AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA HANGARES DE GRANDES VÃOS EM PERFIS DE AÇO DE SEÇÃO ABERTA E TUBULARES

Igor Charlles Siqueira Leite

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Rio de Janeiro

Março de 2017

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA HANGARES DE GRANDES VÃOS EM PERFIS DE AÇO DE SEÇÃO ABERTA E TUBULARES

Igor Charlles Siqueira Leite

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Eduardo de Miranda Batista, DSc.

Prof. Eliane Maria Lopes Carvalho, DSc.

Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, DSc.

Prof. Juarez Morara Santos Franco, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Leite, Igor Charlles Siqueira

Avaliação de Soluções Estruturais para Hangares de Grandes Vãos em Perfis de Aço de Seção Aberta e Tubulares/ Igor Charlles Siqueira Leite. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

IX, 159 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 113-115.

1. Soluções Estruturais. 2. Hangares. 3. Grandes Vãos. 4. Estruturas de Aço. I. Batista, Eduardo de Miranda. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao nosso grandioso Deus que mediante todas as dificuldades e decisões, sejam elas precipitadas ou não, sempre esteve ao meu lado e sempre me deu forças para continuar.

Agradeço a minha mãe Amara e ao meu pai Itamar por estarem sempre juntos e serem bastante compreensivos pelas minhas constantes ausências para compor este trabalho. Sem a ajuda deles, eu não estaria onde estou hoje.

Agradeço a minha eterna companheira, Aline Santos, que sem o seu total e irrestrito apoio eu não teria chegado até este ponto. Muito obrigado.

Agradeço ao meu orientador Eduardo Batista por me apoiar na composição deste trabalho e ser compreensivo com o meu período de ausência e me dar forças para continuar. Além disso, agradeço por todo o conhecimento técnico que foi me passado durante o tempo de elaboração da dissertação. Em relação ao ambiente acadêmico da COPPE/UFRJ agradeço também aos professores Alexandre Landesmann, este por muito contribuir com conhecimento técnico em estruturas de aço e ao professor Taborda pelos conselhos e pela paciência durante a ministração da disciplina Mecânica dos Sólidos.

Agradeços aos amigos da COPPE/UFRJ, Jonathan da Maia (amigo de turma de oficial também), Ingrid, Thiago, Guilherme, Liusky e em especial ao amigo Felipe (*in memorian*).

Agradeço aos amigos que fiz na UNISUAM como professor, dos quais ressalto José Eudes, Luiz Aguiar e Alex Leandro.

Agradeço em especial aos amigos mais recentes, que as atribulações da vida me deu: Jéssica, Karoline e Marília, uma vez que sem o apoio de vocês eu não conseguiria continuar com essa dissertação e nem continuar a seguir em frente.

Agradeço aos amigos do Centro de Estudo e Projetos de Engenharia da Aeronáutica, em especial o Tenente Coronel Filipe, pela liberação para cursar o mestrado, ao meu chefe Leonardo de Jesus, por sempre me aconselhar e me passar valiosos conhecimentos técnicos, e aos amigos Paulo de Tarso, Felipe, Faruolo, Daniel, Bruna, Rodrigo, Rafael Fernandes, Leandro Camilo e Avelar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA HANGARES DE GRANDES VÃOS EM PERFIS DE AÇO DE SEÇÃO ABERTA E TUBULARES

Igor Charlles Siqueira Leite

Março/2017

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho desenvolve uma análise comparativa de desempenho em relação ao consumo de aço dos elementos estruturais constituintes de hangares em estrutura metálica. Para tal estudo leva-se em consideração a parametrização dos modelos, isto é, adoção de critérios geométricos a serem utilizados para a análise. Levou-se em consideração a variação dos vãos livres de 70 a 100 metros e distância entre pórticos de 5 e 10 metros. As soluções estruturais foram desenvolvidas com perfis laminados a quente de seção aberta ou em perfis tubulares. Além disso, estudou-se a composição de três tipos de cobertura treliçadas: cobertura com treliça reta, treliça com banzos inclinados e treliça em arco, todas do tipo Warren com montantes. Adicionalmente levou-se em consideração a influência de três tipos de contraventamento da estrutura: em “X”, em “K” e em “Y”, além da influência no consumo de aço de terças de perfis abertos, perfis tubulares e do tipo *steel joist*. A fim de obter um parâmetro de eficiência, foi levada em consideração a comparação entre o consumo de aço dos modelos. Na análise comparativa, viu-se que o modelo com menor consumo era o formado com perfis tubulares e cobertura em arco com distância entre pórticos de 10 metros. Por fim, foram demonstradas algumas soluções de fabricação, transporte e montagem de dois modelos utilizados no trabalho, assim como definidas soluções para ligações padrão desses modelos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF STRUCTURAL SOLUTIONS FOR LARGE SPANS HANGARS IN STEEL ROLLED OPEN AND TUBULAR SECTIONS

Igor Charlles Siqueira Leite

March/2017

Advisor: Eduardo de Miranda Batista

Department: Civil Engineering

This work develops a comparative analysis of performance in relation to steel consumption of the structural elements of metallic structure hangars. This study takes into consideration the parametrization of the models, that is, adoption of geometrics criteria to be used for the analysis. It was taken into consideration the variation of free spans of 70 to 100 m and distance between frames of 5 and 10 m. The structural solutions was develloped with steel rolled open sections or in tubular sections. In addition, was studied the composition of three types of truss cover: straight truss, sloping banzos truss and arched truss, all of Warren type. It was still taken into account the influence of three types of structure bracing: in “X”, “K” and “Y”, besides the influence on the steel consumption of beans of open profiles, tubular profiles and steel joist. In order to obtain and efficiency parameter, the comparsion between the steel consumption of the models was taken into account. In the comparative analysis, was seen that the model with lower consumption was formed with tubular profiles and arc cover with distance between frames of 10 m. Finally some manufacturing, transport and assembly solutions of two models used in this work were demonstrated, as well as solutions for the standarts connections of these models.

SUMÁRIO

1. Introdução 1
1.1. Motivação 1
1.2. Objetivos 5
1.3. Organização da pesquisa 5
2. Sistemas estruturais de hangares 7
2.1. Edifícios industriais em estruturas de aço 7
2.1.1. Definições 7
2.1.2. Sistemas estruturais de edifícios industriais 7
2.1.3. Sistemas de coberturas em edifícios industriais 11
2.1.4. Sistemas de terças de cobertura em edifícios industriais 14
2.1.4. Sistemas de contraventamentos em edifícios industriais 16
2.2. Hangares em estruturas de aço 18
2.2.1. Contexto histórico 18
2.2.2. Hangar Digex em São José dos Campos 19
2.2.3. Hangar de lavagem do Aeroporto Santos Dumont 20
2.2.4. Hangar do Aeroporto de Amarais em Campinas 20
2.2.5. Hangar da Base Aérea do Galeão 21
2.3. Parâmetros de avaliação de sistemas estruturais 22
2.4. Estruturas tubulares em aço 29
2.4.1. Breve histórico 29
2.4.2. Aplicações das estruturas tubulares em aço na construção civil 30
2.4.3. Treliças constituídas de perfis tubulares 31
2.4.4. Ligações em sistemas treliçados constituídos de perfis tubulares 32
3. Estudo das variáveis de projeto 34
3.1. Considerações iniciais 34
3.2. Critérios do estudo das variáveis de projeto 34
3.2. Composição das seções transversais 41
3.2.1. Seções transversais em perfis abertos 41
3.2.2. Seções transversais em perfis tubulares 43
3.3. Critérios para composição das terças 44
3.3.1. Terças em perfis laminados abertos 44
3.3.2. Terças em perfis tubulres 45
3.4. Critério para composição dos sistemas de contraventamento 45
3.4.1. Contraventamento horizontal no plano da cobertura 45
3.4.2. Contraventamento vertical 46

4. Análise e dimensionamento dos modelos estruturais 48
4.1. Considerações iniciais 48
4.2. Ações atuantes nos modelos 48
4.2.1. Ações Permanentes: 48
4.2.2. Ações Variáveis: 49
4.3. Combinação de ações 53
4.4. Análise estrutural dos modelos 54
4.5. Dimensionamento dos modelos estruturais 57
4.5.1. Verificação do estado limite de serviço no pórtico transversal do modelo AR70-5 e TR70-5 57
4.5.2. Verificação do estado limite último nos pórticos transversais do modelo AR70-5: 59
4.5.8. Dimensionamento das terças da cobertura do modelo AR70-5: 62
4.5.9. Dimensionamento do contraventamento vertical do AR70-5: 64
4.5.10. Verificação do estado limite último nos pórticos transversais do modelo TR70-5: 65
4.5.11. Dimensionamento das terças da cobertura do modelo TR70-5: 67
4.6. Representação dos resultados obtidos no dimensionamento 69
5. Análise e discussão dos resultados 71
5.1. Considerações iniciais 71
5.2. Análise comparativa entre os modelos laminados abertos 71
5.3. Análise comparativa entre os modelos tubulares 77
5.3.1. Análise dos modelos com distância entre pórticos de 5 metros 77
5.3.1. Análise dos modelos com distância entre pórticos de 10 metros 79
5.4. Análise comparativa dos modelos constituídos de perfis abertos com os modelos constituídos de perfis tubulares 86
5.4.1. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 5 metros 86
5.4.2. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 10 metros 88
5.4.2. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 5 e 10 metros 90
6. Fabricação, transporte e montagem 93
6.1. Fabricação de estruturas metálicas 93
6.2. Desenhos de fabricação dos modelos AR70-5 e TR70-5 93
6.2.1. Detalhes típicos das ligações 96
6.3. Transporte de estruturas metálicas 101
6.3.1. Exemplos de transporte dos modelos AR70-5 e TR70-5 102
6.4. Montagem de estruturas metálicas – recomendações gerais 103
6.4.1. Exemplo de montagem dos modelos AR70-5 e TR70-5 104
7. Considerações finais 109

7.1. Conclusões 109
7.2. Sugestões para pesquisas futuras 112
Referências Bibliográficas 113
Anexo A – Roteiro de cálculo dos perfis solicitados à esforços axiais 116
Anexo B – Roteiro de cálculo dos perfis solicitados à flexão 124
Anexo C – Roteiro de cálculo das ligações 131
Anexo D – Representação dos Resultados Obtidos nos Dimensionamentos 135

1. Introdução

1.1. Motivação

As primeiras construções em aço são datadas a partir do ano de 1750, época em que se começou a produzir este produto industrialmente. No Brasil, a fabricação do ferro fundido se deu em torno do ano de 1812, sendo a primeira construção a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, estado do Rio de Janeiro em 1857 e em utilização até o presente momento. (Pfeil, 2011)

As estruturas de aço têm diversas vantagens frente a outros materiais, como por exemplo, a alta resistência do material, permitindo que os elementos constituintes da estrutura suportem elevados esforços com área relativamente pequena das seções transversais. Isso faz com que as estruturas metálicas sejam mais leves que os elementos contruídos em concreto armado. Outra vantagem na utilização das estruturas de aço é o fato das peças serem fabricadas em série em indústrias, diminuindo o prazo final da obra, além da facilidade de serem desmontados e substituídos com certa facilidade.

Neste contexto, no Brasil os principais tipos de construções metálicas são os que exigem áreas livres de pilares intermediários, como galpões, construções constituídas em geral em um único pavimento, destinadas a diversos fins, entre elas oficinas, fábricas, hangares de manutenção de aeronaves, depósitos etc.

