

## INTRODUÇÃO

Em diversas partes do mundo, inúmeros projetos de escoramento de pontes, viadutos e obras de arte são realizados com sistemas espaciais treliçados que resistem e absorvem aos esforços de estruturas de aço e concreto armado executadas *in loco*. A possibilidade de vencer grandes vãos como: rios, viadutos e canteiros, com a não interrupção de tráfego de ruas e estradas, justificam e intensificam a necessidade desse tipo de construção. A Figura 1 ilustra o escoramento de um viaduto sem a interrupção do tráfego de veículos.



Figura 1– Viaduto sobre a Avenida dos Imigrantes - SP

Pode-se citar também a sistemática da execução de projetos complexos, onde o plano de operação de construção impõe o formato do escoramento. A utilização de sistemas espaciais treliçados amplia a área de vivência e canteiro, reduzindo a incidência de material no escoramento e proporcionando uma maior área de armazenamento e/ou trabalho na obra. Da Figura 2 a Figura 4 são ilustrados escoramentos de obras de arte em estruturas elevadas.

Esses exemplos demonstram que a utilização de estruturas como sistemas espaciais treliçados que vencem grandes vãos e absorvem elevados níveis de carregamento são de extrema importância para engenharia estrutural, assim como, a necessidade de se considerar nos projetos desse tipo de estrutura, os efeitos das

ponderações das ações, seja no estado limite ultimo (ELU) ou no estado limite de serviço (ELS).



Figura 2– Escoramento de obra de arte em estrutura elevada



Figura 3– Escoramento com treliça M-150

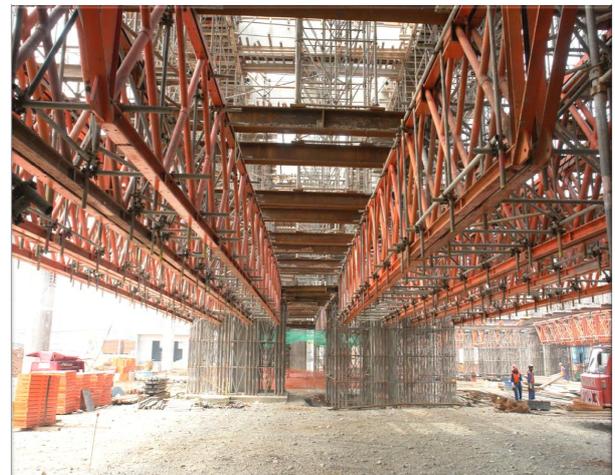


Figura 4– Obra de arte em estrutura elevada

No âmbito da construção civil, a utilização de estruturas treliçadas, planas e espaciais, para o escoramento de elementos estruturais permanentes ou provisórios vem sendo escolhida como opção cada vez mais difundida para aplicação na engenharia estrutural, diante da necessidade de desenvolvimento técnico e, ainda, objetivando a minimização dos custos e prazos. Este procedimento tem gerado sistemas estruturais com a capacidade de utilização em grandes vãos livres, elevada

capacidade de absorção dos carregamentos estáticos das estruturas escoradas, tão leves quanto às treliças convencionais, amparados pelos métodos de análise lineares e não lineares destes tipos de estruturas já bastante consolidados.

Além do critério economia, outros que influenciam decisivamente para a escolha do sistema treliçado como solução estrutural para escoramento dos elementos estruturais diz respeito à liberdade arquitetônica, pois permitem grandes vãos e, também, a simplificação na execução da obra, em termos de escoramentos, quando aplicado em sistemas estruturais de grande porte. Sua elevada capacidade de absorção de cargas deriva de configurações e dimensões cada vez mais complexas e eficientes, fazendo das estruturas treliçadas as mais econômicas em termos de materiais e custo global.

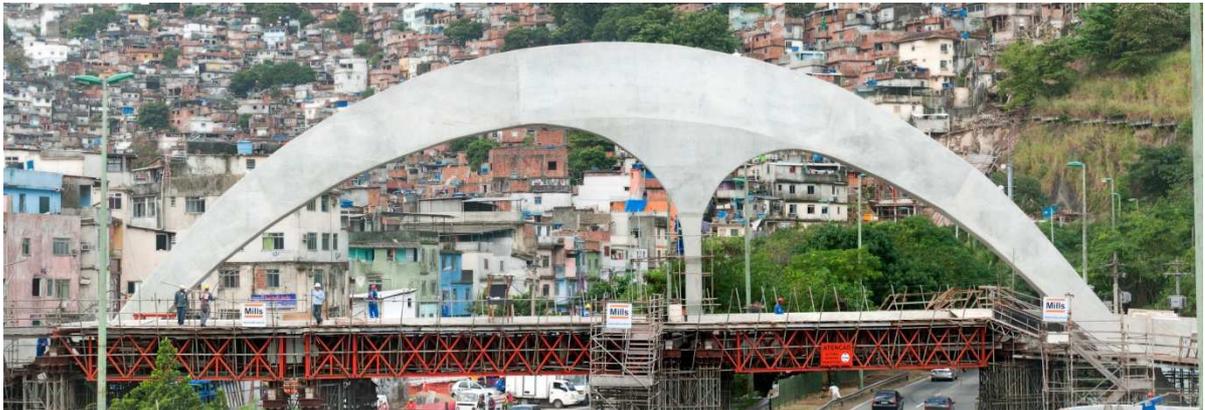


Figura 5– Escoramento de obra de arte da passarela da Rocinha



Figura 6– Escoramento de obra de arte da ponte do Saber - RJ

O uso de sistemas treliçados espaciais como a M-150 em estruturas de grande complexidade, tais como pontes, viadutos e mesmo em estruturas de grande complexidade arquitetônica, tem exigido o uso intensivo de computadores e técnicas de modelagem numérica. Uma análise adequada de sistemas em treliças espaciais somente pode ser feita levando-se em consideração as não linearidades físicas e geométricas envolvidas no sistema estrutural.

Apesar das vantagens acima apresentadas, como em qualquer outra escolha de sistema construtivo, alguns cuidados devem ser tomados para que o sistema treliçado apresente um comportamento adequado. Deste modo, este trabalho de pesquisa objetiva apresentar um estudo do comportamento estrutural de sistemas treliçados, a partir do desenvolvimento de modelos numérico-computacionais que simulem o comportamento real destes sistemas da forma mais real possível, de forma que estes modelos estruturais sejam utilizados no mercado de forma mais racional e eficiente.

Neste trabalho de pesquisa são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS [1]. Os resultados obtidos ao longo desta investigação (deslocamentos, esforços e tensões) são confrontados e comparados qualitativamente e quantitativamente, com os métodos usuais na prática corrente de projeto, de forma a obter resultados numéricos mais próximos do comportamento real desse tipo de sistema estrutural.

## **Estado da Arte**

Na sequência, são apresentados resumos de trabalhos de pesquisa realizados ao longo dos anos, sobre o assunto em estudo, ilustrando o desenvolvimento e a realização de temas para projetos baseados em análises do comportamento real de estruturas constituídas de sistemas espaciais treliçados com base em análises lineares e não lineares.

Devido à geometria modular do objeto em estudo, o aspecto de empregabilidade dos modelos estudados podem variar tanto no comprimento do vão livre, quanto no enrijecimento da seção resistente com a adição de novas linhas e ou configuração adequada para resistir aos esforços variados.

A estrutura treliçada oferece soluções seguras e recomendadas para vencer os escoramentos de grandes vãos livres e carregamentos elevados, sendo eficaz em leito de rios, passarelas de pedestres, passagem e acessos de viaturas, suporte de grandes vigas travessas, aduelas de pontes e viadutos. Sua utilização não se restringe ao escoramento do sistema estrutural envolvido, mas também à segurança e a crescente necessidade de diminuição dos espaços hoje empregados nos canteiros de obra. Sua utilização em um elemento estrutural de altura elevada permite a liberação da área diretamente abaixo, garantindo segurança aos envolvidos na operação de construção, ganhos de área útil para armazenamento sem desprivilegiar o objetivo principal do instrumento, o escoramento da estrutura envolvida.

