pode ser observado no gráfico 4.1 abaixo que compara os resultados do consumo de aço para a mesma estrutura, utilizando os perfis mencionados.

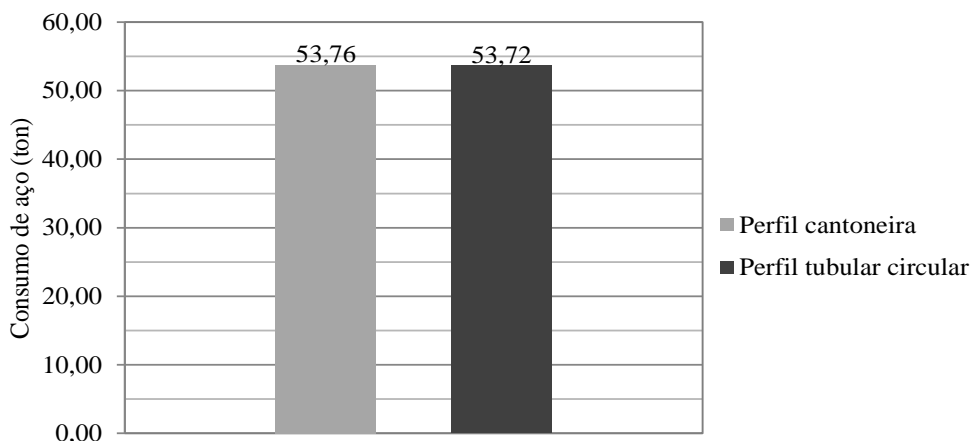


Gráfico 4.1 - Comparação do consumo de aço.

Verifica-se que para a quantidade de aço consumida nas barras circulares, usadas de fato na estrutura, e a quantidade de aço para as barras em perfil cantoneira, não há mudanças nas cargas que incidem sobre os pilares que sustentam a estrutura, pois o peso próprio da treliça sofre uma variação insignificante, de 0,044 ton (0,08%), e também a sobrecarga de projeto é a mesma para ambos os perfis.

Considerando o consumo apresentado e a área da cobertura de 2.880 m², chega-se aos índices de consumo de aço por metro quadrado da estrutura, sendo 18,65 kg/m² para perfil tubular circular e 18,67 kg/m² para perfil cantoneira.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS

Com o levantamento de dados e quantitativos obtidos no projeto, e ainda com a composição de custo unitário seguindo-se as diretrizes da Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010) e do catálogo de composições do SINAPI, e com a busca de preços dos materiais e serviços inerentes à estrutura espacial também no SINAPI e em pesquisa nos principais fornecedores de perfis de aço na região, foi possível elaborar uma planilha orçamentária do serviço de construção da treliça metálica espacial. Entretanto, não foi possível encontrar preços referentes aos sistemas de ligação, como exemplo, o nó de aço, considerado neste trabalho. Os quadros 4.1 e 4.2 mostram as planilhas de composição de custo unitário, onde constam os índices de consumo e preços dos serviços e materiais, tanto para perfil tubular circular quanto para perfil cantoneira simples, os quais resultam nos valores de R\$111,83/m², e R\$77,24/m², respectivamente.

Serviço: Estrutura Espacial Metálica com perfil tubular circular: m²					
DESCRIÇÃO	UNIDADE	ÍNDICE	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	CUSTO DO MATERIAL (R\$)	CUSTO DA MÃO DE OBRA (R\$)
Perfil Tubular 76,2x4,75 mm e 50x3,75 aço laminado USI SAC-300	kg	18,65	4,75	88,59	
Montador de estruturas metálicas de tubo de aço	h	1,00	14,00		14,00
Ajudante	h	1,00	4,17		4,17
Pintor c/ revolver	h	0,13	10,70		1,39
Tinta esmalte sintético fosco	L	0,18	20,93	3,68	
Preço unitário (R\$)					111,83

Quadro 4.1 - Planilha de composição de custo unitário para perfil tubular circular

Serviço: Estrutura Espacial Metálica com perfil cantoneira: m²					
DESCRIÇÃO	UNIDADE	ÍNDICE	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	CUSTO DO MATERIAL (R\$)	CUSTO DA MÃO DE OBRA (R\$)
Perfil Cantoneira 90x8 mm; 80x8 mm; 80x5 mm e 80x4 mm aço laminado USI SAC-300	kg	18,67	3,29	61,42	-
Montador de estruturas metálicas	h	1,00	6,57	-	6,57
Ajudante	h	1,00	4,17	-	4,17
Pintor c/ revolver	h	0,13	10,70	-	1,39
Tinta esmalte sintético fosco	L	0,18	20,93	3,68	-
Preço unitário (R\$)					77,24

Quadro 4.2 - Planilha de composição de custo unitário para perfil cantoneira.

Comparando-se os valores de preço unitário, verifica-se que o m² da estrutura usando perfil tubular custa R\$ 34,59 a mais que o m² da estrutura usando perfil cantoneira. Apesar

dos dois perfis apresentarem o mesmo peso em aço, o perfil cantoneira apresenta preço mais acessível em relação ao perfil tubular e é mais fácil de ser adquirido no mercado local. O gráfico 4.2 mostra a diferença de custo unitário entre perfil cantoneira e perfil tubular circular.

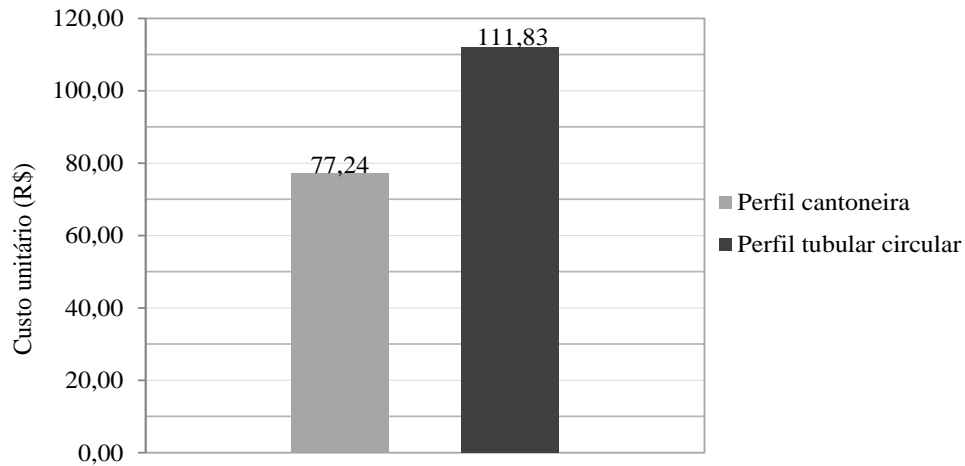


Gráfico 4.2 - Comparação do custo unitário.