Vários sistemas estruturais são empregados para a constituição da estrutura de galpões. Sistemas formados por pórticos planos, estabilizados longitudinalmente por intermédio de contraventamento, são em geral os mais comumente encontrados, constituídos seja em perfis com seção aberta, seja em perfis tubulares.

No âmbito dos galpões em estrutura metálica, os hangares de manutenção de aeronaves são importantes construções deste tipo, uma vez que exigem, em geral, grandes vãos livres para que a manutenção de aeronaves esteja totalmente abrigada na edificação. Na cidade do Rio de Janeiro, fica localizado o mais famoso hangar para aeronaves do Brasil, o hangar do Zeppelin (Figura 1), o qual foi construído na década de 30 para abrigar os dirigíveis *Graff Zeppelin* e *Hindemburg*, ligando a Alemanha ao Rio de Janeiro.

O hangar do Zeppelin, sediado na Base Aérea de Santa Cruz, da Força Aérea Brasileira, tem 274 metros de comprimento, com 58 metros de largura e 58 metros de altura, constituído de 27 pórticos planos em estruturas de aço.

Figura 1 - Hangar do Zeppelin, Base Aérea de Santa Cruz, RJ

Nos últimos anos, as aeronaves desenvolveram-se de tal forma que a envergadura, ou seja, a distância de ponta a ponta das asas, exige cada vez vãos maiores dos hangares. Recentemente, a Força Aérea Brasileira desenvolve em parceria com a Embraer a aeronave KC-390, com 35 metros de envergadura. A FAB desenvolve o projeto dos hangares em conjunto com a sua unidade especializada Centro de Estudos e Projetos de Engenharia da Aeronáutica, com a exigência de abrigar duas aeronaves lado a lado, necessitando, no mínimo um vão de 70 metros (Figura 2).

Figura 2 – Aeronave KC-390 (Hangar 33, 2016)

Atualmente existem diversas soluções estruturais para galpões de pequeno e médio vãos com seus respectivos consumos de aço disponíveis em inúmeras bibliografias, como pode ser visto na Figura 3.

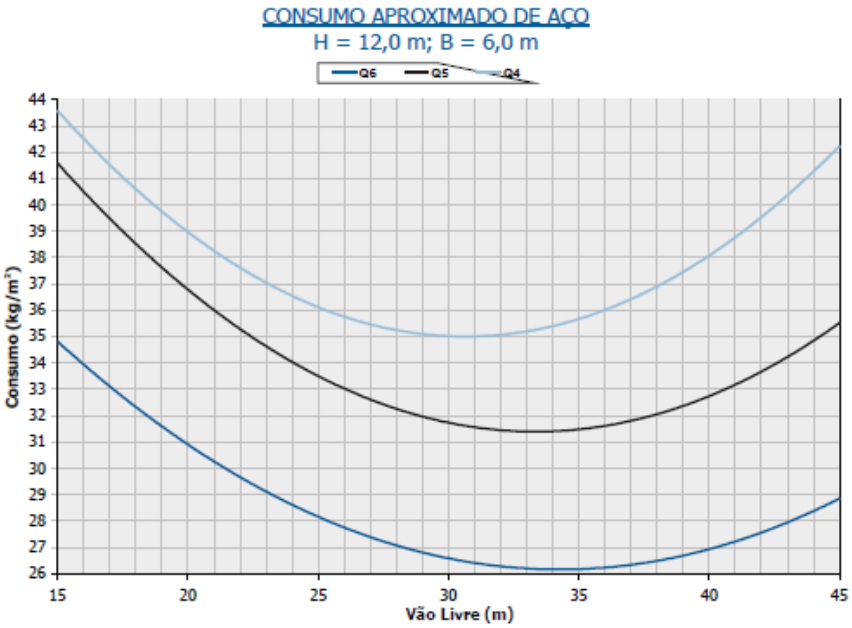

Figura 3 – Consumo de aço para galpões constituídos de perfis alma cheia de pequenos e médios vãos (D´Allambert, 2005).

No caso de hangares com grandes vãos (maiores que 70 metros), é notado que o conhecimento para a tomada de decisão do projetista para a tipologia mais indicada não é difundida no meio técnico da engenharia estrutural. Os modelos de pórticos planos utilizados para pequenos e médios vãos podem não ser viáveis para construção com grandes vãos. REIDSTEEL (2017) menciona alguns tipos distintos de hangares de manutenção de aeronaves, cada um com características para vencer vãos distintos, contudo, sem relacionar os elementos estruturais constituintes do hangar (terças de cobertura, contraventamento, fechamentos laterais etc.) e sem levar em consideração o consumo de aço para cada vão. Os hangares de pórticos com vigas de alma cheia são ideais para vãos livres de até 30 metros (Figura 4a). Para vãos entre 30 e 100 metros, é sugerido o uso de cobertura com vigas treliçadas (figura 4b) e para vãos muito grandes, de até 200 metros, utiliza-se em geral coberturas em arco (figura 4c).

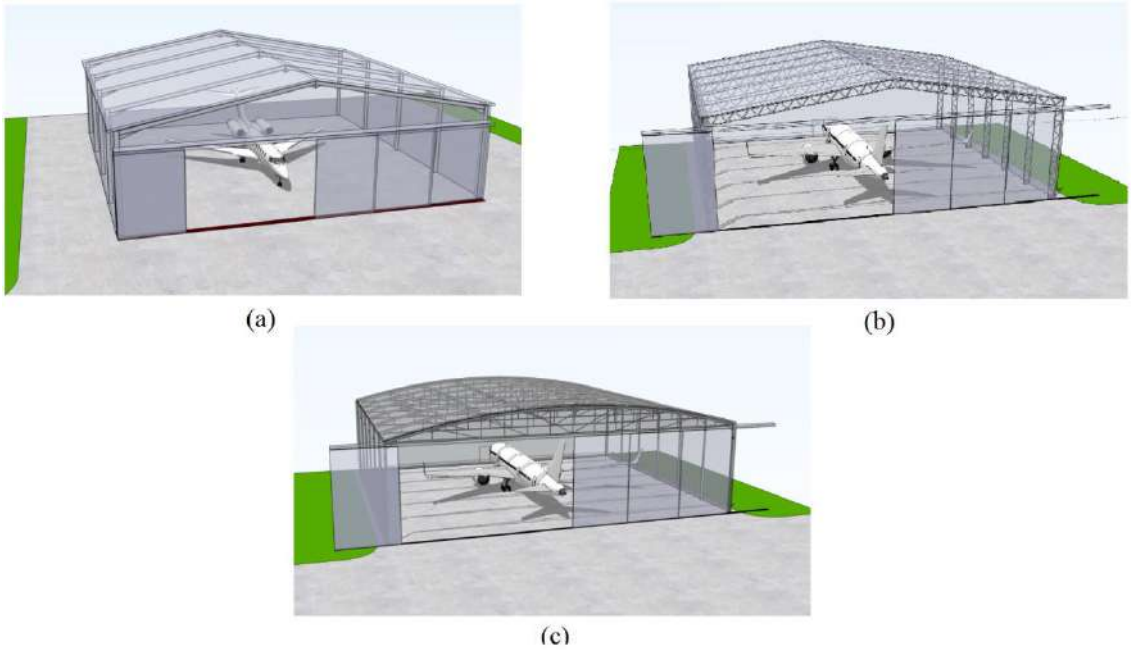

Figura 4 – Tipologia de hangares (Adaptado de REIDSTEEL, 2017)

De acordo com Bellei (2010), a economia na fabricação e montagem da edificação só é possível com detalhamentos bem definidos nas premissas de projetos. Outra questão é a aplicação de estruturas tubulares em modelos de pórticos planos. Esse tipo de solução, muito utilizado em estruturas espaciais não é usual em estruturas formadas por pórticos planos, justificando o estudo do comportamento das mesmas para estruturas de grandes vãos. Segundo Bellei (2010), o custo de uma estrutura metálica em relação aos materiais utilizados está em torno de 20 a 50% e em relação à sua montagem de 20 a 35%, sendo essas porcentagens relacionadas ao custo total da obra. Com isso, a escolha racional da tipologia de sistemas estruturais tem uma grande importância para o desenvolvimento de soluções que sejam padronizadas e que tenham custos competitivos para a indústria.

Na Figura 5, podem-se observar tipos de sistemas estruturais e os respectivos vãos que o mesmo suporta, contudo apenas representando vãos admissíveis, sem quantificar o consumo de aço ou explorar outras soluções para os mesmos vãos.

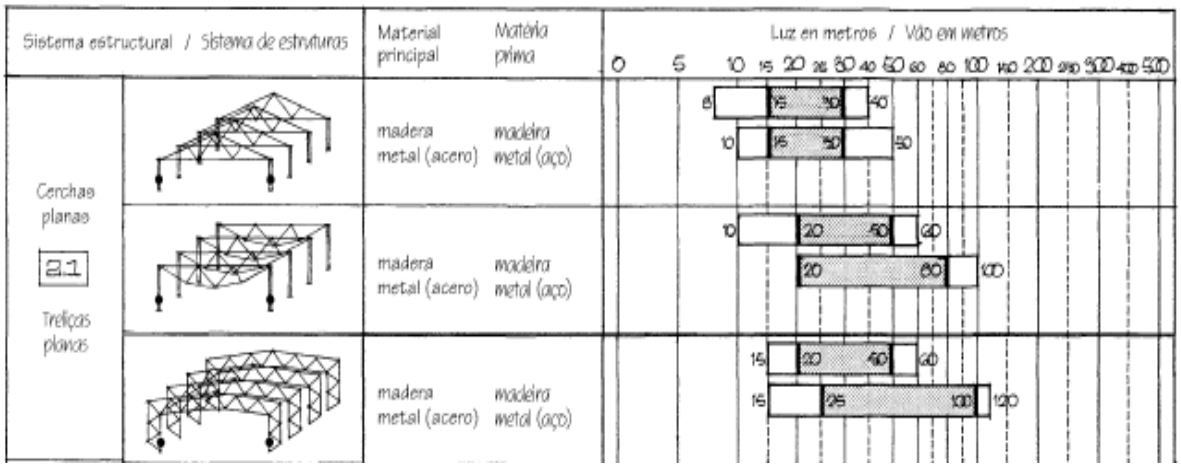

Figura 5 – Sistemas estruturais recorrentes e os vãos admissíveis em metros. (Engel, 2001)

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais utilizadas em hangares com grandes vãos. Serão identificadas tipologias de pórticos planos transversais utilizados na concepção de hangares e será determinada a taxa de consumo de aço para cada estrutura, seja constituída de perfis laminados abertos, seja constituída de perfis tubulares, avaliando assim a eficiência das soluções estruturais encontradas.

Além disso, serão identificados modelos diferentes de terças para a cobertura e sistemas de contraventamento verticais dos modelos estruturais, comparando sistemas diferentes e a taxa de consumo de aço para cada modelo, determinando assim a solução de terça de cobertura mais eficiente e o consumo de aço total, levando também em consideração os sistemas de contraventamento.

Por fim, serão apresentados métodos construtivos de estruturas de aço com perfis laminados abertos e tubulares, definindo desde a sua fabricação, transporte, içamento até a montagem final da estrutura, levando em consideração os custos das estruturas escolhidas.