Ainda podem ser citados outros aspectos como facilidade de transporte, armazenamento, resistência e baixo peso. A divisão em módulos do sistema estudado proporciona a possibilidade do emprego de contra flecha através de cunhas com dimensões variadas, controlando assim, a deformação da estrutura envolvida, mitigando os efeitos de fluência ou deformação lenta, que podem causar danos à armadura da estrutura em ambiente extremamente agressivo.

A fragilidade encontra-se em pontos críticos de projeto de execução na obra. Com base na necessidade do emprego de respostas rápidas em relação ao crescente e dinâmico mercado da construção civil, os projetistas vêem-se forçados a conferir configurações e dimensionamentos das modulações, baseados em critérios simplificados como de uma viga simples sem ponderação dos carregamentos envolvidos e elevado fator de segurança, restringindo assim, o critério de dimensionamento econômico. A execução de montagem dos módulos contribui para a fragilidade do conjunto, assemelhando a falha humana na execução a um acréscimo da necessidade de fatores de segurança.

Os critérios de verificação e definição dos carregamentos impostos à estrutura treliçada no mercado, não contempla ponderações das ações seja no estado limite ultimo (ELU) ou no estado limite de serviço (ELS), corroborado com a necessidade de verificações e confronto com as normas de projeto, NBR 8800 [2], no que tange a ponderação dos carregamentos permanentes e variáveis.

Segundo Duchateau [7], as primeiras aplicações de treliças espaciais segundo os conceitos atuais foram realizadas por Alexandre Graham Bell, em 1907, que desenvolveu sistemas estruturais reticulados formados por barras de aço totalmente pré-fabricadas, vislumbrando desde então a possibilidade da industrialização da construção, sobretudo de treliças metálicas espaciais.

Ary [8], formalizou estudos ligados às técnicas de projeto e execução, formatando treinamentos ligados a análises lineares, atribuindo normas e procedimentos para o dimensionamento dos módulos em projeto e a sistemática na execução da montagem da estrutura treliçada.

Vendrame [9], apresenta um estudo sobre as estruturas espaciais em forma de cúpulas abordando os seguintes aspectos: histórico, desenvolvimento, descrição dos tipos mais utilizados, comportamento, análise e alguns aspectos de projeto e execução. Descrevem-se vários sistemas de ligação utilizados em vários países e os utilizados no Brasil. A influência da variação de inércia causada pela estampagem das barras foi estudada via método dos elementos finitos com a devida modelagem da região afetada. Apresentam-se também, os procedimentos básicos para elaboração do projeto de uma cúpula considerando as hipóteses utilizadas nos escritório de projeto, ou seja, comportamento elástico linear e nós rotulados. Para a mesma estrutura, um breve estudo sobre ruína progressiva é apresentado.

Souza [10], apresenta um estudo sobre o comportamento de treliças espaciais formadas por elementos tubulares de seção circular, com ênfase no desempenho das tipologias de ligação utilizadas no Brasil. A análise teórica, via método dos elementos finitos, tem como objetivo aferir a validade dos modelos numéricos normalmente utilizados e refiná-los incluindo as características do comportamento estrutural observadas em ensaio. A análise numérica considera duas abordagens: análise global da estrutura incluindo os efeitos não lineares, excentricidade na ligação e variação de seção nas extremidades das barras; com isso o comportamento das treliças ensaiadas foi representado de forma satisfatória e a análise do comportamento do nó típico, modelado tridimensionalmente com elementos de casca, possibilitou analisar a interação entre as barras na região nodal por meio de elementos de contato.

Sapienza [11], apresenta a influência das extremidades amassadas e dobradas das barras que compõem uma treliça espacial, cujo emprego tem-se tornando cada vez mais comum. Sendo, na maioria das vezes, calculadas como

uma treliça ideal, com seção constante em toda a extensão das barras, desprezando as excentricidades com que as barras chegam aos nós e sendo estes considerados como articulações perfeitas sem se levar em conta o engastamento da montagem das barras. Tanto nas treliças planas como nas espaciais, a análise das estruturas é feita com as considerações de não linearidade geométrica (grandes deformações) e material elasto-plástico. Finalmente, este modelo é aplicado na análise de uma estrutura ensaiada no Laboratório de Estruturas da USP de São Carlos onde se faz a comparação entre o resultados experimental e teórico.

Santos [12], descreveu em sua dissertação de mestrado em 2003, o comportamento das ligações tubulares de estruturas metálicas planas e o respectivo dimensionamento das mesmas sob algumas das normas para estruturas metálicas como o Eurocode 3 [6]. Foram avaliadas ligações entre perfis tubulares de várias geometrias (circulares, retangulares e quadradas) sob diversas interações. Além disso, alguns exemplos numéricos foram resolvidos com o objetivo de se comprovar os métodos avaliados juntamente com o desenvolvimento de um programa computacional que realiza e verifica o dimensionamento de ligações de perfis tubulares a fim de facilitar as diversas análises necessárias para o seu cálculo.

Paoli [13], observando a necessidade de aplicação imediata em situações de intervenção da Defesa Civil, apresenta artigo que demonstra o emprego de pontes provisórias com geometria treliçada. Através de tabelas de classes é possível determinar a melhor configuração básica para a montagem da estrutura treliçada, que garanta a legitimidade da passagem de viaturas e veículos em trânsito pelo local.

Bezerra, Freitas e Nagato [14], estudaram o aumento da capacidade de carga de treliças de aço com conexão de ponta achatada, apresentando as vantagens de conexão e desvantagens com a redução de rigidez. Através de modelos numéricos e ensaios experimentais correções de excentricidades são avaliados chegando a conclusões sobre os colapsos locais e globais, associados aos estados limites ultimo e o estado limite de serviço.

Lima [15], demonstra a utilização de perfis tubulares sem costura, considerando uma nova realidade com o incremento do uso de perfis tubulares. Este trabalho apresenta uma análise de ligações tipo “T” e “KT”, efetuada com base na norma europeia, Eurocode 3 [6] através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys. As não linearidades físicas e geométricas foram

incorporadas aos modelos. Procedeu-se também no estudo de uma treliça com o intuito de comparar o dimensionamento e comportamento de um de seus nós com o nó isolado que foi avaliado de acordo com as prescrições de normas e com o critério de deformação limite. Para isso modelou-se a treliça com elementos de barra, e posteriormente com elementos de casca fazendo análise linear e não linear.

Fruchtengarten [16], estudou o valor do momento crítico de vigas de aço em regime elástico-linear para diversos casos de carregamento e de vinculação, por meio de uma teoria não linear geometricamente exata. Estes resultados são comparados aos obtidos com o emprego de expressões baseadas em teorias aproximadas, em particular as normas de projeto do Brasil e Europa. Com o emprego do programa de elementos finitos, realiza-se, para vigas tipo I bissimétricas, uma análise paramétrica que incorpora a faixa usual de utilização destas vigas em projetos usuais de edifícios.

Silveira e Pinheiro [17], estudaram a estabilidade de treliças espaciais através da utilização de uma formulação elástica não linear, baseada no método dos elementos finitos, que leva em consideração os efeitos de segunda ordem e a mudança de geometria da estrutura. Isto é feito no cálculo da matriz de rigidez, onde tais efeitos são levados em consideração, e na obtenção do vetor de forças internas do elemento. A partir daí, foi realizada uma implementação computacional para que a análise do comportamento de treliças espaciais fosse possível. Ao final do artigo, através da análise de problemas estruturais encontrados, verifica-se a eficácia tanto da formulação empregada quanto da implementação computacional realizada.