A partir do custo unitário encontra-se o valor do custo total da estrutura conforme os quadros 4.3 e 4.4 que mostram as planilhas referentes à quantidade e preços para perfil tubular circular e para perfil cantoneira, respectivamente.

PLANILHA DE QUANTIDADES E PREÇOS					
				Preço (R\$)	
Item	Descrição dos serviços	Unid.	Quantidade	Unitário	Total
1.0	Estrutura espacial metálica				
1.1	Fornecimento e montagem da estrutura metálica espacial em perfil tubular (76,2x4,75 mm; 50x3,75mm)	m ²	2.880	111,93	322.358,40
TOTAL DO ITEM 1					322.358,40
TOTAL GERAL DA PLANILHA					322.358,40

Quadro 4.3 - Planilha de quantidade e preço para perfil tubular

PLANILHA DE QUANTIDADES E PREÇOS					
				Preço (R\$)	
Item	Descrição dos serviços	Unid.	Quantidade	Unitário	Total
1.0	Estrutura espacial metálica				
1.1	Fornecimento e montagem da estrutura metálica espacial em perfil cantoneira (90x8 mm; 80x8mm; 80x5mm; 80x4mm)	m ²	2.880	77,17	222.249,60
TOTAL DO ITEM 1					222.249,60
TOTAL GERAL DA PLANILHA					222.249,60

Quadro 4.4 - Planilha de quantidade e preço para perfil cantoneira

Diante dos valores referentes aos custos da estrutura espacial, verifica-se que há uma significativa redução com a utilização do perfil cantoneira em relação ao perfil tubular circular, resultando numa economia de 30,93%. A diferença de custo pode ser mais bem observada no gráfico 4.3.

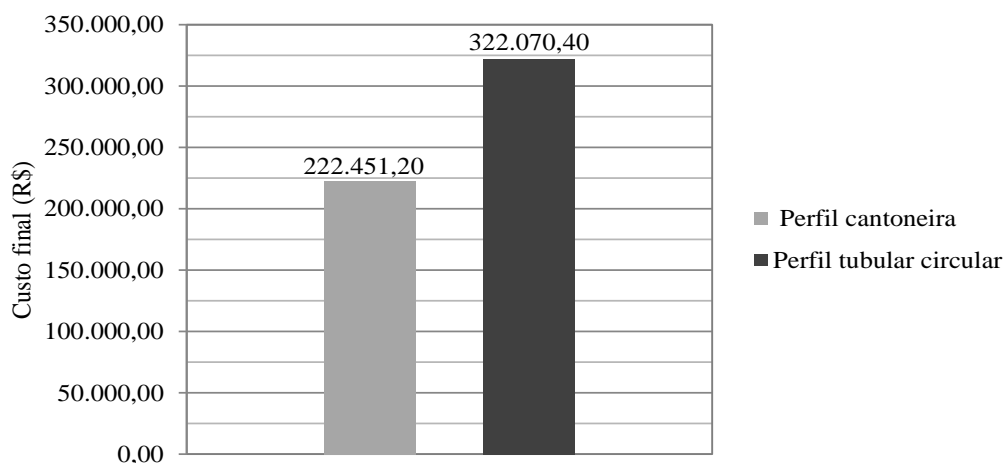


Gráfico 4.3 - Comparação de custos final da estrutura.

Verifica-se, em números reais, uma diferença de R\$ 99.619,20 (noventa e nove mil e seiscentos e dezenove reais e vinte centavos). Isso ocorre por que o preço do perfil tubular circular, e também o custo da mão de obra do montador de estruturas metálicas de tubo de aço são mais elevados em relação ao perfil cantoneira. Portanto, nessas condições, o custo da treliça com perfil cantoneira é significativamente mais barato em relação ao perfil tubular circular.

4.3 PRATICIDADE DE EXECUÇÃO DA TRELIÇA ESPACIAL CONSIDERANDO AS LIGAÇÕES PARA PERFIL TUBULAR CIRCULAR E PERFIL CANTONEIRA

4.3.1 Produção dos perfis

Segundo Palma (2007), o processo de produção dos perfis tubulares e cantoneiras se dão por rolos especiais chamados laminadores, ou seja, laminação a quente. Sendo ambos empregados em estruturas metálicas, em que as cantoneiras são usadas principalmente em treliças, contraventamentos, linhas de transmissão de energia elétrica e ligações, já o tubo redondo é bastante utilizado em andaimes tubulares para escoramento de pontes e em coberturas espaciais. Os tubos circulares são geralmente mais agradáveis esteticamente, mas, são difíceis para se conseguir emendas quando comparados aos perfis abertos, como é o caso do perfil cantoneira.

4.3.2 Praticidade de Montagem considerando os tipos de ligações

É importante que o tipo de ligação (nó) seja considerado nas análises comparativas, afinal, o nó é um fator muito importante que pode determinar a viabilidade de construção e o custo de uma treliça espacial, pois nem todos os tipos de ligações que pode ser adotado para perfil tubular circular podem ser adotados para o perfil cantoneira. Também, nós diferentes exigem maneiras de montagem diferentes, variação na qualificação da mão de obra. Portanto, o tipo de nó influencia na facilidade e tempo de montagem, e na eficiência estrutural da ligação entre as barras. Por isso, se fazem necessárias algumas considerações sobre a praticidade de montagem de uma treliça espacial com uso dos perfis anteriormente analisados.