1.3. Organização da pesquisa

Esta pesquisa se organizará em capítulos, conforme as descrições que se seguem:

- Capítulo 1: Apresentação de uma breve introdução ao tema proposto com a motivação para sua elaboração, os objetivos do trabalho e como será a organização desta pesquisa.
- Capítulo 2: Apresenta conceitos sobre galpões industriais em aço e seus elementos constituíntes, hangares em estruturas metálicas, critérios de avaliação de sistemas estruturais em estruturas metálicas e discussão de estruturas tubulares em aço.
- Capítulo 3: Descreve o estudo paramétrico dos modelos estruturais propostos, definindo a sua geometria e os tipos de perfis utilizados no pórtico transversal, terças e sistema de contraventamento.
- Capítulo 4: Descreve a rotina de análise e dimensionamento dos modelos estruturais adotados nesta pesquisa, definindo os critérios de cálculo e apresentando os resultados obtidos.
- Capítulo 5: Apresenta os resultados obtidos através da análise e dimensionamento dos modelos estruturais adotados, dissertando sobre cada conjunto de modelos estruturais e verificando os modelos com melhor desempenho para todos os vãos estudados.
- Capítulo 6: Apresenta aspectos sobre fabricação, transporte e montagem de modelos apresentados no capítulo 5, com detalhes de fabricação e montagem destes modelos.
- Capítulo 7: Considerações finais sobre a pesquisa, com as conclusões dos resultados encontrados e sugestões para trabalhos futuros.

Ao fim deste trabalho são apresentadas as Referências Bibliográficas e os Anexos, contendo a memória de cálculo do dimensionamento dos modelos estruturais propostos para estudos no capítulo 4.

2. Sistemas estruturais de hangares

2.1. Edifícios industriais em estruturas de aço

2.1.1. Definições

Os edifícios industriais em aço, também conhecidos como galpões, são construções em sua grande maioria constituídas de um pavimento térreo que tem como finalidade a cobertura de grandes áreas, as quais são destinadas a diversos fins, por exemplo, fábricas, depósitos, siderúrgicas e hangares.

Os edifícios industriais podem ser construídos em aço, madeira ou concreto. O mais versátil e o mais comumente empregado são os galpões em aço.

Os galpões construídos em aço seja em perfis laminados a quente ou conformados a frio, podem ser montados no local da obra, ou em partes nas fábricas de estruturas metálicas e, posteriormente transportados até o local onde será realizada a montagem, sendo esta a solução mais comumente empregada.

Em geral os galpões são estruturas de vãos simples. Contudo, também podem ser utilizados vãos múltiplos, principalmente quando é necessária grandes áreas de cobertura. Em hangares, por exemplo, pilares internos aos galpões são inviáveis para acomodarem as aeronaves durante os serviços de manutenção.

2.1.2. Sistemas estruturais de edifícios industriais

A definição do sistema estrutural de um galpão está ligada a seu tipo de utilização. A primeira definição é em relação à finalidade a que o galpão se destina. Isso faz com que sejam definidos os vãos transversais (vão livre) e longitudinais (distância entre pórticos, para estruturas planas), altura útil, necessidade de ventilação natural (aberturas laterais e lanternim), calhas e aberturas. Além disso, as ações atuantes na edificação (sobrecargas na cobertura, vento, deformações, cargas de equipamentos) também definem o sistema estrutural a ser empregado.

De acordo com CBCA (2003), os galpões podem ser classificados em três tipos básicos: de vãos simples (Figura 6), de vãos múltiplos (Figura 7) e em “shed” (Figura 8).

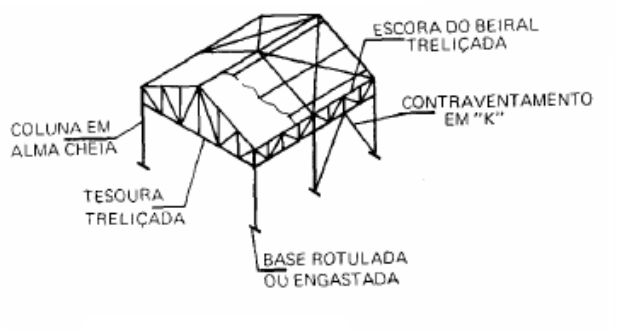

Figura 6 – Galpão de vão simples (CBCA, 2003)

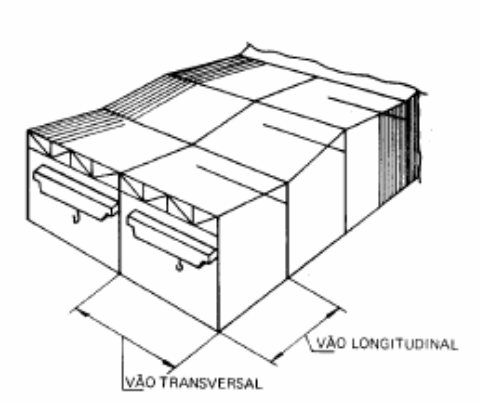

Figura 7 – Galpão de vãos múltiplos (CBCA, 2003)

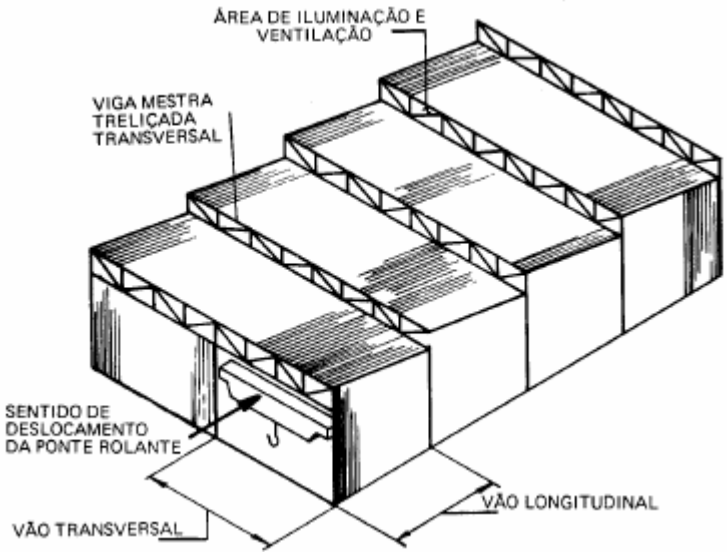

Figura 8 – Galpão em Shed (CBCA, 2003)

Para os edifícios industriais com vãos simples, os sistemas estruturais mais utilizados são os galpões com coluna simples e tesoura de cobertura; galpões com colunas simples com cobertura treliçada; galpões com colunas treliçadas e tesoura de cobertura; galpões com pórticos de alma cheia.

Os galpões com colunas simples e tesoura (Figura 9) são os tipos mais utilizados para galpões. O consumo de aço da estrutura, em kg/m² é baixo, da ordem de 10 kg/m², segundo Chaves (2007). Esse tipo de solução não é indicado para vãos maiores de 15 metros.

Figura 9 – Galpão com coluna simples e tesoura (Pravia *et. al*,. 2010)

Os galpões com coluna simples e coberturas com vigas treliçadas de banzos paralelos são indicados para vãos maiores, acima de 15 metros, e para utilização de inclinação de cobertura menor que os utilizados nos galpões com tesouras. De acordo com Bellei (2010), as vigas treliçadas de banzos paralelos e outros elementos de cobertura podem ser constituídos por perfis abertos de chapas dobradas, diminuindo o consumo total de aço.

Os galpões com colunas treliçadas (Figura 10) são utilizados, em geral, para receber a coluna da cobertura e servir de apoio para a viga de rolamento de pontes rolantes. São utilizados também quando se deseja colunas com grande inércia em substituição aos perfis de alma cheia pesados.

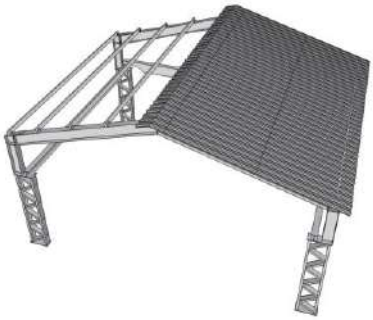

Figura 10 – Galpão com coluna treliçada (Pravia *et al*., 2010)

Os galpões constituídos de perfis de alma cheia (Figura 10) são muito utilizados na construção devido à sua ótima relação entre vão e peso próprio (D´Allambert, 2005). Entre as principais características desse tipo de sistema estrutural podem ser citados a simplicidade de projeto e detalhamento, liberdade no projeto arquitetônico, possibilidade vencer pequenos com baixo peso próprio e rapidez de fabricação e montagem da estrutura, por apresentarem perfis padronizados, sem necessidade de detalhes especiais de fabricação e ligações.

Figura 11 – Galpões constituídos de perfis em alma cheia (Pravia *et al*., 2010).

Para os edifícios industriais com vãos múltiplos (Figura 12), podem ser utilizados os mesmos sistemas estruturais já apresentados para vãos simples. Contudo, devem ser feitas algumas considerações como, por exemplo, quando se deseja retirar alguma coluna interna para poder aumentar a área a ser trabalhada. Para isso, introduzem-se vigas centrais para resolver este tipo de problema. Neste caso, de acordo com Bellei (2010), pode ser necessário adicionar contraventamentos de cobertura para ajudar na distribuição das cargas horizontais de vento atuantes na edificação.

Figura 12 – Edifícios industriais com vãos múltiplos (Pravia *et al*., 2010)

Por fim, quando a área necessita de ventilação e iluminação natural pela própria cobertura, utiliza-se o galpão do tipo *Shed* (Figura 13). Quando colunas internas nos pórticos forem um inconveniente para a edificação, podem ser utilizadas vigas entre colunas que suportem as vigas intermediárias, chamadas de vigas mestras.

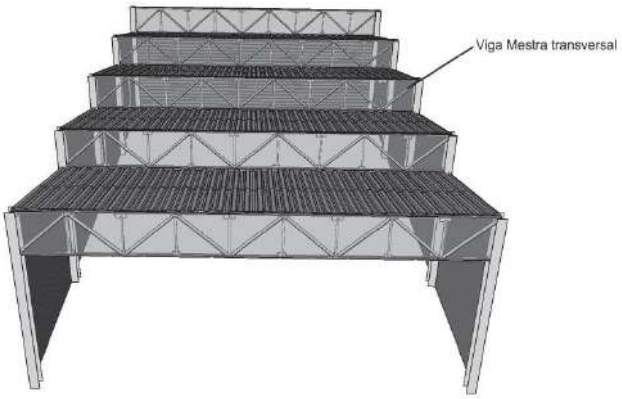

Figura 13 – Galpão em Shed com viga mestra transversal (Pravia *et al*., 2010)

2.1.3. Sistemas de coberturas em edifícios industriais

As coberturas de edifícios industriais, como apresentado nos itens anteriores, são em geral constituídas de tesouras ou vigas treliçadas ou vigas de alma cheia. As tesouras ou as vigas treliçadas também são chamadas de armações. De acordo com Bellei (2010), as treliças são as mais antigas soluções para quaisquer tipos de cobertura. No geral, as armações passam a ser econômicas em vãos acima de 25 a 30 metros e podem ser constituídas com ligações soldadas ou parafusadas. Esse sistema tem como principal característica o fato das suas barras trabalharem normalmente à tração e à compressão axial, desprezando os efeitos de momentos fletores e esforços cortantes quando as barras convergem em um só local, chamado ponto de trabalho (PT) do nó estrutural. As treliças são ditas planas, quando os seus elementos estão dispostos no mesmo plano. Quando as mesmas estão em planos distintos, dão origens às denominadas treliças espaciais. (Sales *et al*., 2013). Ressalta-se que neste tipo de estrutura os carregamentos em geral são aplicados nos nós e não em modo direto nas barras.