Chen e Wang [18], examinam o desempenho cíclico das articulações CHS utilizados em estruturas metálicas tubulares, os resultados mais relevantes (modos de falha e curvas carga-deformação) são apresentados para avaliar o desempenho sísmico de juntas tubulares, incluindo ductilidade, resistência e dissipação de energia, são sinteticamente analisados e comparados.

Alinia e Kashizadeh [19], realizaram um estudo sobre a influência do tipo de condições de apoio sobre o comportamento térmico de treliças espaciais, este trabalho estuda os efeitos das flexibilidades de apoio sobre o comportamento de tais estruturas submetidas a gradiente e cargas parciais. Concluindo que a utilização de suportes rígidos devem ser cuidadosamente examinados.

## **Motivação**

No atual estado de desenvolvimento da engenharia estrutural, procura-se obter projetos que atendam às especificações do cliente e as normas técnicas, mas também, que proporcione menores custos. Desta forma, uma das maneiras de se avaliar uma estrutura é obter informações corretas da sua geometria e ligações, porque desempenham um papel extremamente importante para a análise global da estrutura. Destaca-se que poucos trabalhos de pesquisa têm sido realizados no tema de escoramentos. Assim sendo, a principal motivação desta dissertação tem caráter científico, com o objetivo de buscar soluções mais econômicas, métodos alternativos para análise estrutural e conhecimento dos regimes de utilização do equipamento.

## **Objetivos**

O objetivo deste estudo é implementar uma metodologia de análise linear e não linear de estruturas espaciais treliçadas utilizadas para escoramentos de estruturas de aço, concreto e mistas, por meio do emprego de técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos com a utilização do programa ANSYS [1]. Os resultados obtidos ao longo do estudo serão comparados com aqueles fornecidos por critérios de normas de projeto [2]-[6] e as técnicas NBR e EUROCODE empregadas nas práticas de projeto.

As análises contemplam uma avaliação crítica, qualitativa e quantitativa sobre a resposta estrutural do sistema composto pela treliça M-150. Seus carregamentos são os mais realistas e desenvolvidos para incorporar os efeitos impostos, induzidos pelo escoramento de estruturas de aço, concreto e mistas durante a investigação da resposta linear e não linear.

Este trabalho foi dividido em duas fases distintas. Em uma primeira etapa foram realizadas análises do comportamento linear para diversos projetos de estruturas treliçadas, e em uma segunda etapa efetuou-se um estudo não linear para o mesmo quantitativo de projetos de estruturas treliçadas, com acréscimo de modelos com contraventamento diagonal em tubos.

## **Estrutura da dissertação**

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos e uma breve descrição do conteúdo do presente trabalho.

No capítulo um são apresentadas algumas considerações sobre aspectos de projeto e recomendações e uma descrição detalhada do dimensionamento das estruturas segundo recomendações da ABNT NBR 8800 [2] e o EUROCODE 3 [6].

No capítulo dois são apresentados os modelos estruturais investigados, em uma descrição detalhada da configuração geométrica global da estrutura.

No capítulo três faz-se uma análise da malha de elementos finitos que será utilizada na presente dissertação, apresentando todos os elementos utilizados no modelo numérico.

No capítulo quatro são apresentadas análises dos modelos estruturais através dos autovalores, frequências naturais do sistema estrutural, e autovetores, modos de vibração, apresentados.

No capítulo cinco são analisados os modelos numéricos com base no regime linear elástico, confrontados com as normas vigentes de mercado. Os sistemas estudados neste capítulo descrevem estruturas bi-apoiadas, com carregamento distribuído e análises de deslocamentos e esforços no meio do vão.

O capítulo seis apresenta uma descrição das características dos modelos de elementos finitos utilizados, com base na análise não linear. Os sistemas estudados descrevem estruturas bi-apoiadas, com carregamento concentrado no meio do vão, comparando-se os resultados do regime elástico ao dimensionamento simplificado e projeto e avaliando regime de escoamento do material.

No capítulo sete é apresentada uma análise paramétrica do estudo de caso com o objetivo de importar a utilização do modelo simplificado de projeto para a formação utilizada nos modelos numéricos.

Finalmente, no capítulo oito são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

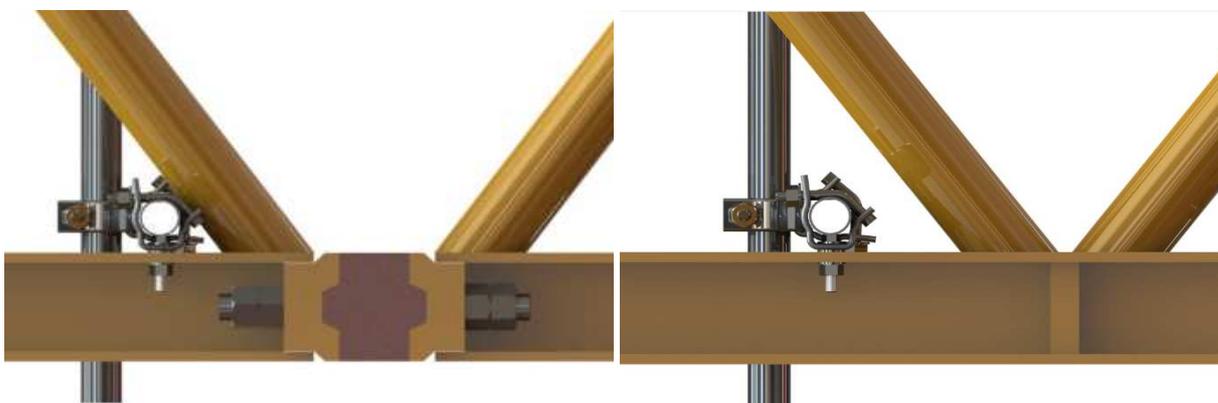
## 1 ASPECTOS DE PROJETO E SITUAÇÃO DO ASSUNTO

A geometria modular parametrizada da treliça M-150, permite grandes variações no que diz respeito a empregabilidade deste sistema de escoramento. Variações no comprimento do vão livre, no enrijecimento da seção resistente com a adição de novas linhas e ou configuração adequada para resistir aos esforços variados podem ser feitos sem dificuldades.

O sistema estrutural estudado restringe-se a utilização mínima de duas linhas de treliças paralelas, contraventadas entre si através de tubos de aço. Para isso o equipamento possui furação adequada para receber os parafusos de fixação das linhas de treliças através de braçadeiras, conforme ilustrado na Figura 7.



a) Vista tridimensional da montagem da treliça



b) Detalhe da ligação aparafusada com cunha

c) Detalhe da ligação do contraventamento

Figura 7– Configuração da montagem da treliça.

A ligação nos banzos inferiores é montada sempre na configuração tracionada com um conjunto de parafusos, porcas e contra porcas. Entre os módulos é posicionada uma cunha com geometria de encaixe angular, que proporciona a possibilidade de contra flecha ao longo do comprimento longitudinal da treliça, controlando assim, a deformação da estrutura envolvida.

No estudo do contraventamento das treliças é verificada a necessidade do travamento nos três planos da estrutura, garantindo o perfeito alinhamento entre as treliças, conforme exemplificado na Figura 9.

A fragilidade do sistema encontra-se em pontos críticos de projeto e execução. De acordo com a necessidade do emprego de respostas rápidas ao crescente e dinâmico mercado da construção civil, os projetistas vêem-se forçados a conferir configurações e dimensionamentos das modulações, baseado em critérios simplificados como de uma viga bi-apoiada simples, restringindo assim, o critério de dimensionamento econômico. A execução de montagem dos módulos contribui para a fragilidade do conjunto, assemelhando a falha humana na execução a um acréscimo da necessidade de fatores de segurança.