Para a montagem de uma estrutura com perfil tubular circular utilizando o nó típico como ligação, como é o caso empregado na estrutura espacial do terminal rodoviário municipal de Breu Branco, são necessárias algumas atividades como: medição e corte dos tubos, estampagem (amassamento) e furação das extremidades de todas as barras; dobramento das extremidades das diagonais conforme o ângulo de inclinação das mesmas em relação aos planos dos banzos; e a montagem das barras, unidas e fixadas por meio dos parafusos formando os módulos e a montagem dos módulos formando todo o reticulado.

Observam-se as formas geométricas das extremidades das barras tubulares circulares (figura 4.1), onde todas as barras têm extremidades amassadas (estampadas) com um furo no centro da estampa, verifica-se que as extremidades das diagonais são dobradas em um determinado ângulo para possibilitar que essas barras sejam montadas com a inclinação especificada em projeto.

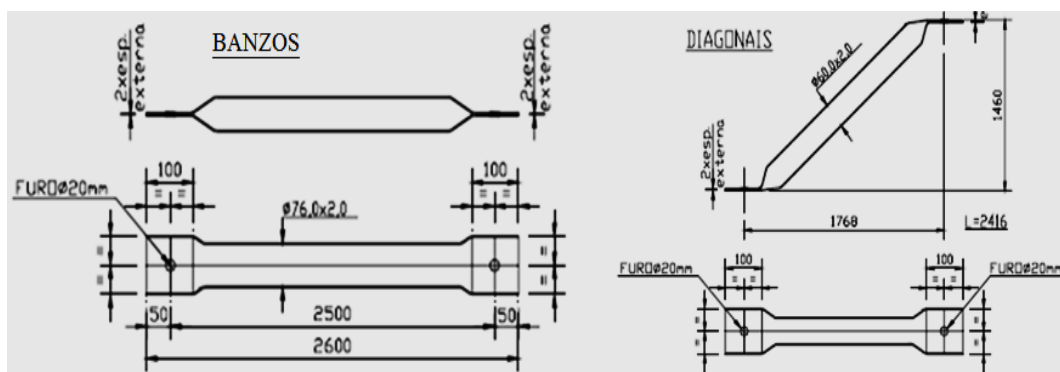


Figura 4.1 - Perfil tubular circular com extremidades estampadas.

Fonte: Adaptado de Sampaio (2004).

Tanto a estampagem quanto o dobramento deve ser realizado por meio de equipamentos que possibilitem o controle nas dimensões do estampo e precisão na

determinação do ângulo de inclinação das diagonais, assim também como deve manter o centro do furo sempre sobre a linha longitudinal média da barra.

A figura 4.2 demonstra o processo de montagem do nó típico, onde as barras do banzo e as diagonais são organizadas para serem fixadas por um único parafuso. Onde: a- montagem do nó do banzo inferior; b - montagem do nó do banzo superior; c – vista de cima do nó típico; e d - vista lateral do nó típico.

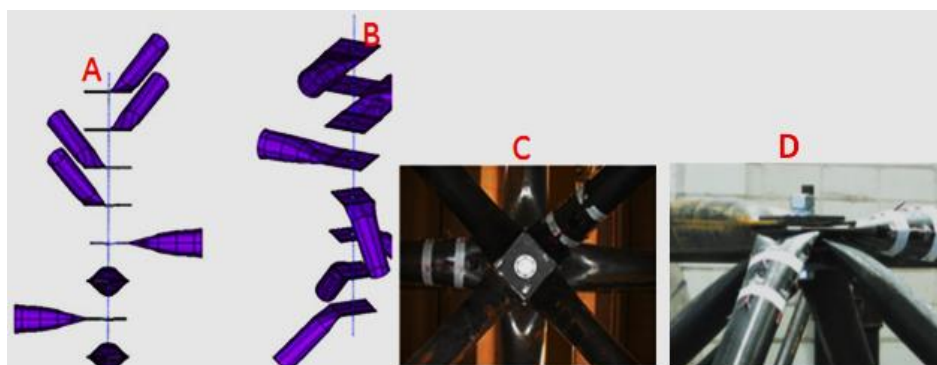


Figura 4.2 - Montagem das barras tubulares com nó típico.
Fonte: Adaptado de Sampaio (2004).

Observa-se que a montagem da ligação entre as barras usando o nó típico é relativamente simples se comparada à montagem usando outros tipos de sistemas de ligação, inclusive os patenteados que geralmente são muito mais complexos e mais caros.

Para a montagem de uma estrutura espacial usando perfil cantoneira simples de abas iguais fazem-se necessárias as atividades referentes à medição, ao corte e furação das barras; a confecção ou a compra de um dispositivo de ligação, como exemplo, o nó de aço, para fazer a fixação das extremidades das barras por meio de parafusos; a montagem das barras, formando os módulos e a montagem dos módulos formando todo o reticulado.

Verificam-se elementos diferentes, como é o caso do nó de aço dado como exemplo. Destaca-se como uma das principais diferenças nas formas de ligação, o fato de que para o “nó típico”, do perfil tubular circular, a ligação é feita apenas com um parafuso, uma porca e duas arruelas, já para o perfil cantoneira além do elemento “nó de aço”, feito com chapas de aço soldadas, é necessário uma maior quantidade de parafusos, pelo menos dois por barra em cada nó. Deste modo, a ligação com nó de aço exige pelo menos dezesseis parafusos, dezesseis porcas e 32 arruelas, tudo isso em um único nó.

As chapas utilizadas para confecção do nó de aço devem ter espessura maior que das barras, tendo em vista a função desse dispositivo de receber e distribuir as solicitações entre

as barras, pois o nó é onde se convergem as cargas. Por isso o dispositivo exige material reforçado para garantir estabilidade á estrutura. A figura 4.3 ilustra a geometria das chapas de aço que são soldadas umas às outras formando o nó de aço.

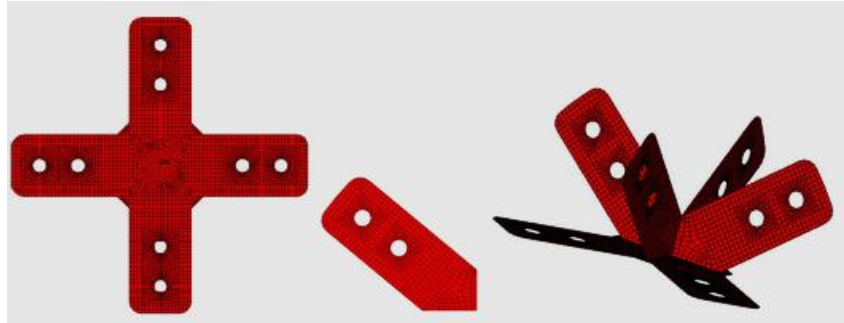


Figura 4.3 - Elementos do nó de aço.
Fonte: Adaptado de Sampaio (2004).