Como as treliças também trabalham a compressão, as barras constituintes podem apresentar problemas de flambagem local e global. A flambagem local surge quando um ou mais elemento constituinte da treliça atinge a carga crítica de flambagem. Esse problema pode ser eliminado aumentando a área da seção transversal (trocar o perfil por um mais resistente) ou diminuir a distância entre os pontos travados da treliça,

aumentando o número de montantes, a fim de diminuir o comprimento de flambagem das barras.

O problema de instabilidade global das treliças acontece pela flambagem fora do plano de treliça. Esse problema é resolvido adotando sistemas de contraventamento, em que, basicamente, barras rígidas travam e interligam as treliças. (Pfeil, 2011)

Existe um grande número de tipos de treliças de cobertura, sendo cada tipologia indicada para uma determinada situação de projeto. Na Figura 14 são apresentadas algumas tipologias de tesoura de banzos inclinados e na Figura 15 são mostradas algumas tipologias de treliça de banzos paralelos.

Figura 14 – Tesouras com banzos inclinados (tesoura) (Pfeil, 2011)

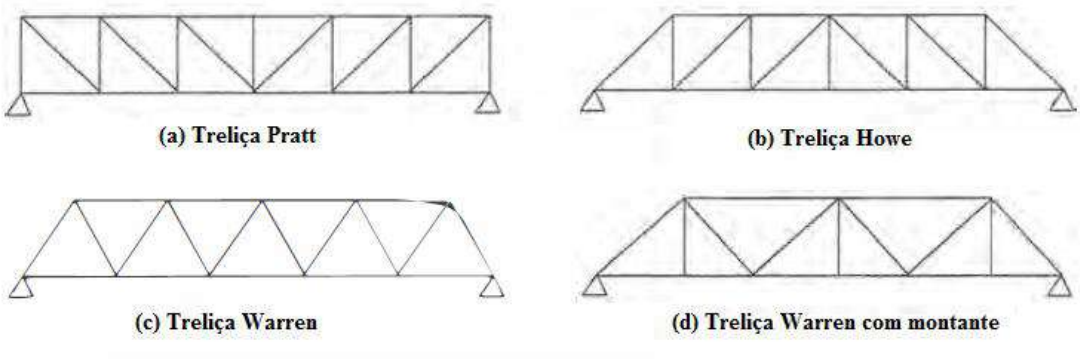

Figura 15 – Tipos de vigas treliçadas com banzos paralelos (Adaptado de Pfeil, 2011)

As tipologias de seções transversais utilizadas para compor os elementos das treliças das coberturas devem ser selecionadas observando critérios técnicos e econômicos, tentando buscar uma solução mais apropriada. A Figura 16 mostra os tipos de seções mais utilizados nas armações. São empregadas em geral as soluções que tenham um eixo de simetria no plano da treliça. De acordo com Bellei (2010), utiliza-se cantoneiras de abas iguais quando o comprimento de flambagem em torno do eixo y-y for um pouco maior que no eixo x-x, em torno de 1,35. As seções de cantoneiras opostas pelo vértice são indicadas principalmente para diagonais e montantes à compressão, uma vez que o raio de giração é praticamente igual nos planos x e y. Soluções em perfis tubulares quadrados e circulares são excelentes alternativas, com o mesmo raio de giração nas duas direções.

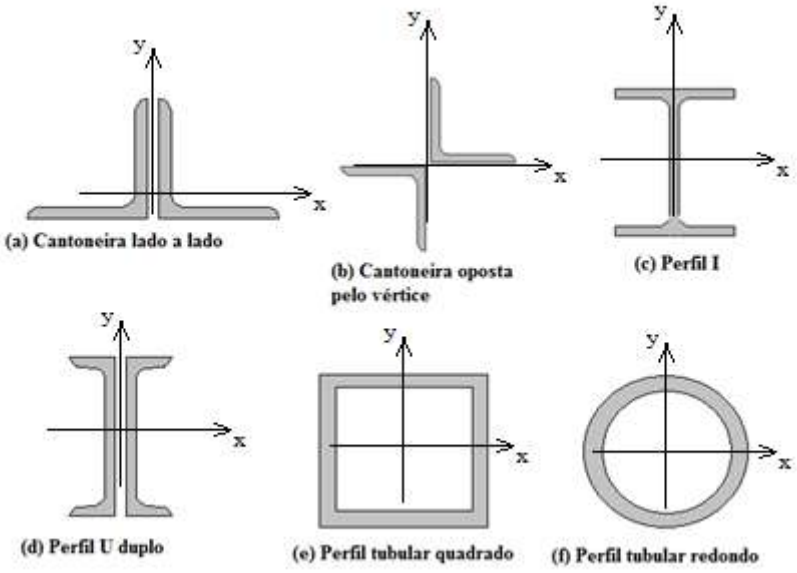

Figura 16 – Tipos de seção usuais em treliça

Soluções empregando cantoneira simples também são empregadas em locais onde a utilização de cantoneiras duplas é de difícil manutenção (proteção contra a corrosão). Neste caso, a carga é aplicada assimetricamente na cantoneira, devendo haver cuidados especiais para o projeto da ligação dos nós. Segundo Pfeil (2011), existem dimensões mínimas a serem consideradas nas barras da armação em cantoneiras simples:

- Banzos: L 50 x 50 x 6,4 mm
- Diagonais e montantes: L 44 x 44 x 4,8 mm
- Espessura da chapa de ligação: 6 mm
- Parafusos: 12,5 mm (1/2”)

Os nós das armações são em geral constituídos por chapas de ligação (*gusset*). De acordo com Bellei (2010), no projeto de ligação das barras da treliça os eixos dos elementos devem convergir para que se cruzem no ponto de trabalho. Caso isso não ocorra, resulta em um momento fletor adicional que causa flexão nas barras. Este momento não pode ser desprezado, uma vez que o mesmo exerce influência sobre as condições de equilíbrio dos nós.

A premissa básica do modelo estrutural de uma armação (treliça) se refere aos carregamentos aplicados nos nós e que as barras são rotuladas nas extremidades, não havendo assim restrição à rotação e, por consequência, sem transmissão de momentos

fletores. Segundo Pfeil (2011), no passado construíam-se as treliças com os seus nós providos de pinos, a fim de que a situação de rótula admitida fosse fielmente representada. No entanto, essa solução é demasiadamente custosa e, ainda, desenvolvem atrito que impedem o funcionamento desta rótula. Com isso, de acordo com Pfeil (2011), consideram-se os nós da treliça rígidos dando origem a momentos fletores nas barras, e o modelo de pórtico seria o mais apropriado para representação real da estrutura (Figura 17). Contudo, deve-se considerar que as ligações nem sempre são adequadas para a restrição das rotações. Adicionalmente, sendo suficientemente esbeltas, os momentos oriundos dos nós podem ser desprezados.

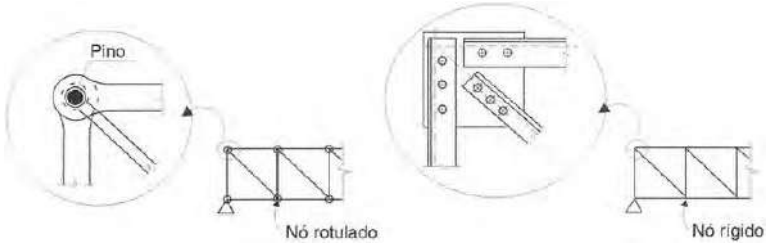

Figura 17 – Modelos com nós rotulados e nós rígidos (Pfeil, 2011).

2.1.4. Sistemas de terças de cobertura em edifícios industriais

As terças são vigas da cobertura dos edifícios industriais, em geral situadas entre as vigas principais dos pórticos ou tesouras. Essas peças tem a finalidade de suportar as telhas da cobertura. Em geral, as cargas atuantes sobre as terças são as provenientes das que solicitam a cobertura, por exemplo, as cargas acidentais como pessoas na cobertura, chuva e também pelas cargas devidas ao vento, tanto de sucção quanto de sobrepressão. Segundo Bellei (2010), é necessária a verificação de três hipóteses de carregamentos: cargas permanentes combinada com as cargas acidentais; cargas permanentes combinadas com os ventos de sucção (situação favorável) e as cargas permanentes combinadas com as cargas acidentais e o vento de sobrepressão (situação desfavorável).

Em geral, as terças são constituídas por perfis laminados do tipo “U”, “I” ou perfis soldados do tipo “I”. Para distâncias entre pórticos menores e com terças pouco solicitadas, podem ser utilizados perfis formados a frio (chapa dobrada), sendo os principais tipos “U”, “U enrijecido”, “Z” e “Z enrijecido”. A crescente utilização dos

perfis tubulares também ampliou a utilização dos mesmos para serem aplicados como terças.

Podem-se utilizar também as terças treliçadas, também conhecidos como *Steel Joist* (Figura 18). Esse sistema de treliças leves nas coberturas das estruturas metálicas surgiu em 1928 nos Estados Unidos (D´Alambert, 2007). Consiste em variadas treliças planas projetadas de modo padronizado. Esse sistema tem a vantagem de ser leve, aliviando as cargas nos pilares e, por consequência, pilares mais esbeltos e redução nas cargas que serão levadas às fundações.

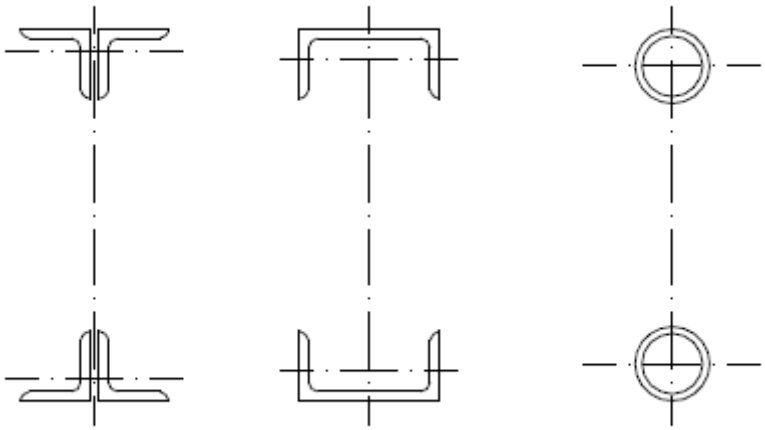

Figura 18 – Terças treliçadas (Vieira, 2009)

A consideração do sistema estrutural das terças é de vital importância para a determinação dos esforços e no dimensionamento dos elementos. As terças podem ser consideradas biapoiadas ou consideradas como contínuas. A consideração de vigas contínuas faz com que os momentos fletores positivos no centro do vão sejam menores que na consideração de vigas biapoiadas, podendo trazer benefícios ao dimensionamento e, por consequência, redução do consumo de aço. É importante salientar que para garantir a continuidade entre duas terças, ou seja, considerá-las como contínuas, é necessário que os seus elementos (almas e mesas) estejam devidamente conectados. Segundo Vieira (2009) é recomendado que essa ligação seja realizada através de ligações parafusadas e com chapas de ligação.