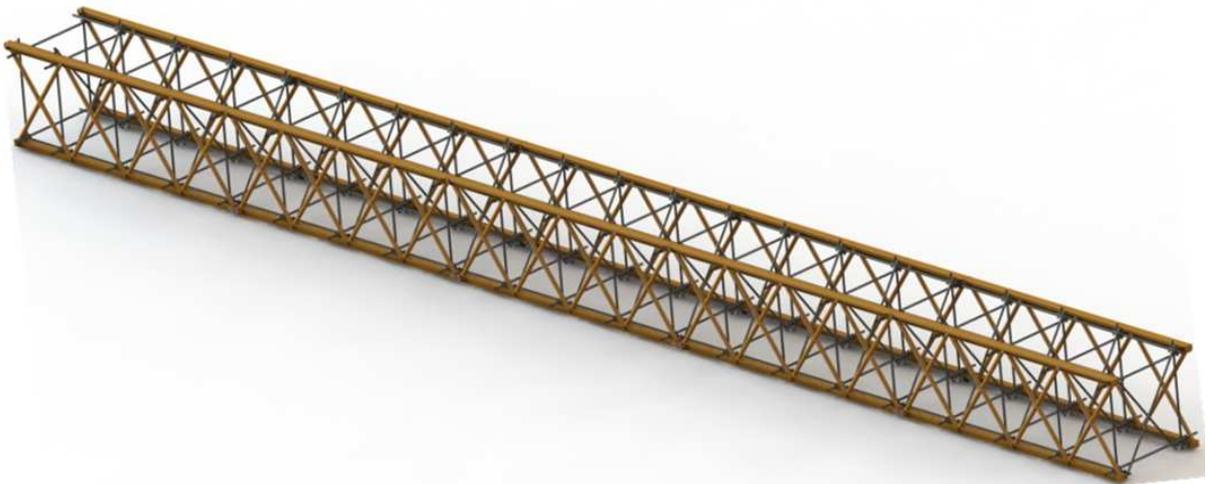
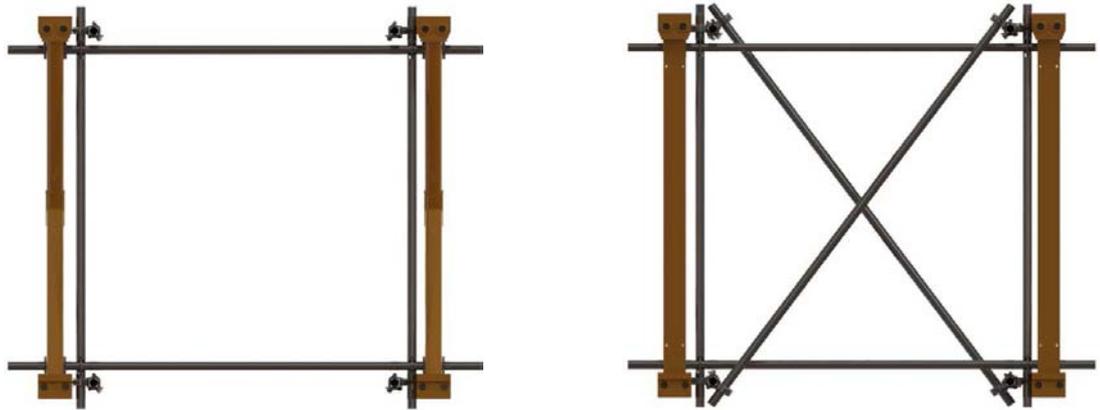


Figura 8– Vista tridimensional da estrutura montada (Modelo - IX)



a) Vista transversal dos Modelos I a VIII

b) Vista transversal dos Modelos IX a XII

Figura 9– Configuração dos modelos apresentados

### 1.1 Recomendações de Projeto

A maioria das normas de aço estrutural é baseada no método dos estados limites. O dito estado limite para a estrutura ocorre quando o material não atende às necessidades requeridas pelas solicitações de projeto. Os estados limites são classificados entre: estados limites últimos e estados limites de serviço.

Os estados limites últimos referem-se à perda de equilíbrio da estrutura ou parte da mesma, considerando-a como um corpo rígido ou até mesmo pela perda de equilíbrio da estrutura devido à instabilidade, fadiga ou outras deformações causadas como excessivas deformações.

Os estados limites de serviço correspondem ao estado de perda da estrutura exigido para suas necessidades básicas. Tais necessidades podem ser exemplificadas pelas deformações ou deflexões excessivas e pelas vibrações que podem causar o chamado desconforto humano.

Os membros das estruturas tubulares podem ser dimensionados para diversos tipos de carregamentos que são: compressão ou tração axial, flexão ou carregamentos combinados (compressão e flexão). As estruturas tubulares de treliças são preferencialmente dimensionadas de forma que apenas solicitações em compressão axial sejam consideradas, o dimensionamento dos membros da estrutura deve atender a seguinte condição básica:

$$N_d \leq N_{b,Rd} \quad (1)$$

Onde:

$N_d$  corresponde a força solicitante;

$N_{b,Rd}$  corresponde a força resistente do elemento estrutural;

### 1.1.1.1 Recomendações de projeto ABNT NBR 8800 [2]

#### 1.1.1.1.1 Resistência à tração do elemento estrutural:

$$N_{t,rd} = \frac{(A_g f_y)}{\gamma_{a1}} \quad (2)$$

$$N_{t,rd} = \frac{(A_e f_u)}{\gamma_{a2}} \quad (3)$$

Onde:

$N_{t,rd}$  é a força normal de tração de projeto para escoamento ou ruptura da seção líquida;

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra;

$A_e$  é a área líquida efetiva da seção transversal da barra;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$f_u$  é a resistência a ruptura do aço;

$\gamma_{a1}$  e  $\gamma_{a2}$  são coeficientes de ponderação ( $\gamma_{a1} = 1,10$  e  $\gamma_{a2} = 1,35$ ).

Para obtenção da área líquida efetiva da seção transversal da barra basta aplicar a seguinte equação:

$$A_e = C_t A_n \quad (4)$$

Onde:

$A_n$  é a área líquida da barra;

$C_t$  é um coeficiente de redução da área líquida ;

### 1.1.1.2 Resistência à compressão do elemento estrutural:

Diferentemente do cálculo da resistência à tração, a resistência à compressão de um perfil tubular é dada pela Equação (5), diferenciando-se do cálculo de resistência à tração pelos coeficientes do fenômeno da flambagem:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

Onde:

$\chi$  representa o fator de redução relativo às curvas de flambagem que dependem do valor do índice de esbeltez  $\lambda_0$  dado pela Equação (8) e  $\gamma_{a1}$  é coeficiente de resistência, tomado igual a 1,10.

Q representa o fator de redução total associado à flambagem local, cujo valor deve ser obtido no Anexo F da norma [2] e  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica, obtida conforme Anexo E [2].

O fator de redução  $\chi$  é obtido através da Equação (6) e Equação (7) onde  $\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido, dado pela equação (8);

$$\rightarrow \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (6)$$

$$\rightarrow \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

O cálculo de  $\lambda_0$  é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (8)$$

### 1.1.2 Recomendações de projeto Eurocode 3 [6]

#### 1.1.2.1 Resistência à tração do elemento estrutural:

$$N_{pl,rd} = \frac{(A_g f_y)}{\gamma_{M0}} \quad (9)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(0,9A_{net} f_u)}{\gamma_{M2}} \quad (10)$$

Onde:

$N_{pl,rd}$  é a força de plastificação de projeto e  $N_{u,rd}$  é a força de ruptura da área líquida;

$A_g$  é a menor área bruta da seção transversal da barra;

$A_{net}$  é a área líquida da seção transversal da barra;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$f_u$  é a resistência a ruptura do aço;

$\gamma_{M0}$  e  $\gamma_{M2}$  são coeficientes de ponderação ( $\gamma_{M0} = 1,10$  e  $\gamma_{M2} = 1,25$ ).