Com a ligação dos perfis cantoneiras de abas iguais por meio de nó de aço poderia ser utilizado um nó com chapas simples (figura 4.4), já bem conhecido e utilizado no Brasil como ligação de treliças espaciais com perfil tubular circular. Também poderiam ser usados outros tipos de nós adaptáveis ao perfil cantoneira.

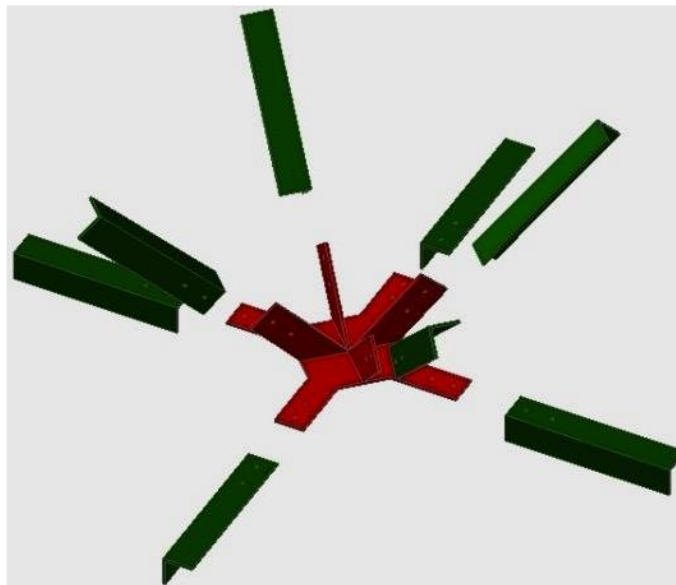


Figura 4.4 - Nó de aço com chapas simples

Verifica-se que apenas uma das abas da cantoneira é parafusada ao nó, pelo fato deste ser confeccionado com chapa simples, isso pode gerar uma concentração de tensão nesta pequena região da barra e comprometer a resistência do material.

Para uma melhor distribuição dos esforços na região de ligação da barra em perfil cantoneira poderia ser idealizado um nó confeccionado também com perfis cantoneira soldados, ao invés de chapas simples. Desta forma, as duas abas da barra seriam parafusadas ao dispositivo de ligação, conforme ilustra a figura 4.5.

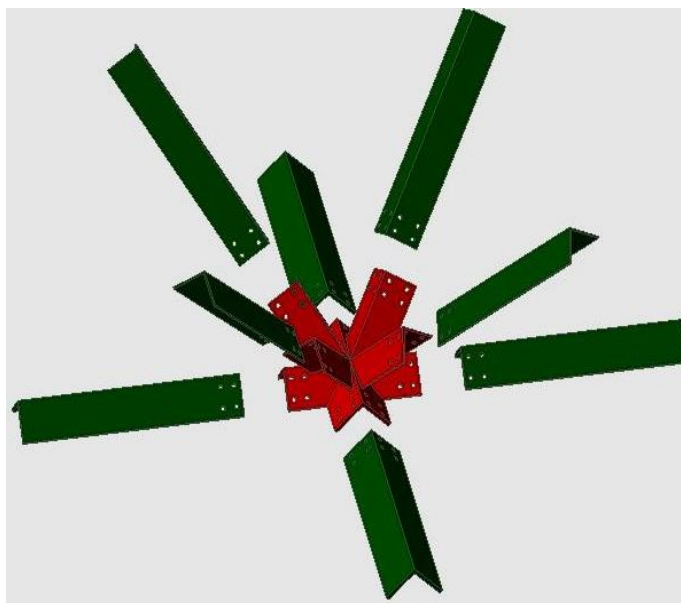


Figura 4.5 - Idéia para ligação do perfil cantoneira.

Observa-se que, como nó feito com cantoneira, o plano das abas das barras fica inclinado em relação ao plano dos banzos, também será utilizada uma maior quantidade de elementos de fixação (parafusos, porcas e arruelas), comparado ao nó de aço com chapas simples. Além disso, a confecção (corte e solda) do nó de perfil cantoneira é mais complexa que do nó de aço com chapas simples, entretanto, o processo de montagem é basicamente, o mesmo para os dois tipos de dispositivos de ligação.

4.3.3 Consumo de aço considerando os elementos de ligação

Agora, considerando os dispositivos e/ou elementos de ligação e fixação observa-se que o peso próprio da estrutura com perfil cantoneira torna-se um pouco mais elevado devido ao consumo de aço para o dispositivo de ligação (nó de aço) e a maior quantidade de acessórios de fixação (parafusos, porcas e arruelas) em relação ao nó típico usado para o perfil tubular circular que necessita apenas de poucos parafusos, porcas e arruelas para a ligação entre as barras.

4.3.4 Custo da estrutura considerando os elementos de ligação

Quanto ao custo, tanto a estrutura em perfil tubular circular quanto em perfil cantoneira sofrerão aumento de preços devido à aquisição e/ou confecção dos dispositivos e/ou elementos de ligação e fixação, além das atividades inerentes à preparação das barras para o processo de montagem.

Considerando que o custo do dispositivo de ligação (nó de aço), para a treliça com perfil cantoneira, seja mais elevado que o processo de estampagem e dobramento das barras, para a treliça com perfil tubular circular, pode haver uma diminuição na diferença de custos final da estrutura apresentada no gráfico 4.3. No entanto, diante das dimensões e dos custos dos perfis apresentados, o custo do nó de aço não seria tão caro a ponto de fazer com que o valor da treliça com perfil cantoneira chegue muito próximo ou ultrapasse o valor da treliça com perfil tubular circular.