De forma a garantir a diminuição do vão da terça na sua menor inércia da viga, são inseridas barras com seção transversal redonda, as quais são inseridas entre os apoios da terça. Além de barras redondas, podem ser utilizados perfis estruturais, como cantoneira (Figura 19).

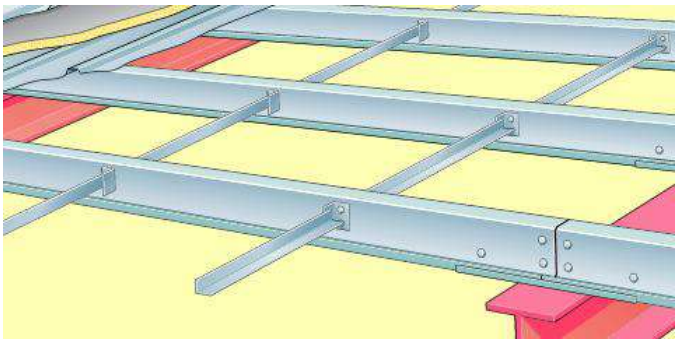

Figura 19 – Linhas de travamento de terças (Vieira apud METFORM, 2009)

2.1.4. Sistemas de contraventamentos em edifícios industriais

Sabe-se que as peças estruturais em aço, apesar de oferecerem grande resistência, são em geral esbeltas. Com isso, são inseridos contraventamentos com a finalidade de garantir a estabilidade do conjunto, durante as fases de montagem e de utilização da edificação. Os contraventamentos são elementos submetidos basicamente aos esforços de tração e compressão de modo a poderem evitar deslocamentos excessivos na edificação.

A estabilização horizontal se dá por intermédio dos contraventamentos horizontais. Segundo Bellei (2010), estes contraventamentos funcionam para distribuir as cargas de vento e possíveis impactos laterais devido à ação de pontes rolantes. Os contraventamentos horizontais podem ser colocados tanto no plano da cobertura quanto nas cordas inferiores da treliça da cobertura. Em geral, os contraventamentos horizontais são dispostos em forma de “X”, e são responsáveis por levar ações horizontais para os pilares. A inserção dos contraventamentos horizontais nas cordas inferiores e nas laterais dos galpões faz com que haja uma distribuição de cargas horizontais, fazendo com que se reduzam os momentos nas bases da coluna e tenha uma redução dos deslocamentos laterais. Na Figura 20, pode ser visto um exemplo de contraventamento horizontal no plano da cobertura.

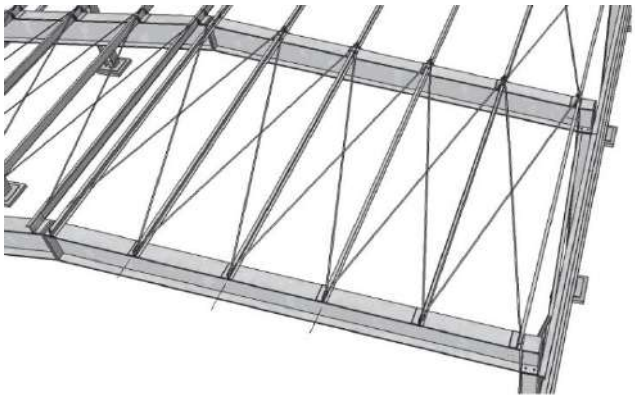

Figura 20 – Contraventamento horizontal no plano da cobertura (Pravia *et al.*, 2010)

Os contraventamentos horizontais, tanto no plano da cobertura, quando nas cordas inferiores da treliça devem ser colocados em intervalos de 20 metros. De acordo com Pravia *et al.* (2010), uma simplificação usual de dimensionamento dos contraventamentos é não considerar as barras submetidas à compressão axial, considerando então somente as barras submetidas à tração, uma vez que além de se obter um sistema treliçado isostático simples, há ainda uma economia no dimensionamento. Contudo, deve-se observar que em geral quem comanda o dimensionamento de barras de contraventamento são os deslocamentos.

Além dos contraventamentos horizontais, é importante ressaltar que as forças horizontais deverão ser transmitidas para as fundações. Não obstante, os pórticos precisam ter sua estabilidade fora do plano garantida. Para isso, são utilizados os contraventamentos verticais entre as colunas. Os contraventamentos verticais em geral dificultam aspectos arquitetônicos ou impedem passagens, como em caso de hangares, em que as laterais dos mesmos são utilizadas geralmente para oficinas de diversas especialidades. A forma mais utilizada e mais econômica é o contraventamento em X (Figura 21). Este tipo de contraventamento consiste em aplicar maior rigidez na ligação entre pilares e vigas, o que faz com que se diminuam os deslocamentos da edificação.

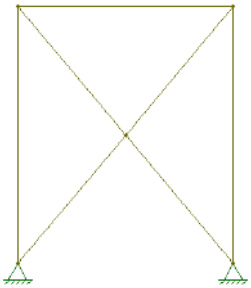

Figura 21 – Contraventamento vertical em “X”

Existem outras formas de contraventamento utilizadas em edifícios industriais e a sua escolha depende exclusivamente da utilização da estrutura. O contraventamento do tipo “K” (Figura 22.a) tem um maior espaço para passagem, contudo as suas hastes não podem ser dimensionadas somente à tração, devendo também ser consideradas as barras comprimidas. Para diminuir o comprimento de flambagem são colocadas barras que possam travar a barra comprimida. O contraventamento do tipo “Y” (Figura 22.b) possui um espaço maior para aberturas. De acordo com Bellei (2010), em geral, o dimensionamento das barras de contraventamento é feito quase que exclusivamente pelo índice de esbeltez admitido pela norma, a não ser que os esforços sejam muito grandes.

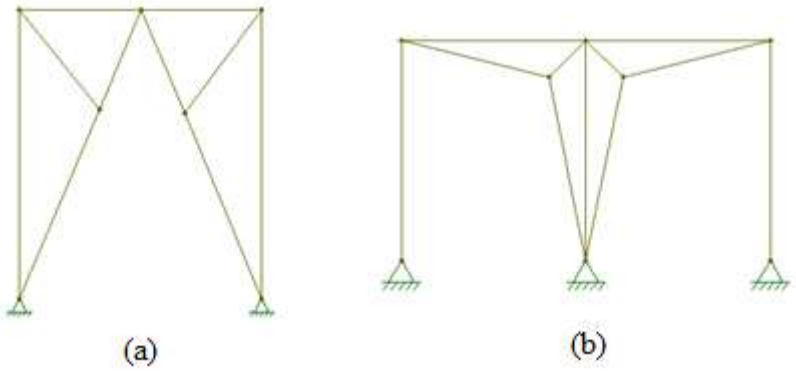

Figura 22 – (a) Contraventamento vertical em “K” e (b) contraventamento vertical em “Y”

2.2. Hangares em estruturas de aço

2.2.1. Contexto histórico

Em 1930 o dirigível LZ 127 Graf Zeppelin inicia viagem rumo ao Atlântico, saindo de Friedrichshafen para o Rio de Janeiro. Esta foi a primeira viagem transatlântica de um dirigível entre Alemanha e América do Sul. O sucesso destas viagens resultou na construção do primeiro hangar no bairro de Santa Cruz, no Rio de Janeiro, conhecido como “Hangar do Zeppelin” em 1936. Apesar disso, a última viagem aconteceu em 1937 e atualmente o hangar pertence à base aérea de Santa Cruz (Construção Metálica, 2009). O hangar a época acomodava com alguma facilidade quaisquer um dos dirigíveis que estavam operacionais. É orientado de norte para sul. A porta sul, a principal, abre-se em toda a extensão de largura e altura do hangar, sendo as

suas portas pesando 80 toneladas. No topo do hangar, existe uma torre de comando, instalada a 61 metros do solo, onde se avista toda área ao redor.

Construído na década de 1930, o hangar para abrigar o dirigível USS Macon é uma das maiores estruturas autônomas do mundo, tendo uma aérea coberta de 32.000 m². A composição da estrutura é feita por vigas de aço galvanizado e um dos marcos históricos do chamado, a partir de 1971, Vale do Silício, localizado no estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América. O hangar descrito tem um comprimento total de 345 metros e uma largura de 94 metros. Este hangar é em formato de abóboda com altura de 60 metros (Figura 23).

Figura 23 – Hangar do Dirigível USS Macon, Califórnia, EUA (Hangar 33, 2015)

O fim da era dos dirigíveis, entretanto, não significou a inutilização dos hangares. Pelo contrário, a necessidade crescente de aeronaves demandou a construção de mais edificações para a manutenção das mesmas. A seguir serão listados alguns hangares famosos no Brasil, como exemplos associados ao tema do presente trabalho.

2.2.2. Hangar Digex em São José dos Campos

Este hangar, pertencente a Digex, empresa de aviação, possui entrada para aeronaves de grande porte. A estrutura possui um comprimento total de 100 metros, vão livre de 64 metros e altura livre de 15 metros (Figura 24). Utilizou-se como solução para a cobertura estrutura treliçadas em perfis formados a frio.

Figura 24 – Hangar Digex, São José dos Campos (Dagnese, 2016)

2.2.3. Hangar de lavagem do Aeroporto Santos Dumont

Este hangar é destinado para lavagem de aeronaves da Força Aérea Brasileira e fica localizado no Aeroporto Santos Dumont, na aérea pertencente ao Terceiro Comando Aéreo Regional. O hangar possui uma área de cobertura de 700 m² e vence um vão de 30 metros, capaz de suportar uma sobrecarga de utilização de 0,25 kN/m², acrescidos de 0,15 kN/m² de eventuais cargas. A cobertura utiliza o sistema padronizado "Roll-on"© (Marko, 2017) que é um sistema de cobertura metálica para grandes vãos, integrando a estrutura e o telhado no mesmo produto com a cobertura sendo tratada como um conjunto e não em partes separadas (Figura 25).

Figura 25 – Hangar de Lavagem do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro, RJ (Construção Metálica, 2009)

2.2.4. Hangar do Aeroporto de Amarais em Campinas

Este hangar se situa em Campinas e serve para a manutenção de quatro aviões executivos de grande porte de forma simultânea. Possui uma área total de 1620 m², com 54 metros de vão livre e 8 metros de altura livre. A estrutura metálica do hangar em tela formado por pórticos que possuem as vigas e as colunas treliçadas em perfis formados a

frio. A estrutura da viga de cobertura é constituída também em perfis formados a frio, constituídos de perfis Z galvanizados (Figura 26).

Figura 26 – Hangar do Aeroporto de Amarais, Campinas, SP (Construção Metálica, 2009)

2.2.5. Hangar da Base Aérea do Galeão

O conjunto de dois hangares fica sediado na Base Aérea do Galeão, na Ilha do Governador, no Rio de Janeiro. Esses hangares foram construídos no ano de 1984 para abrigar as aeronaves Boeing 707-300, recém-incorporadas a Força Aérea Brasileira. Com a utilização de perfis dobrados, o hangar possui uma forma de arco com flecha de 21,5 metros e vão de livre de 66 metros. A área total deste hangar é de 8.600 m² e uma massa total de 310 toneladas, perfazendo um consumo de aço de 36 kg/m² (Figura 27).