Para obtenção da área líquida da seção transversal da seção basta aplicar a seguinte equação:

$$A_{net} = A_g - n d t \quad (11)$$

Onde:

$A_{net}$  é a área líquida;

$n$  é quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;

$d$  é o diâmetro do furo na direção perpendicular à solicitação;

$t$  é a espessura da parte conectada em análise;

### 1.1.2.2 Resistência à compressão do elemento estrutural:

Diferentemente do cálculo da resistência à tração, a resistência à compressão de um perfil tubular é dada pela Equação (12), diferenciando-se do cálculo de resistência à tração por um único coeficiente devido ao fenômeno da flambagem:

$$N_{b,rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (12)$$

Onde:

$\chi$  representa o fator de redução relativo às curvas de flambagem que dependem do valor adimensional  $\lambda_0$  dado pela Equação (15) e  $\gamma_{M1}$  é coeficiente parcial de segurança, tomado igual a 1,10.

O fator de redução  $\chi$  é obtido através da Equação (13) sendo o parâmetro  $\phi$  dado pela Equação (14), onde  $\alpha$  é um fator de imperfeição generalizado que toma os valores da Tabela 1, de acordo com a curva de flambagens pertinente. Para perfis tubulares, dependendo do eixo de flexão podem ser usados as curvas  $a_0$ ,  $a$  e  $c$ ;

Tabela 1– Fator de imperfeição

$a_0$	$a$	$b$	$c$	$d$
0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^{-2}}} \quad (13)$$

$$\phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^{-2} \right] \quad (14)$$

O cálculo de  $\lambda$  é dado por:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{CR}}} \quad (15)$$

Onde:

NCB é a resistência crítica de flambagem elástica de Euler.

$\lambda$  é o índice de esbeltez do perfil que é dada pela Equação (16), em que  $L_b$  é o comprimento efetivo do membro e  $i$  é o raio de giração da seção transversal do perfil. O fator  $\lambda_E$  é o chamado índice de esbeltez “Euleriano” do aço considerado que é dado pela Equação (17), onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade do aço.

$$\lambda = \frac{L_b}{i} \quad (16)$$

$$\lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (17)$$

Neste capítulo foram apresentados os aspectos de utilização e montagem, com as recomendações de projeto embasadas pelas normas vigentes.

No capítulo a seguir serão apresentadas as descrições dos modelos adotados no presente estudo e suas respectivas características dimensionais, baseadas nas características apresentadas no presente capítulo.

## 2 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

### 2.1 Introdução

Os modelos estruturais investigados neste trabalho de pesquisa consistem de sistemas treliçados em aço. Os comprimentos longitudinais podem variar nas duas configurações descritas como: 30 metros onde os modelos não possuem postes de união das periferias de apoio ou 30,3 metros de comprimento, onde os modelos investigados apresentam na sua configuração os postes de união nas periferias de apoio, de acordo com o apresentado da Figura 10 a Figura 13.

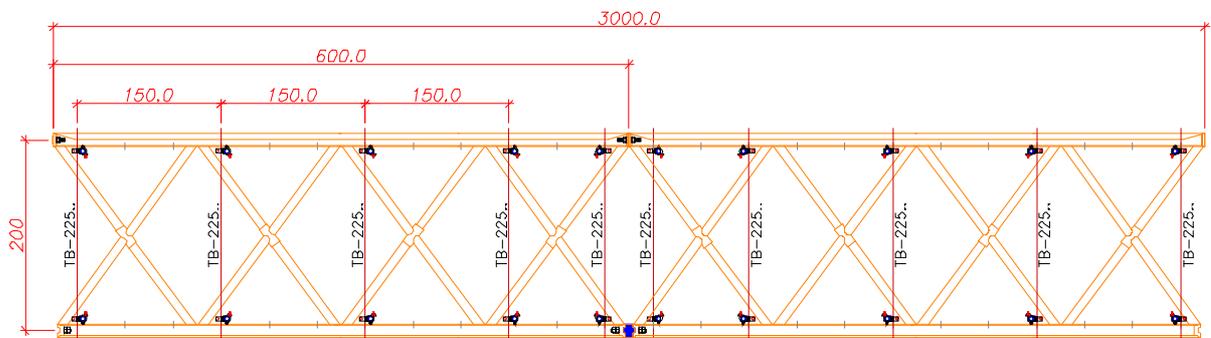
Independente do modelo proposto para análise, sua montagem e modulação é composta por módulos menores de 6 metros, ligados entre si através de parafusos de ligação nos seus banzos superiores e inferiores. Estes parafusos são denominados como prisioneiros e garantem a fixação dos módulos na direção longitudinal, ajudando a conformar um sistema treliçado espacial de escoramento.

A geometria do sistema estrutural estudado é formada por perfis soldados nos banzos, diagonais tubulares reforçadas, tubos para contraventamento transversal e os prisioneiros, conforme ilustrado da Figura 10 a Figura 13. No âmbito desta investigação, objetiva-se estudar o comportamento estrutural de inúmeros modelos representativos do sistema de escoramento, onde objetiva-se o confrontamento de modelos que possuam diferenças de concepção de montagem tais como: a mudança do sistema de apoio, travamento horizontal e vertical.

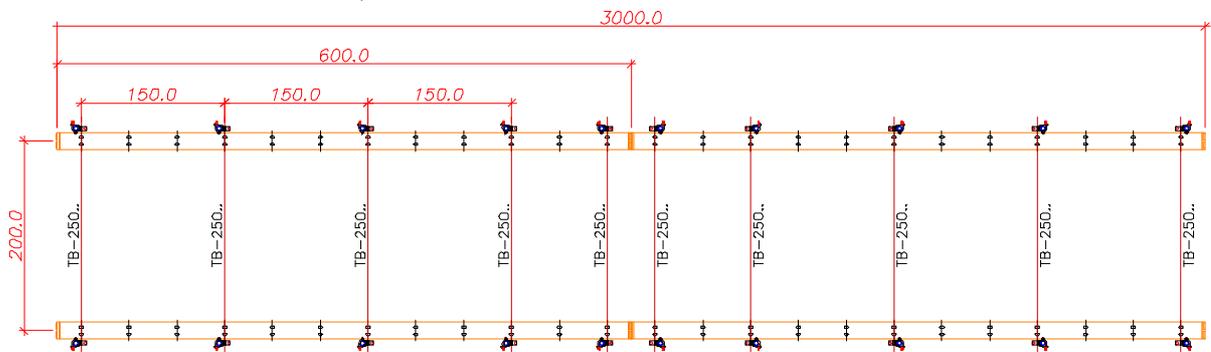
Para isso são apresentados os modelos estruturais investigados de projeto.

## 2.2 Modelos Estruturais Investigados

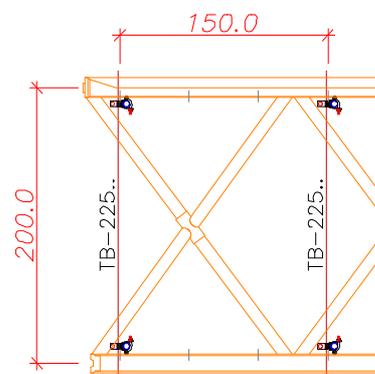
Modelos – I,V e IX: Estes modelos apresentam duas linhas de treliças paralelas a 2 metros com 5 módulos intermediários de 6 m em cada linha, sistema de apoio na base da periferia do conjunto, sem poste de união dos banzos, e contraventamento horizontal em tubos a cada 1,5 metros. O diferencial entre os modelos apresentados é que o modelo I apresenta o contraventamento horizontal rígido, assim como no modelo IX e o modelo V apresenta uma ligação rotulada. O modelo IX difere-se dos demais com o acréscimo do contraventamento na diagonal a cada 1,5 metros.