4.3.5 Eficiência estrutural considerando os elementos de ligação

Com relação à eficiência estrutural entre nó o típico e o nó de aço, Maiola (1999) afirma, por meio de análise teórica e experimental de protótipos de treliças espaciais, que o nó típico resiste apenas a cerca de 60% de sua capacidade teórica indicada por meio de análise linear e barras com inércia constante. Verificou-se que a ruína ocorre nas ligações, apresentando rotações excessivas, escorregamento relativo entre barras e plastificação das seções das barras na região do nó. Já o nó de aço apresenta melhor desempenho estrutural, não existindo teoricamente excentricidades, uma vez que as barras concorrem para um único ponto, e também por ser este mais rígido que o nó típico. O nó de aço apresenta como modo de falha a flambagem de barras comprimidas, evidenciando a eficiência da ligação.

Destaca-se ainda, que uma das principais causas de problemas de instabilidade das estruturas espaciais construídas com barras em perfil tubular circular é a diminuição de inércia nas extremidades das barras devido à estampagem das mesmas. Isso não ocorre para barras em perfil cantoneira, indicando assim que este perfil pode oferecer segurança à ligação com nó de aço.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

As necessidades de se construir grandes áreas livres, sem interferências de elementos estruturais como os pilares de sustentação de cobertura, instigou e ainda instiga aos arquitetos e engenheiros a buscarem soluções que sejam técnica e economicamente viáveis. Neste sentido, as treliças espaciais têm sido apresentadas e utilizadas como estrutura de cobertura para diversas obras, como exemplo, terminais rodoviários, hangares, espaços para eventos culturais e esportivos e dentre outros. Devido a essas utilidades, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre treliças espaciais para se conhecer as melhores técnicas e materiais para que as tornem competitivas diante de outros tipos de estruturas de cobertura.

Neste trabalho buscou-se fazer uma análise comparativa do consumo de aço, custo e da praticidade de execução entre perfil tubular circular e perfil cantoneira de abas iguais da treliça espacial da cobertura do terminal rodoviário municipal de Breu Branco/PA. Resumidamente observou-se que o perfil cantoneira de abas iguais, em comparação ao perfil tubular circular empregado na treliça espacial, apresentou, nas ligações, a desvantagem de ter maior consumo de aço e aumentar a complexidade de montagem devido necessitar de uma quantidade expressiva de acessórios para fixação exigida pelo nó de aço. E como principal vantagem apresentou menor custo, proporcionado pelo preço do mesmo, e maior garantia de eficiência na ligação devida a maior rigidez do nó de aço em relação ao nó típico.

5.1.1 Consumo de Aço

O consumo de aço para as barras (banzos e diagonais), praticamente, não sofre alterações, pois são utilizadas 53,72 ton para barras em perfil tubular circular e 53,76 ton para perfil cantoneira de abas iguais. Constando assim um aumento irrelevante de 0,08% para este último perfil mencionado. Sendo assim, percebe-se que em relação ao peso próprio da estrutura os dois perfis apresentam o mesmo valor.

5.1.2 Custo da Estrutura

Quanto ao custo, considerando o preço dos perfis e da mão de obra para montagem e pintura da estrutura, verificou-se que o perfil cantoneira possibilita uma treliça espacial mais

econômica, com custo unitário no valor do R\$ 77,24/m², enquanto o perfil tubular circular custa R\$ 111,83/m², com isso o custo final total da estrutura chegou-se aos valores respectivos de R\$ 222.451,20 e R\$ 322.070,40. Portanto, nessas condições, o perfil cantoneira custa 30,93% a menos que o perfil tubular circular. Tornando-se mais interessante o uso de perfis cantoneira, inclusive por serem mais acessíveis para o mercado local.

5.1.3 Praticidade de Execução

Considerando a praticidade de execução, observou-se que a diferença de custo pode diminuir e o consumo de aço e o peso próprio da estrutura pode aumentar, devido ao sistema de ligação “nó de aço” utilizado para o perfil cantoneira, que além desse dispositivo, pode exigir outros elementos e acessórios como parafusos, porcas e arruelas, em maior quantidade que o nó típico, empregado nas ligações da treliça com perfil tubular circular.

Também, observou-se que a maneira de montagem e a complexidade da mão de obra se diferem entre o nó típico e o nó de aço. Contudo, considera-se que a praticidade de execução seja semelhante, à exceção do dispositivo de ligação “nó de aço” que pode elevar o custo da treliça com perfil cantoneira, porém não seria um aumento exorbitante a ponto de ultrapassar o valor de R\$ 99.619,20, referente à diferença de custo total da treliça com perfil tubular circular. Cabe ainda destacar como fator importante, a vantagem que o nó de aço tem de apresentar melhor eficiência estrutural em relação ao nó típico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que esta análise comparativa tenha apresentado indicativos iniciais de que são válidos os estudos sobre treliças espaciais, afinal seu grande leque de utilidades e suas diversas formas de construção são aspectos motivadores para o maior uso destes arranjos estruturais, assim como, para estimular pesquisas que busquem o conhecimento sobre materiais, tipos de perfis, arranjo entre os elementos e sistemas de ligação que possibilitem a construção de uma estrutura de cobertura que reúna vantagens como grandes vãos, leveza, beleza arquitetônica, baixo consumo de material, baixo custo e alta eficiência estrutural. A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, com o objetivo de apontar para a continuidade de pesquisas relacionada às treliças espaciais em geral e, especificamente relacionadas ao uso de perfil cantoneira nessas estruturas:

- Verificar a viabilidade técnica da produção de um nó de aço com perfil cantoneira;

- Estudar mais detalhadamente os meios de ligação que podem ser utilizados para perfil cantoneira;
- Análise experimental de estruturas espacial em aço, comparando o comportamento de perfis tubulares com perfis cantoneira de abas iguais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BANDEIRA, Adriana Almeida de Castro. **Análise do uso de estruturas de aço em edificações habitacionais de interesse social**. 2008. 109 f. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil (Ênfase: Avaliação e perícia)- Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em <<http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/Monografia%20Adriana%20Almeida%20de%20Castro.pdf>>. Acesso em 15 de Mai. de 2014.

BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios industriais em aço**: projeto e cálculo. 5ª ed. ver. e ampl., São Paulo, Pini, 2006.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil de Belém**: composição de custos. Belém, 2014. Disponível em: <http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/sinapi_relatorios_apartir_julho_2014/rel_ins_comp_pa/SINAPI_CustosReferencia_Insumos_PA_082014_NaoDesonerado.PDF>. Acesso em: 15 Set. 2014.