Figura 27 – Hangar da Base Aérea do Galeão (Construção Metálica, 2009)

2.3. Parâmetros de avaliação de sistemas estruturais

O desempenho de uma estrutura metálica pode ser avaliado de diversas formas. Entretanto, a forma mais comum e mais utilizada é a avaliação da taxa de consumo de aço. Ressalta-se que parte dos trabalhos que tangem sobre consumo, refere-se ao termo peso de aço, mesmo utilizando unidade de massa. Este autor não utilizará o termo em peso, com unidades no sistema internacional, mas sim em massa, contudo referenciando como peso. O Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MD/SDI, 1989) ressalta que o consumo de aço em uma edificação depende da relação de custo entre o material e a mão-de-obra. Face ao exposto, o Manual apresenta alguns gráficos com a estimativa do consumo de aço para alguns tipos de galpões. Nessa análise são englobados todos os elementos constituintes de um galpão. Os galpões expostos são separados em galpões leves, que são os galpões comuns com ponte rolante com capacidade inferior a 5 toneladas; galpões médios, que estão incluídos todos os galpões comuns mas com ponte rolante com capacidade até 60 toneladas; e galpões pesados, com pontes rolantes com capacidade superior a 60 toneladas. Para estes tipos de galpões, o Manual conduz a consumos de aço da ordem de 300 a 900 kg/m². Para os galpões leves e médios, são apresentadas curvas de consumo de aço que variam em função do vão apresentado. Estes gráficos são apresentados nas Figuras 28 e 29.

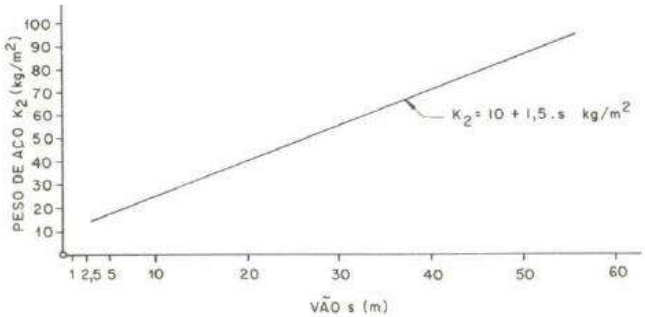

Figura 28 – Taxa de consumo de aço para galpões leves (MD/SDI, 1989)

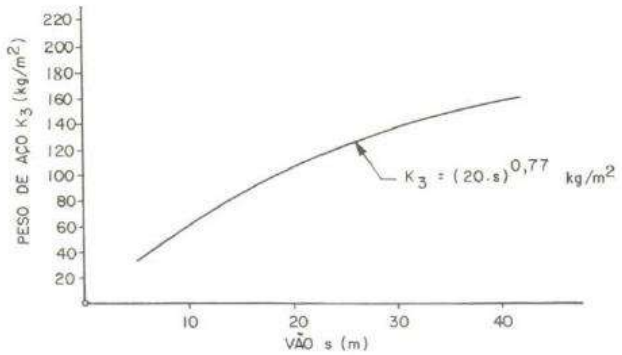

Figura 29 – Taxa de consumo de aço para galpões médios (MD/SDI, 1989)

Salienta-se também que o Manual (MD/SDI, 1989) conduz à estimativa de consumo de aço para hangares, escopo deste trabalho, em que os valores representativos de consumo de aço ficam em torno de 25 a 35 kg/m².

Cabe ressaltar, entretanto, que o consumo de aço descrito no Manual é baseado em edificações construídas na Europa, entre os anos de 1950 e 1965, sendo um período de transição, quando o aço ASTM A-36 foi introduzido no mercado.

Outro trabalho importante sobre avaliação de desempenho de sistemas estruturais foi o desenvolvido por D´Alambert (2005). Este estudo baseia-se em galpões formados por perfis laminados a quente abertos de alma cheia. Este trabalho leva em consideração uma variação de vão livre de 15 a 45 metros, com alturas de colunas de 6 a 12 metros e distância entre os pórticos de 6 e 12 metros, respectivamente. Além disso, são levados em consideração diversos fatores distintos para a ação do vento. O estudo de D´Alambert (2005) leva em consideração na taxa de consumo de aço, o peso dos pórticos principais, o peso das placas de base e das chapas de ligação, além do consumo de aço dos contraventamentos, sejam verticais ou horizontais. Na Figura 30 pode ser observada a curva de consumo de aço para galpões com altura e distância entre pórticos de 6 metros. É importante salientar que esse estudo não leva em consideração o peso do fechamento lateral que pode variar de 6 a 12 kg/m².

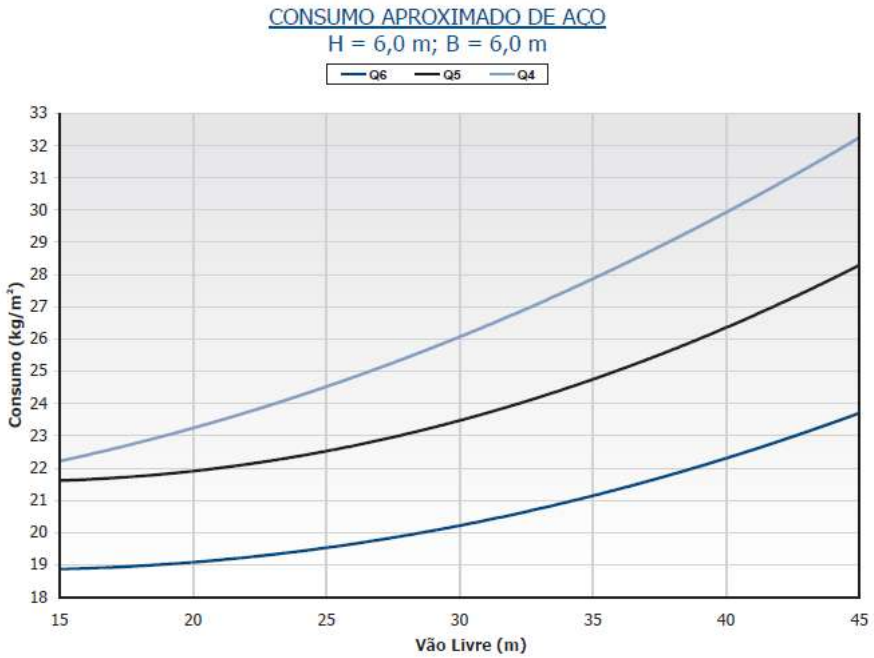

Figura 30 – Consumo aproximado de aço para galpões com perfis de alma cheia (D´Alambert, 2005)

Outros estudos importantes sobre avaliação de sistemas estruturais são citados a seguir. Chaves (2007) mostra um estudo para avaliação de soluções estruturais para galpões industriais leves, variando os vãos de 16 a 32 metros, com colunas de 6 metros e velocidade básica do vento de 30 m/s. Neste trabalho foram utilizados cinco modelos estruturais distintos, utilizando as seguintes tipologias: pórtico de alma cheia; pórtico com treliça em arco; pórtico com treliça de banzos paralelos; pórtico com treliça trapezoidal; pórtico com treliça triangular.

No estudo de Chaves (2007), foi levado em consideração para o cálculo de consumo de aço o peso do pórtico principal. Os valores do peso dos contraventamentos foram estimados. O autor utiliza dois tipos de perfis para a constituição da cobertura: cantoneira dupla e perfis tipo T eletro-soldado. A Figura 31 apresenta os resultados da taxa de consumo de aço para as tipologias de pórticos transversais, em função do vão livre e variação da composição das vigas de cobertura.

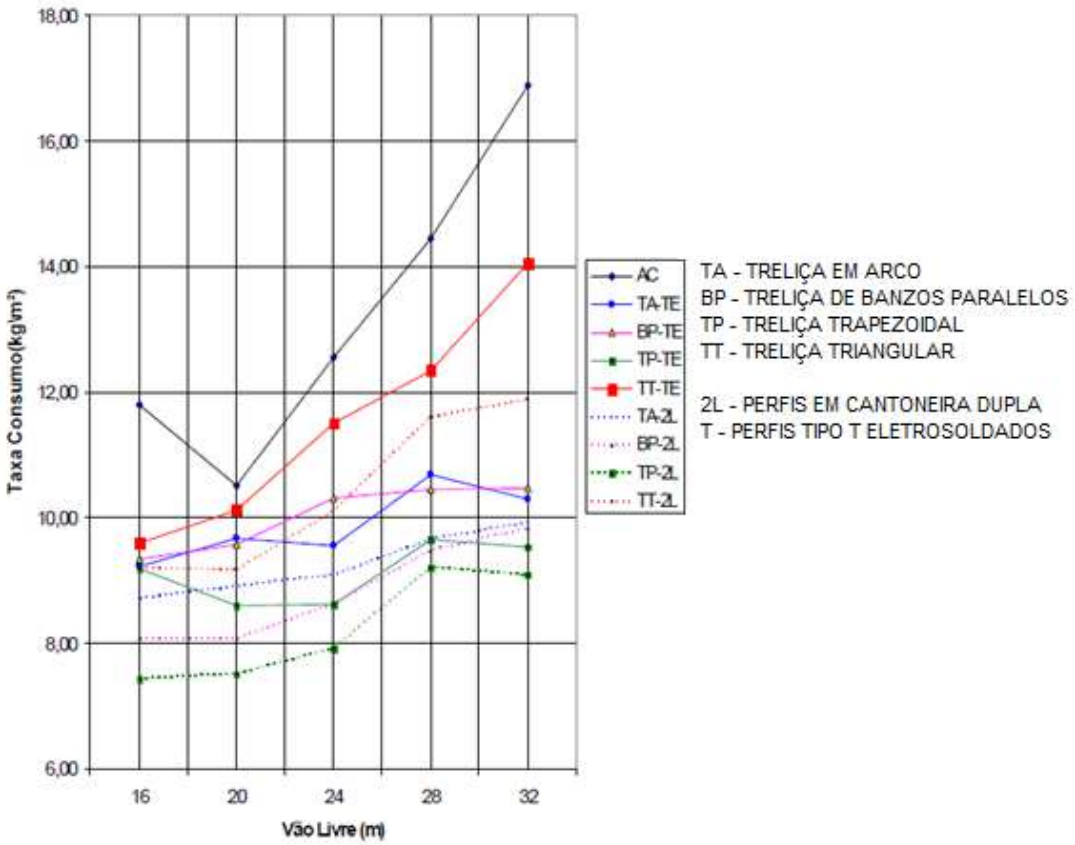

Figura 31 – Resultados da taxa de consumo de aço (Adaptado de Chaves, 2007)

Observa-se na figura 31 que as taxas de consumo de aço em modelos com a cobertura compostas em perfis com cantoneiras duplas são sempre inferiores aos constituídos de perfis eletro-soldados. Os modelos com pórtico de alma cheia apresentam os maiores consumos para todos os vãos (AC) e o pórtico com treliças trapezoidal (TP) apresenta o melhor resultado dentre todos os modelos descritos. Verifica-se ainda que em todos os modelos conforme se aumentam os vãos, aumenta-se o consumo de aço. Esta tendência é melhor visualizada no modelo com pórticos de alma cheia (AC).

Nogueira (2009) mostra um estudo para avaliação de soluções estruturais para galpões industriais leves constituídos de perfis formados a frio (PFF). Neste estudo, utilizou-se uma variação de vãos de 16 a 32 metros, com colunas de altura de 6 metros e distâncias entre pórticos de 6, 7,5 e 9 metros de comprimento. Outra variação foi a utilização de três velocidades distintas para o vento: 30, 35 e 40 m/s. Ao todo, este estudou apresentou 245 modelos a serem analisados, uma vez que além dos 225

modelos a partir dos parâmetros apresentados, gerou-se 20 modelos levando em consideração a utilização de bases engastadas.