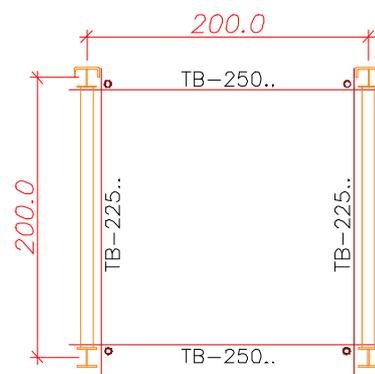
a) Vista lateral do modelo estrutural I, V e IX



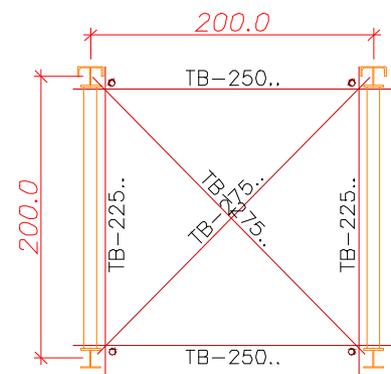
b) Vista superior do modelo estrutural I, V e IX



c) Detalhe do apoio nos modelos estruturais



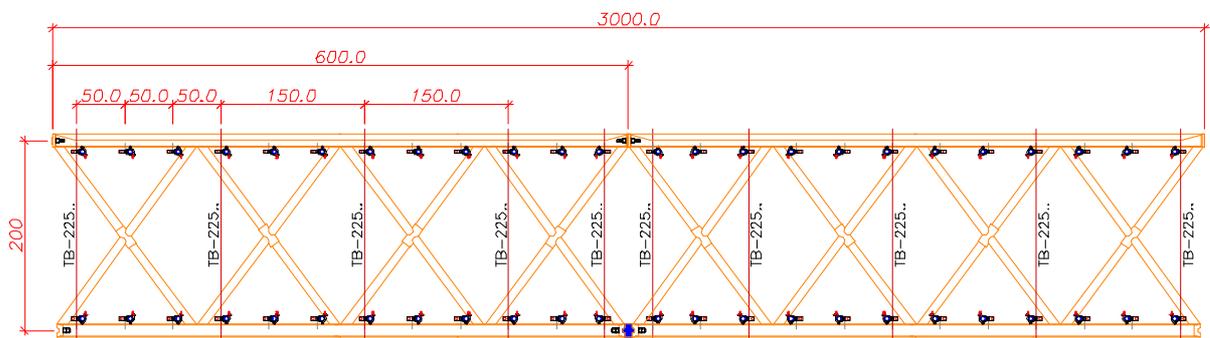
d) Vista frontal dos modelos estruturais I e V



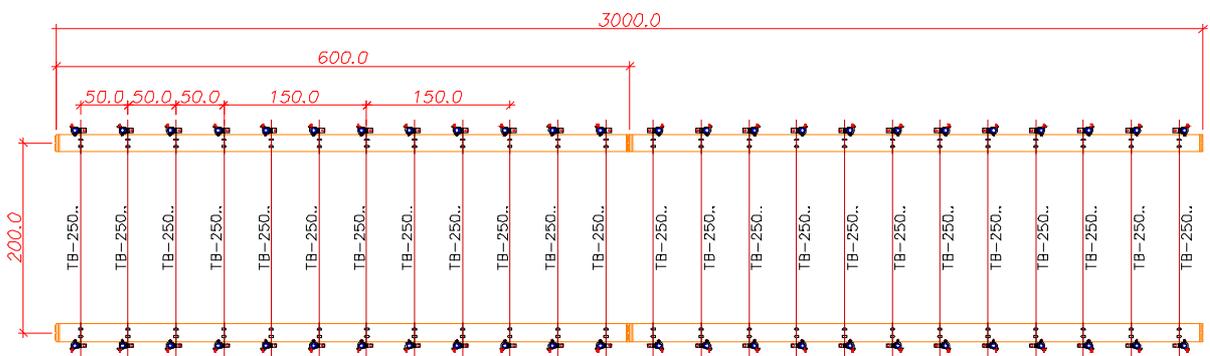
d) Vista frontal do modelo estrutural IX

Figura 10– Configuração dos modelos estruturais I, V e IX

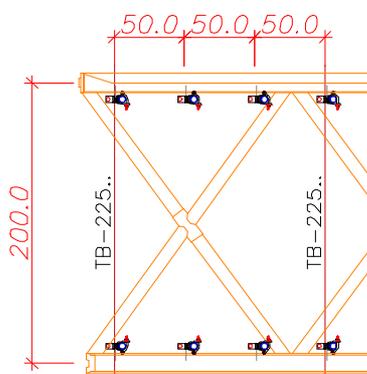
Modelos – II,VI e X: Estes modelos apresentam duas linhas de treliças paralelas a 2 metros com 5 módulos intermediários de 6 m em cada linha, sistema de apoio na base da periferia do conjunto, sem poste de união dos banzos, e contraventamento horizontal em tubos a cada 0,5 metros. O diferencial entre os modelos apresentados é que o modelo II apresenta o contraventamento horizontal rígido, assim como no modelo X e o modelo VI apresenta uma ligação rotulada. O modelo IX difere-se dos demais com o acréscimo do contraventamento na diagonal a cada 1,5 metros.



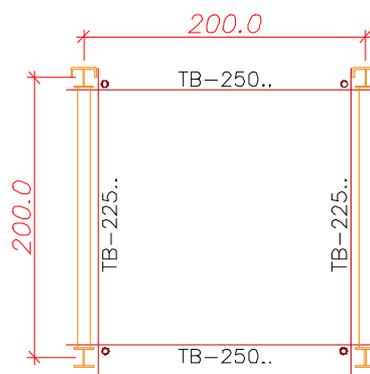
a) Vista lateral do modelo estrutural II,VI e X



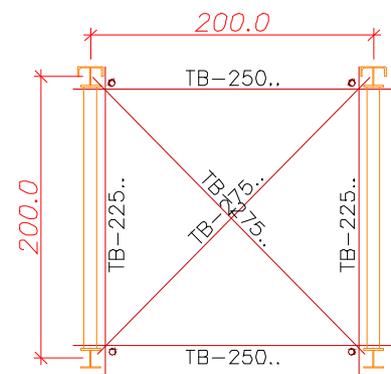
b) Vista superior do modelo estrutural II,VI e X



c) Detalhe do apoio nos modelos estruturais



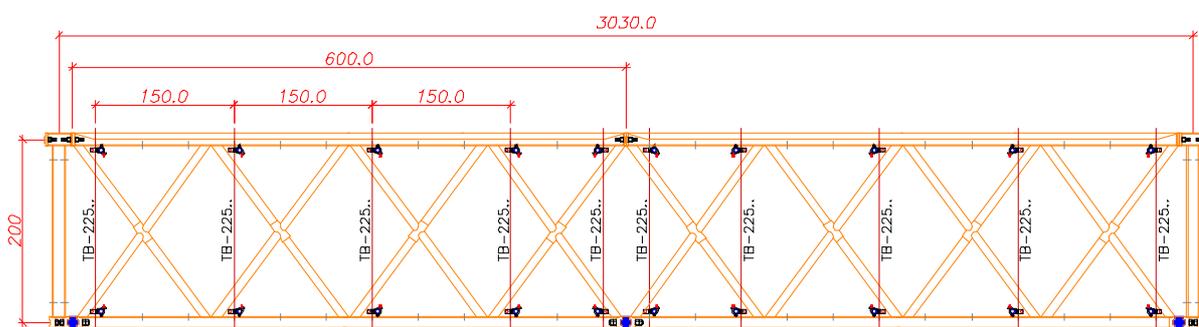
d) Vista frontal dos modelos estruturais II e VI