CHAMBERLAIN, Zacarias M.; FICANHA, Ricardo; FABEANE, Ricardo. **Projeto de cálculo de estruturas de aço**: edifício industrial detalhado. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013.

FREITAS, Cleirton André Silva de. **Análise teórico-experimental da conexão estampada de treliça espacial de aço sob carregamentos estático e cíclico**. 2008. 302 f. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2008. Disponível em <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCoQFjAC&url=http%3A%2F%2Frepositorio.unb.br%2Fbitstream%2F10482%2F5177%2F5%2F2008_CleirtonAndreSilvaFreitas.pdf&ei=ZU2rU6rMMa_LsATFsIGgAg&usg=AFQjCNG_Vfs8LxGtQ0M4TcLzvwaTAWXI8A&sig2=rUdTdSrNewfdvFbvLkzMZA&bvm=bv.69620078,d.b2k>. Acesso em 25 de Jun. 2014.

GABRIELLI, Tatianna Ventorim. **Análise do comportamento estrutural de torres de transmissão tubulares via simulação computacional**. 2004. 164 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 2004. Disponível em <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp102197.pdf>>. Acesso em 15 de Out. de 2014.

MAGALHÃES, João Ricardo Maia de; MALITE, Maximiliano. **Treliças metálicas espaciais**: alguns aspectos relativos ao projeto e à construção. In: cadernos de engenharia de estruturas, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de

Engenharia de Estruturas, Carlos/SP,1998. 32 p. Disponível em <http://periodicos.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee4.pdf>. Acesso em 15 de Mar. de 2014.

MAIOLA, Carlos Henrique. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais constituídas por barras com extremidades estampadas**. 1999.165 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 1999. Disponível em <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1999ME_CarlosHenriqueMaiola.pdf>. Acesso em 01 de Jul. 2014.

MAIOLA, Carlos Henrique; MALITE, Maximiliano. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais constituídas por barras com extremidades estampadas**. In: Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 20, p. 105-125, 2002, São Carlos/SP, 2002. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee20_105.pdf>. Acesso em 25 de Jun. de 2014.

PALMA, Giovano. **Estruturas metálicas**. Cascavel/PR, 2007. Disponível em: <<http://pontocad.com/wpcontent/uploads/2009/08/ESTRUTURASMET%C3%81LICAS.pdf>> . Acesso em: 12 Nov. 2014.

PILLAR, Rafaela Veiga. **Estudo de viabilidade de cobertura metálica com alternativas em perfis formados a frio, laminados abertos ou tubulares**. 2013. 92 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005674.pdf>> . Acesso em 12 de Out. 2014.

PORTALMETÁLICA. **Indicadores de preço – galpão e estruturas espaciais**. Copyright © 1999 - 2014 - PortalMet@lica. Disponível em <<http://www.metlica.com.br/cotacao-de-preco-galpoes-estruturas-espaciais>>. Acesso em 12 de Set. 2014.

PORTO, Cláudia Eestrela. **Estruturas Espaciais: estado da questão em 1950**. Cadernos Eletrônicos da Pós, FAU/UnB, 1999, 21 p. Disponível em <http://pt.slideshare.net/mackenzista2/estruturas-espaciais>>. Acesso em 20 de jan. 2014.

PORTO, Claudia Estrela. **Tipologias Arquitetônicas de Estruturas Espaciais em Brasília**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB, Brasília, 2002, 20p. Disponível em <<http://www.docomomo.org.br/seminario%205%20pdfs/036R.pdf>>acesso em 28 de Abr. 2014.

REVISTA ARQUITETURA E AÇO. Uma publicação do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), edição especial copa do mundo 2014, Rio de Janeiro/RJ,Jan. de 2010. Disponível em <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/copa2014/revista-aa-especial/revista-aa-especial.pdf>>. Acesso em 21 de Jul. 2014.

SAMPAIO, Taís Santos. **Análise numérica, via MEF, de ligações em treliças metálicas espaciais**. 2004. 280 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2004. Disponível em

<http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2004ME_TaisSantos.Sampaio.pdf>. Acesso em 28 de Abr. 2014.

SILVA, Kepler Cavalcante. **Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais**. 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 1999. Disponível em <http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/cp103017.pdf>. Acesso em 14 de Mai. de 2014.

SILVA, Mauro César de Brito e. **Estruturas de cobertura**. Departamento de Artes e Arquitetura, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em <[http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/3095/material/Estruturas%20de%20Cobertura%20\(2010-2\).pdf](http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/3095/material/Estruturas%20de%20Cobertura%20(2010-2).pdf)>. Acesso em 28 de Abr. 2014.

SOUZA, Alex Sander Clemente. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais**. 2003. 350 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2003. Disponível em <[file:///F:/Downloads/AlexSander%20\(1\).pdf](file:///F:/Downloads/AlexSander%20(1).pdf)>. Acesso em 28 de Abr. 2014.

SOUZA, Alex Sander Clemente. **Contribuição ao estudo das estruturas metálicas espaciais**. 1998. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 1998. Disponível em <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1998ME_AlexSanderClementedeSouza.pdf>. Acesso em 09 de jun. de 2014.

SOUZA, Alex Sander Clemente; GONÇALVES, Roberto Martins. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais**. In: Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 31, p. 31-61, São Carlos/SP, 2006. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee31_31.pdf>. Acesso em 15 de Mar. de 2014.