Os modelos estruturais apresentados no estudo de Nogueira (2009) foram os seguintes pórticos: pórtico de alma cheia, pórtico com treliça em arco, pórtico com treliça em banzos paralelos, pórtico com treliça trapezoidal e pórtico com treliça triangular, perfazendo os mesmos modelos analisados por Chaves (2007).

Os perfis utilizados na treliça de cobertura deste estudo foram perfis U formados a frio nos banzos, nas diagonais e nos montantes, como pode ser visto na Figura 32.

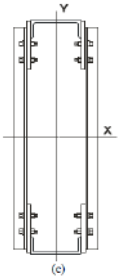

Figura 32 – Seção transversal de vigas treliçadas (Nogueira, 2009).

Após verificar o consumo de aço para todos os modelos descritos, Nogueira (2009) comparou os seus resultados com os modelos entre bases engastadas e rotuladas, verificando-se então que a taxa de consumo de aço para os modelos com bases engastadas ficam menores que os modelos constituídos com bases rotuladas. Na Figura 33, pode ser vista a variação da taxa de consumo de aço global para as tipologias estudadas, levando em consideração a velocidade básica do vento de 35 m/s e altura da coluna de 6,0 metros.

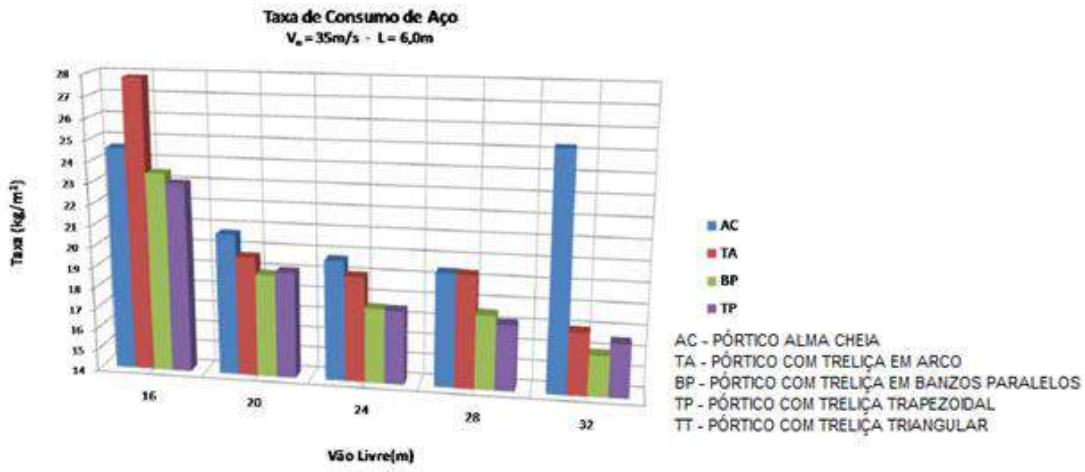

Figura 33 – Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre (Nogueira, 2009)

Em seguida, Nogueira (2009) realizou um estudo comparativo dos seus resultados com os resultados obtidos por D´Alambert (2005), levando em consideração os diferentes tipos de vinculação com as bases, engastado e rotulado. A comparação foi feita com o modelo de pórtico de alma cheia, estudo também realizado por D´Alambert (2004), sendo que, para este, os perfis utilizados foram os laminados a quente de seção aberta. Foi verificado que a taxa de consumo de aço para modelos com base engastada no estudo de Nogueira (2009) é bem menor que a do estudo de D´Alambert (2005), conforme registrado na Figura 34.

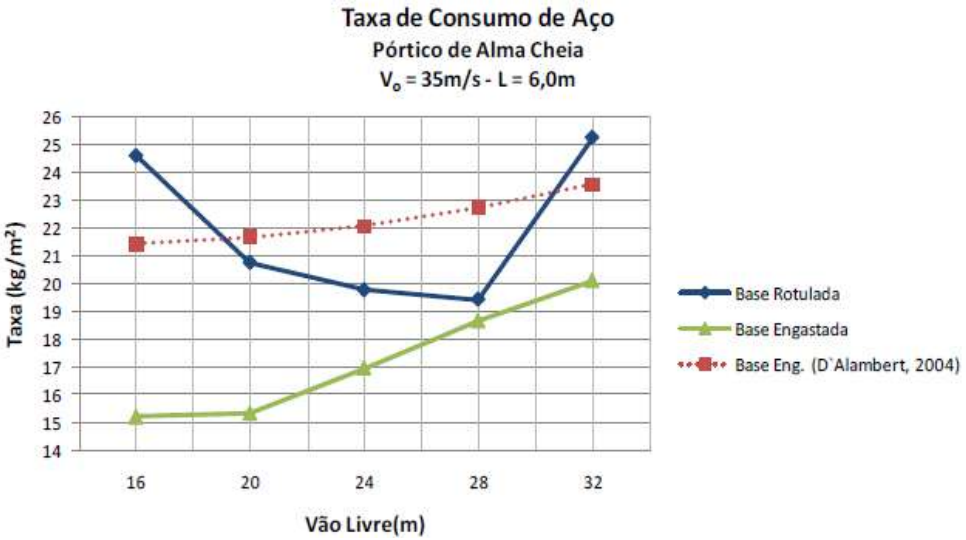

Figura 34 – Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de D´Alambert (2005) para pórticos de alma cheia (Nogueira, 2009)

Por fim, Nogueira (2009) faz uma análise comparativa da taxa de consumo de aço dos seus modelos com os modelos analisados por Chaves (2007), admitindo as duas opções diferentes de vinculações, com espaçamento entre pórticos de 6 metros e velocidade básica do vento de 35 m/s. Esta comparação pode ser vista na Figura 35.

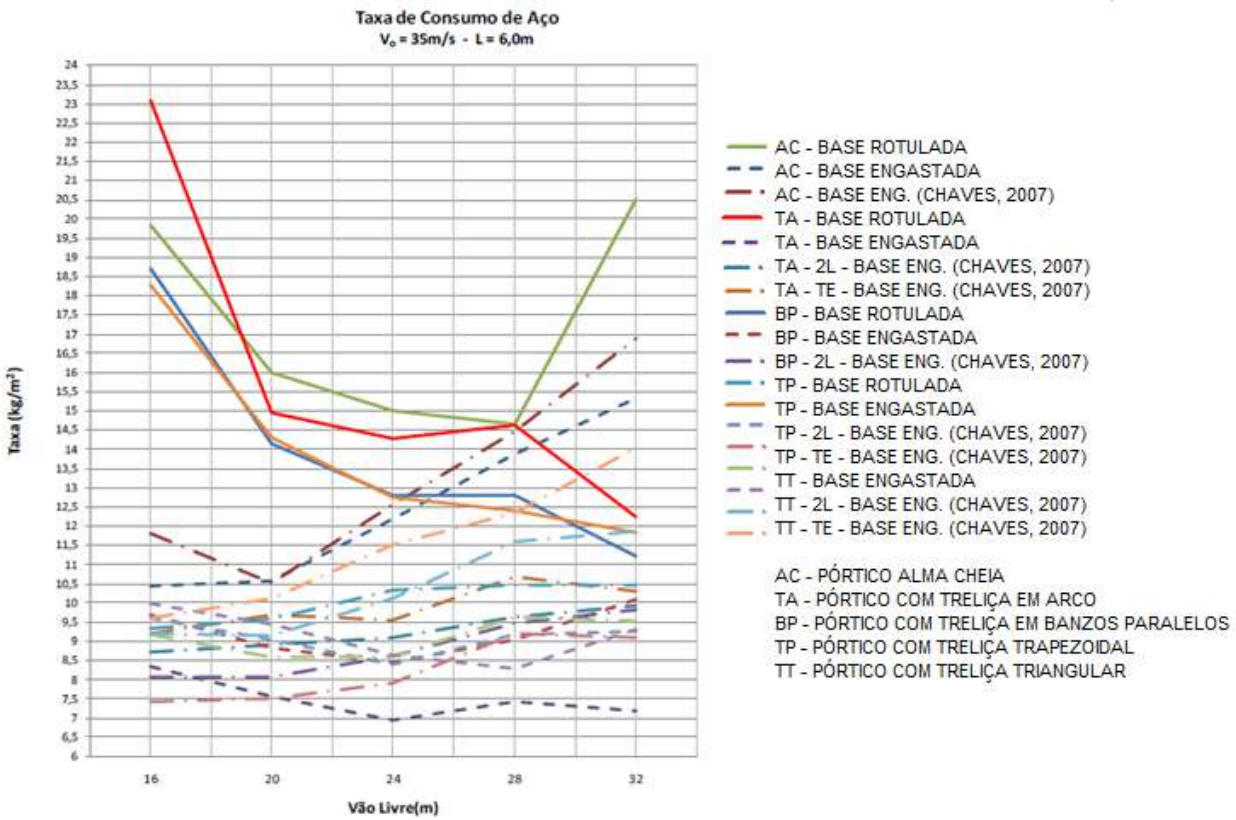

Figura 35 – Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de Chaves (2007) (Adaptado de Nogueira, 2009)

Como conclusão de seu estudo Nogueira (2009) verificou numa análise comparativa sobre as taxas de consumo de aço com pórticos constituídos de perfis formados a frio e com perfis laminados, que os primeiros apresentam um bom desempenho, justificando a sua utilização em projetos de galpões industriais leves.

Nos estudos vistos anteriormente foram apresentadas soluções estruturais para os pórticos e a análise da solução estrutural das terças ficou em segundo plano. Vieira (2009) apresentou um estudo comparativo entre soluções de terças utilizadas em coberturas de médio e grande porte, com vãos de até 40 metros, abordando terças constituídas de perfis laminados e perfis formados a frio, além de terças treliçadas em perfis abertos e tubulares (*steel joist*). Os resultados deste estudo podem ser vistos na Figura 36.