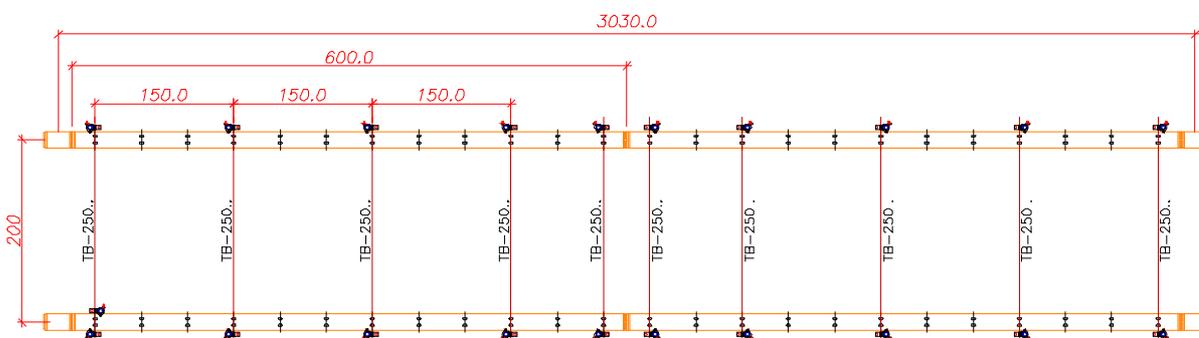
d) Vista frontal do modelo estrutural X

Figura 11– Configuração dos modelos estruturais II,VI e X

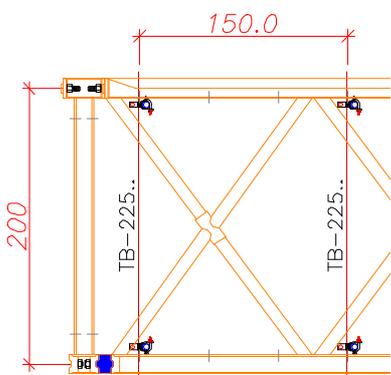
Modelos – III,VII e XI :Estes modelos apresentam duas linhas de treliças paralelas a 2 metros com 5 módulos intermediários de 6 m em cada linha, sistema de apoio na base da periferia do conjunto, com poste de união dos banzos, e contraventamento horizontal em tubos a cada 1,5 metros. O diferencial entre os modelos apresentados é que o modelo III apresenta o contraventamento horizontal rígido, assim como no modelo XI e o modelo VII apresenta uma ligação rotulada. O modelo XI difere-se dos demais com o acréscimo do contraventamento na diagonal a cada 1,5 metros.



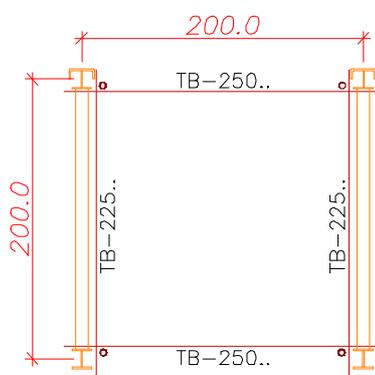
a) Vista lateral do modelo estrutural III,VII e XI



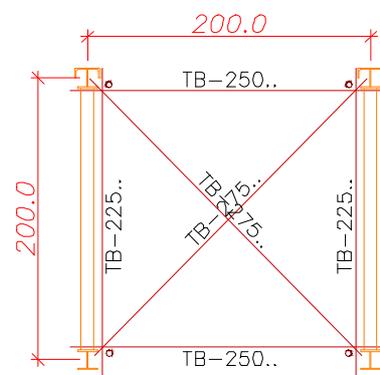
b) Vista superior do modelo estrutural III,VII e XI



c) Detalhe do apoio nos modelos estruturais



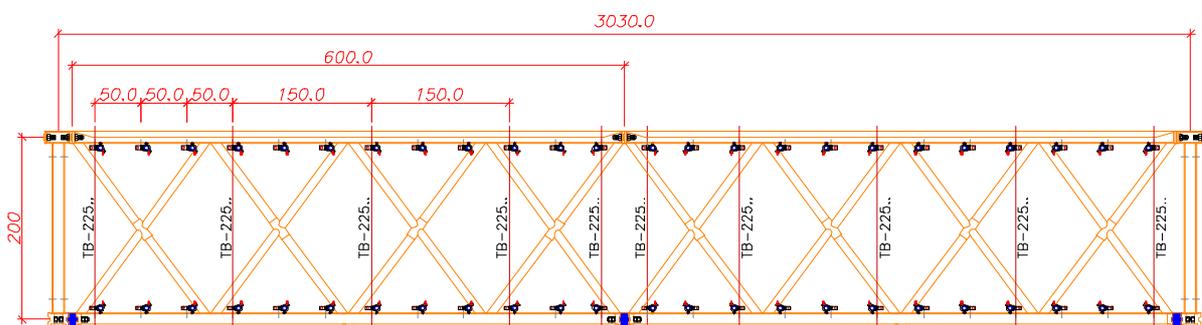
d) Vista frontal dos modelos estruturais III e VII



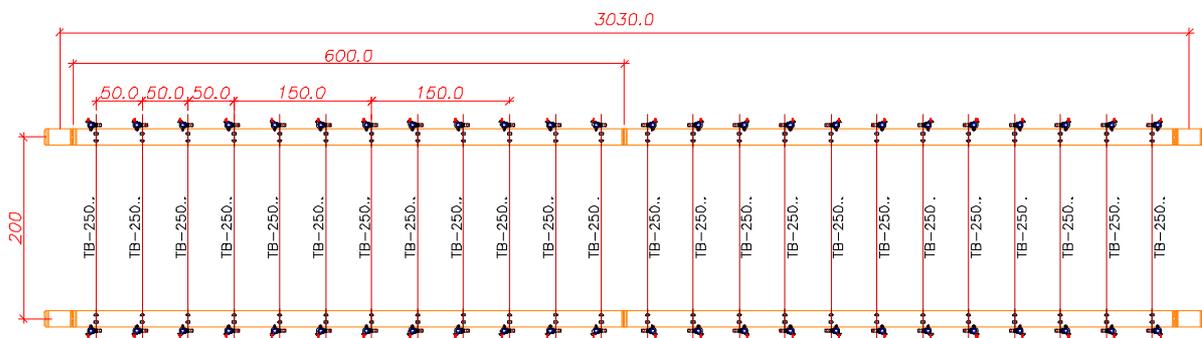
d) Vista frontal do modelo estrutural XI

Figura 12– Configuração dos modelos estruturais III,VII e XI

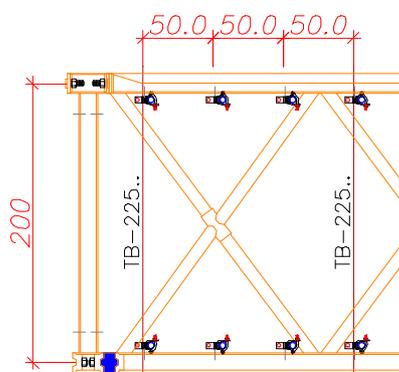
Modelos – IV,VIII e XII :Estes modelos apresentam duas linhas de treliças paralelas a 2 metros com 5 módulos intermediários de 6 m em cada linha, sistema de apoio na base da periferia do conjunto, com poste de união dos banzos, e contraventamento horizontal em tubos a cada 1,5 metros. O diferencial entre os modelos apresentados é que o modelo IV apresenta o contraventamento horizontal rígido, assim como no modelo XII e o modelo VIII apresenta uma ligação rotulada. O modelo XII difere-se dos demais com o acréscimo do contraventamento na diagonal a cada 1,5 metros.