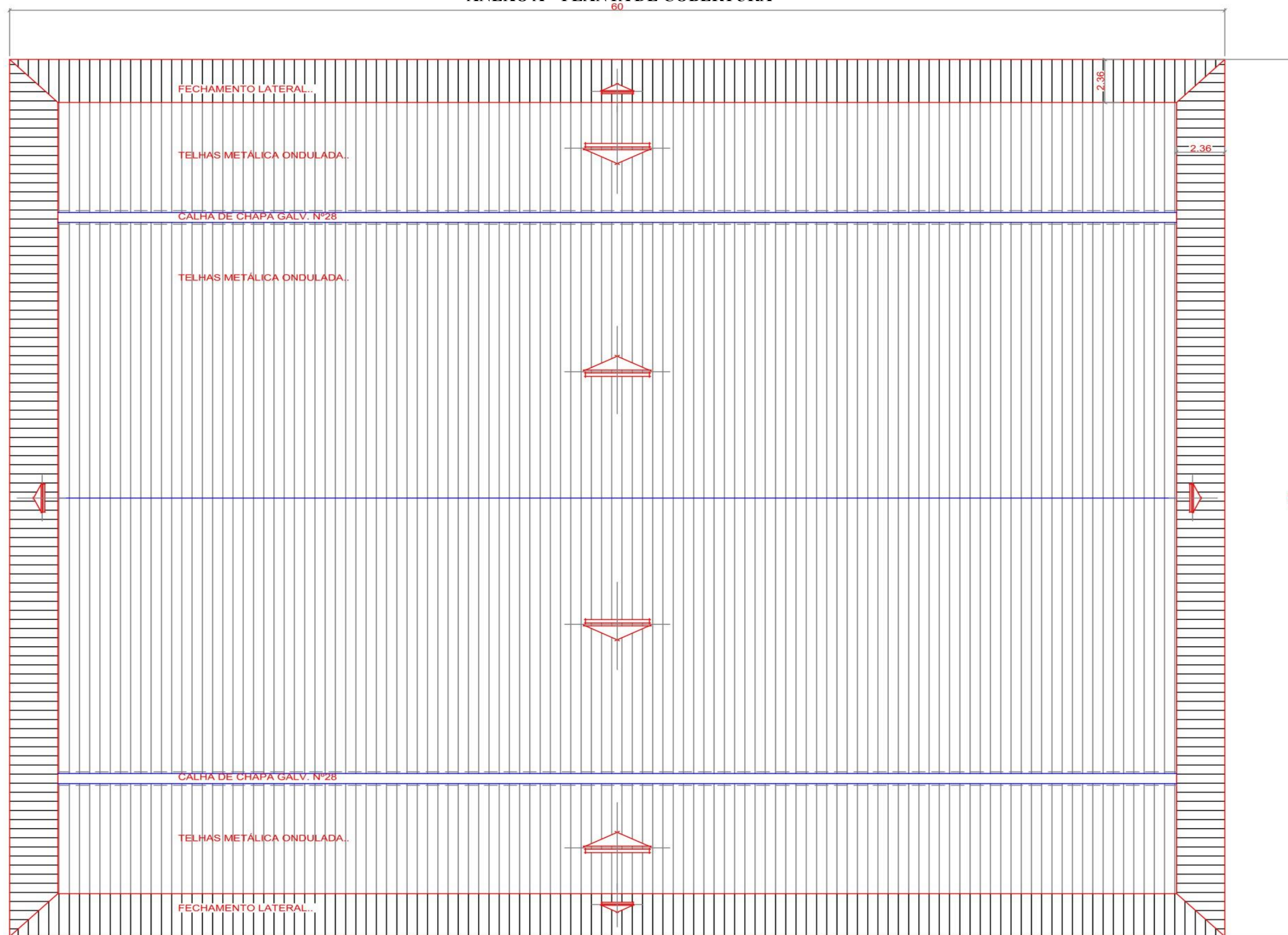
SOUZA, Alex Sander Clemente; GONÇALVES, Roberto Martins. **Treliças espaciais – aspectos gerais, comportamento estrutural e informações para projetos**. In: Revista construção metálica, artigo técnico, p. 21-25, [S.l], 2007. Disponível em <<http://www.abcem.com.br/revista-construcao-metalica/edicao81/RCM81.pdf>>. Acesso em 25 de Mar. de 2014.

SOUZA, Arnaldo Nascimento. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. 2002. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002. Disponível em <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2002ME_ArnaldoNascimentodeSouza.pdf>. Acesso em 30 de jun. 2014.

SOUZA, Arnaldo Nascimento; MALITE, Maximiliano. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. In: Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 7, n. 27, p. 27-58, São Carlos/SP, 2005. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee27_27.pdf>. Acesso em 28 de Abr. de 2014.

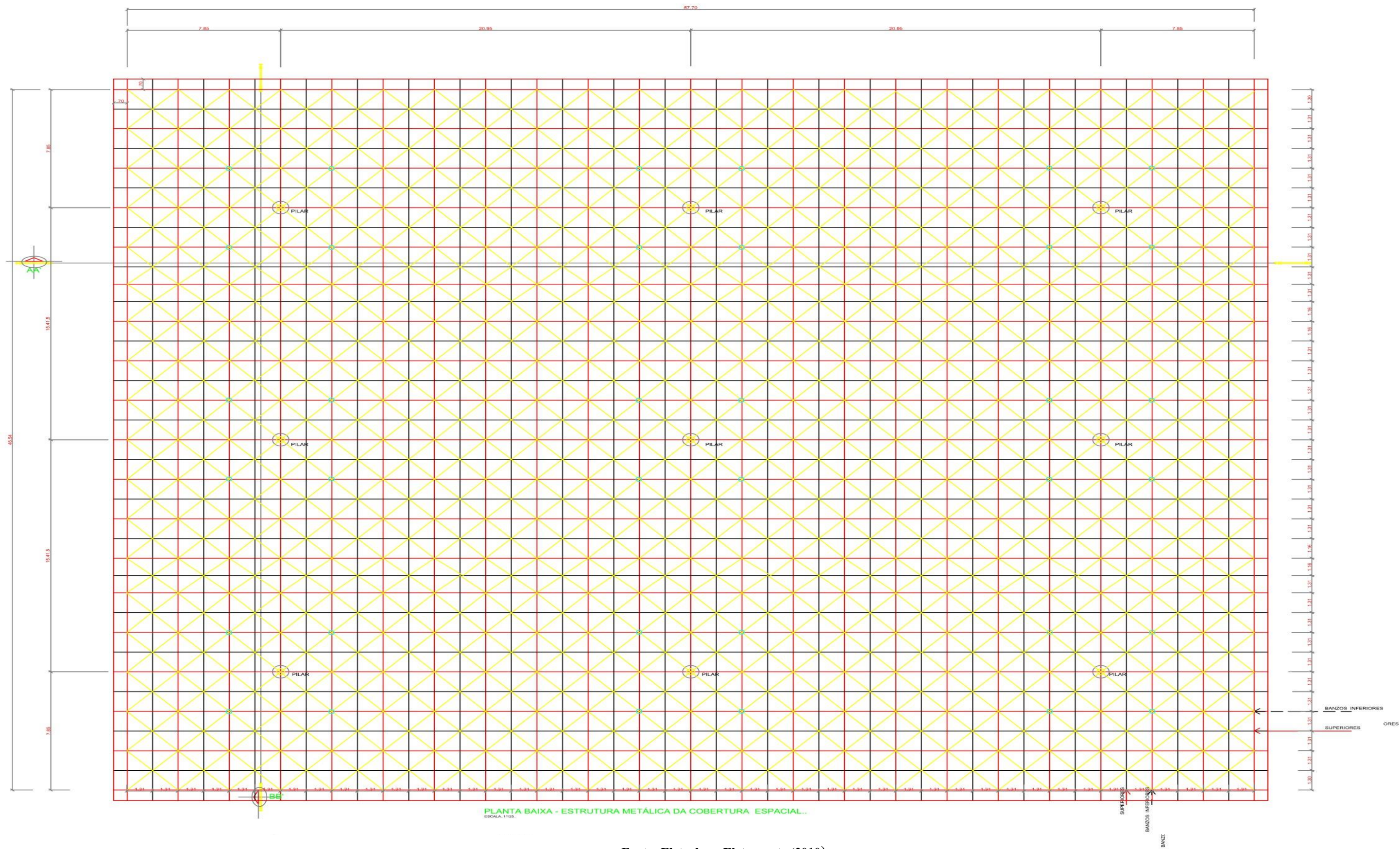
TCPO, Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos. 13ª ed., São Paulo, Pini, 2010.