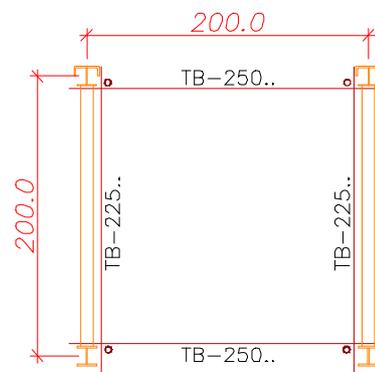
a) Vista lateral do modelo estrutural IV,VIII e XII



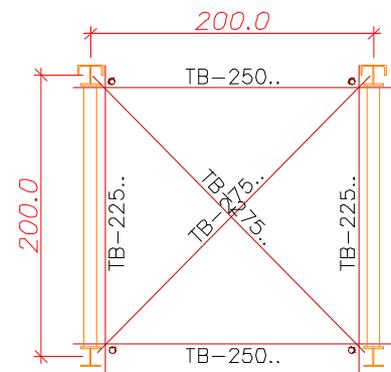
b) Vista superior do modelo estrutural IV,VIII e XII



c) Detalhe do apoio nos modelos estruturais



d) Vista frontal dos modelos estruturais IV e VIII



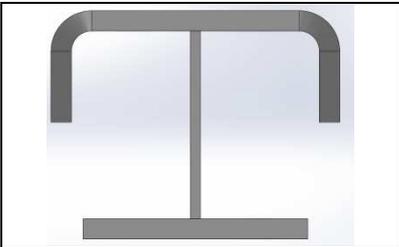
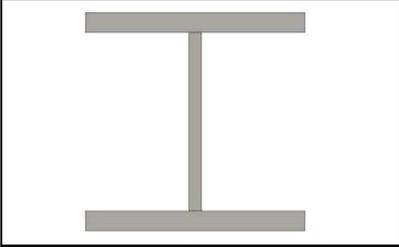
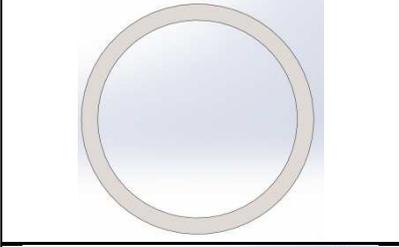
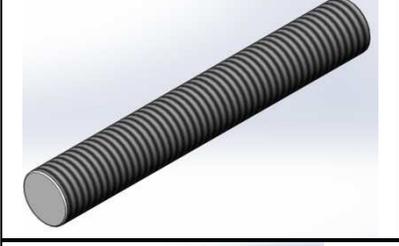
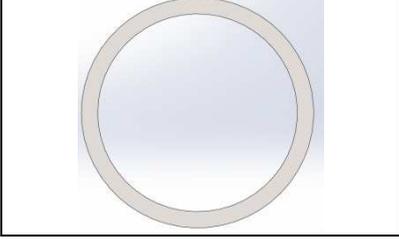
d) Vista frontal do modelo estrutural XI

Figura 13– Configuração dos modelos estruturais IV, VIII e XII

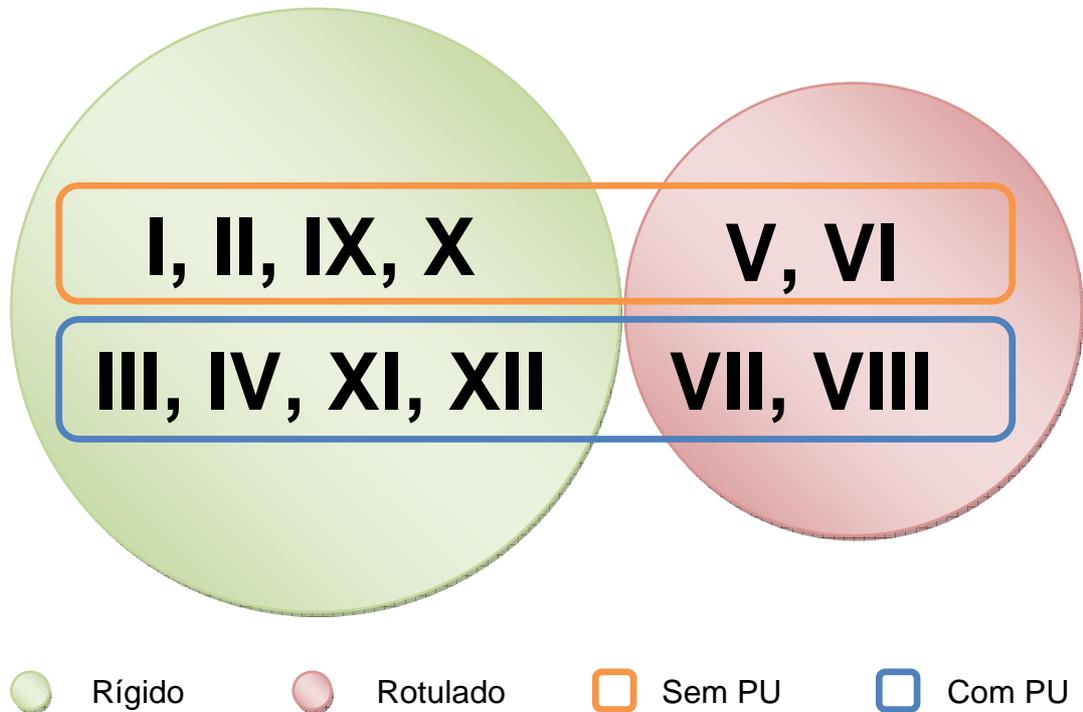
### 2.3 Características físicas e geométricas das seções

No que diz respeito às características físicas do aço, este possui módulo de elasticidade longitudinal igual a  $2,00 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  ( $E = 2,00 \times 10^{11}$ ), coeficiente de Poisson igual a 0,3 ( $\nu = 0,3$ ), densidade de  $7850 \text{ kg/m}^3$  ( $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ), coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ). O emprego de aços comerciais do tipo SAC-50, SAE-1040, SAE-5140 e SAE-1010, conforme apresentados nos banzos, diagonais, prisioneiros e tubos de contraventamento, respectivamente, descritos na Tabela 2.

Tabela 2– Propriedades físicas e geométricas das seções

	<b>Elemento Estrutural</b>	<b>Descrição</b>
	Especificação do aço :	Banzo Superior – SAC-50
	Tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) :	375 MPa
	Área (A)	5572 mm <sup>2</sup>
	Inércia ( $I_y$ )	17,03x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>
	<b>Elemento Estrutural</b>	<b>Descrição</b>
	Especificação do aço :	Banzo Inferior – SAC-50
	Tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) :	375 MPa
	Área (A)	4465 mm <sup>2</sup>
	Inércia ( $I_y$ )	581x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>
	<b>Elemento Estrutural</b>	<b>Descrição</b>
	Especificação do aço :	Diagonais –SAC-1040
	Tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) :	270MPa
	Diâmetro Externo ( $D_e$ )	88,90 mm
	Espessura (e)	3,75 mm
	<b>Elemento Estrutural</b>	<b>Descrição</b>
	Especificação do aço :	Prisioneiros – SAC-5140
	Tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) :	608MPa
	Diâmetro Externo ( $D_e$ )	32,17mm
	Área efetiva ( $A_{eff}$ )	813 mm <sup>2</sup>
	<b>Elemento Estrutural</b>	<b>Descrição</b>
	Especificação do aço :	Contraventamento – SAC-1010
	Tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) :	128MPa
	Diâmetro Externo ( $D_e$ )	48,8 mm
	Espessura (e)	3,05 mm

Na figura xx, é mostrado um diagrama com os modelos estruturais, diferenciados pelo tipo de travamento ( Rígido ou rotulado) e o sistema de apoio ( Com poste de união ou sem poste de união).



Neste capítulo foram apresentadas as geometrias e características físicas utilizadas no desenvolvimento do presente estudo. No capítulo a seguir serão apresentados os modelos numérico-computacionais adotados no presente estudo e suas respectivas características, baseadas nas características apresentadas no presente capítulo.