ANEXO A – PLANTA DE COBERTURA



Fonte: Eletrobras Eletronorte (2010).

ANEXO B – PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA ESPACIAL



Fonte: Eletrobras Eletronorte (2010).

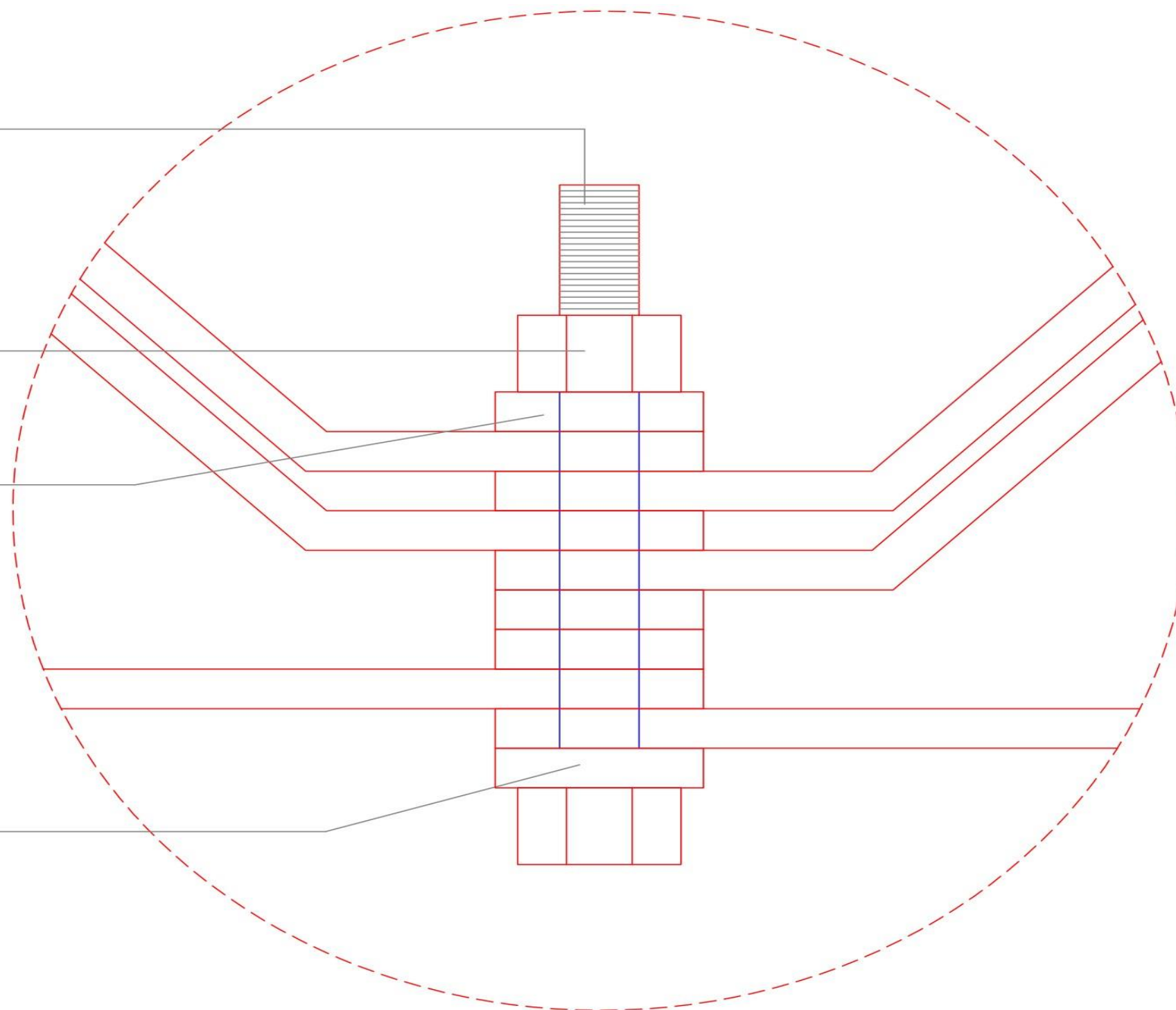
ANEXO D – DETALHE DO NÓ TÍPICO

PARAFUSO 3/4" X 3.1/2"

PORCA 3/4"

ARRUELA QUADRADA
70mmX70mmX6.0mm

ARRUELA QUADRADA
100mmX100mmX6.0mm



DETALHE
S/ESC.