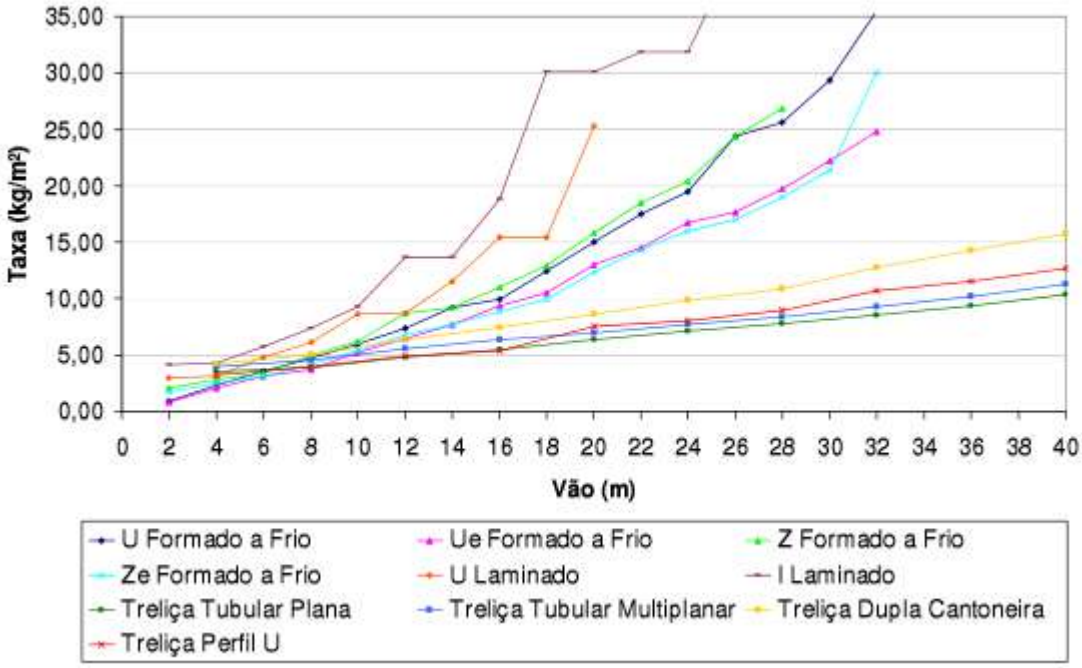

Figura 36 – Taxa de consumo de aço das terças (Vieira, 2009)

Nesta análise Vieira (2009) destaca que, realizando uma comparação entre peso e custo, para vãos inferiores a 8 metros, recomenda-se a utilização de perfis formados a frio. Para vãos superiores a 16 metros é recomendada a utilização das terças treliçadas e a partir de 32 metros a melhor solução é a treliça tubular plana (*steel joist*).

2.4. Estruturas tubulares em aço

2.4.1. Breve histórico

A utilização dos tubos de aço tem origem na segunda revolução industrial a qual se deu início no século XIX quando o desenvolvimento da siderurgia abriu espaço para a transformação do aço em perfis e tubos.

No Brasil, segundo Araújo *et al*. (2016), no ano de 1954 foi inaugurada a Usina Integrada do Barreiro, em Belo Horizonte. O objetivo desta usina era atender a demanda de tubos de aço sem costura por parte da indústria petroleira, que estava em amplo desenvolvimento. Mesmo estando disponível no mercado, a sua utilização para a construção civil era de certa forma insignificante.

A partir do ano 2000 observou-se um crescente impulso na utilização das estruturas tubulares na construção civil nacional. Foi desenvolvida pela Vallourec uma linha de perfis tubulares utilizadas para a construção convencional com tensão de escoamento de 200, 250 e 350 MPa, resistente a corrosão (aços patináveis).

Nas Figuras 37 e 38 podem-se ver algumas aplicações de estruturas tubulares na construção civil.

Figura 37 – Galpão Valourec Minas Gerais (Araújo *et al*., 2016)

Figura 38 – Aeroporto de Guararapes Recife (Araújo *et al*., 2016)

2.4.2. Aplicações das estruturas tubulares em aço na construção civil

É sabido que a utilização de seções tubulares traz soluções mais leves para as estruturas, levando a soluções com menores consumo de material.

Os perfis tubulares apresentam algumas vantagens em relação aos perfis abertos. Pode-se citar a boa resistência aos esforços de compressão, pelos motivos apresentados anteriormente. Além disso, as seções tubulares, principalmente as de seção circulares, são mais resistentes aos esforços de torção. Ressalta-se também que apresentam uma área de superfície menor quando comparada as de seções abertas, levando a um custo menor para material de proteção contra incêndio e pintura.

Os perfis tubulares são oferecidos pela indústria nacional com seção circular, quadrada e retangular, com ou sem costura. Os perfis circulares são laminados a quente e os quadrados e retangulares conformados a frio.

De acordo com Araújo *et al.* (2016) as seções circulares tem uma distribuição homogênea de massa em torno do eixo longitudinal. Isso resulta em propriedades geométricas iguais em relação a qualquer eixo que passe pelo centro geométrico da seção transversal. Com isso apresenta resistência idêntica em qualquer plano, fazendo com que a barra tenha um bom aproveitamento de sua capacidade resistente. Graças a essa propriedade, o momento de inércia de um tubo de seção transversal circular é cerca de 1,8 vez superior e o raio de giração 1,4 vez maior aos equivalentes perfis H de mesma massa.

Os tubos também podem ser preenchidos com concreto, fazendo com que o aço e o concreto trabalham de forma solidária. Esse tipo de composição é chamado de pilar misto e eventualmente podem ser adicionadas armaduras. Esse tipo de composição pode ser visto na Figura 39, sendo extremamente competitivo em edifícios altos.

Figura 39 – Pilar misto de aço e concreto (Araújo *et al.*, 2016)

2.4.3. Treliças constituídas de perfis tubulares

Segundo Mendanha *apud* Wardernier (2000), as treliças constituídas de perfis tubulares apresentam uma maior capacidade de vencer vãos, com o menor número de nós, tornando assim o custo de fabricação reduzido. Nesse tipo de treliça com perfis tubulares, o consumo é reduzido em cerca de 50% para os banzos comprimidos, 30% para os banzos tracionados e cerca de 20% para os montantes e diagonais, comparadas com as treliças em perfis abertos.

A solução por treliças planas em perfis abertos, devido à sua esbeltez elevada, necessita que os banzos comprimidos sejam contidos lateralmente por intermédio de contraventamentos. Contudo, em treliças planas compostas por perfis tubulares o número de contenção lateral pode cair, levando a redução do consumo, devido ao fato dos perfis tubulares funcionarem melhor à compressão do que os perfis de seção aberta.

Já as treliças espaciais proporcionam estabilidade lateral maior quando comparada às treliças planas. Isso faz com que esse tipo de estrutura seja empregado sem a necessidade de contenções laterais. Na Figura 40 pode ser observada uma treliça espacial composta de perfis tubulares.

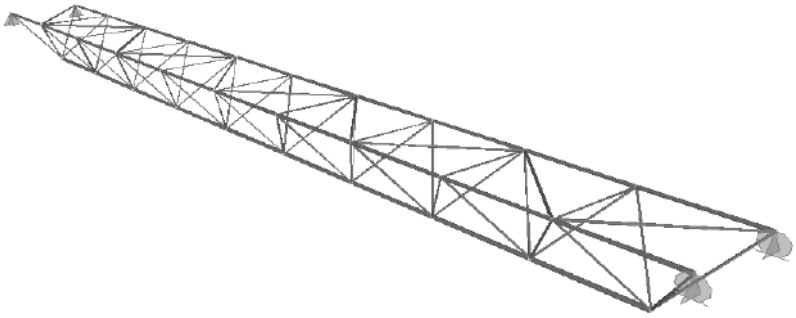

Figura 40 – Treliça Espacial composta por perfis tubulares (Vieira, 2009)

2.4.4. Ligações em sistemas treliçados constituídos de perfis tubulares

Diversos tipos de ligações foram desenvolvidos, de modo que fossem simplificados os métodos executivos de fabricação e montagem com desempenho satisfatório.

Para ligações em treliças planas é utilizada comumente a ligação com placa Gusset, onde as extremidades dos perfis tubulares são soldadas diretamente na placa. (Mendanha, 2006). Esse tipo de ligação pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 – Ligação com placa Gusset (Santos, 2003)

Para treliças espaciais, uma ligação muito comum é a formada por perfis tubulares com as extremidades estampada, fazendo a ligação entre as barras por intermédio de parafusos (Figura 42). Esse tipo de ligação possui uma grande facilidade na sua montagem, contudo, de acordo com Mendanha (2006), estudos mostraram que há uma redução significativa na resistência à compressão das barras, à medida que se vai reduzindo a esbeltez nas suas extremidades.

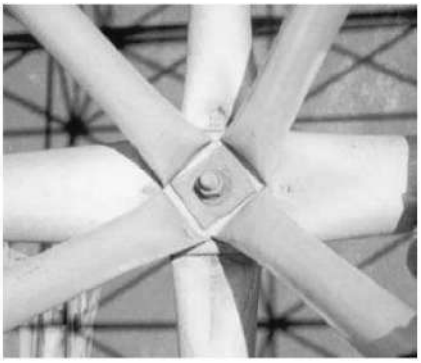

Figura 42 – Ligação com extremidade estampada (Pedreira, 2012)

Um outro sistema conhecido e difundido para ligação de treliças espaciais é o sistema MERO (Figura 43). Este sistema consiste em barras de seção circular as quais são conectadas por parafusos em suas extremidades através de uma peça de ligação, assim os parafusos são torqueados nas peças, garantindo então a transferência dos esforços entre as barras. (Pedreira, 2012)

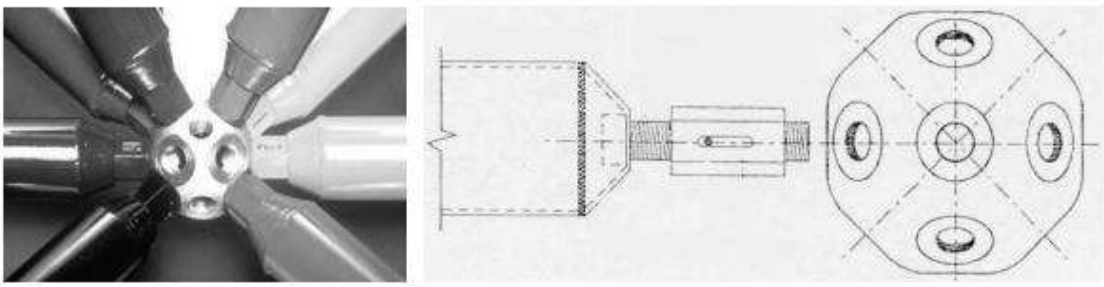

Figura 43 – Sistema MERO (Pedreira, 2012)

3. Estudo das variáveis de projeto

3.1. Considerações iniciais

Levando em consideração o objetivo da avaliação de soluções estruturais para hangares de grandes vãos, será realizado um estudo de variáveis de projetos, considerando sistemas estruturais comumente utilizados em hangares. Este estudo deverá permitir uma comparação da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais, das terças e dos sistemas de contraventamento, além da resposta estrutural dos modelos que serão analisados.

Para a obtenção da taxa de consumo de aço para cada modelo estrutural será necessário realizar as etapas de um anteprojeto de estruturas metálicas, que são: consideração das ações, análise e dimensionamento estrutural. Este capítulo será dedicado à apresentação do desenvolvimento do estudo de parametrização dos diversos modelos utilizados, definindo assim os critérios para a concepção dos hangares.

3.2. Critérios do estudo das variáveis de projeto

Para o estudo foram levados em consideração os seguintes fatores:

- Tipologia do pórtico com vãos variados e com espaçamento entre pórticos distintos;
- Tipologia das terças;
- Tipologia dos contraventamentos horizontais e verticais;
- Opções para uso de perfis laminados abertos e tubulares;
- Verificação do estado limite de serviço (deslocamentos) e verificação do estado limite último.

Como características básicas do projeto, foram utilizados os seguintes valores:

- Vãos de 70, 80, 90 e 100 metros;
- Distância entre pórticos de 5 e 10 metros;
- Altura da coluna de 12 metros;
- Comprimento total do hangar de 100 metros.

Ressalta-se que para o objetivo de avaliar a influência da solução estrutural para hangares e levando em consideração que os pórticos planos são repetidos em toda a edificação, o estudo em tela se concentrará na avaliação dos pórticos principais e na avaliação da solução das terças e da avaliação do sistema de contraventamento. Na Figura 44, pode-se ver um exemplo de representação isométrica do hangar em estudo.

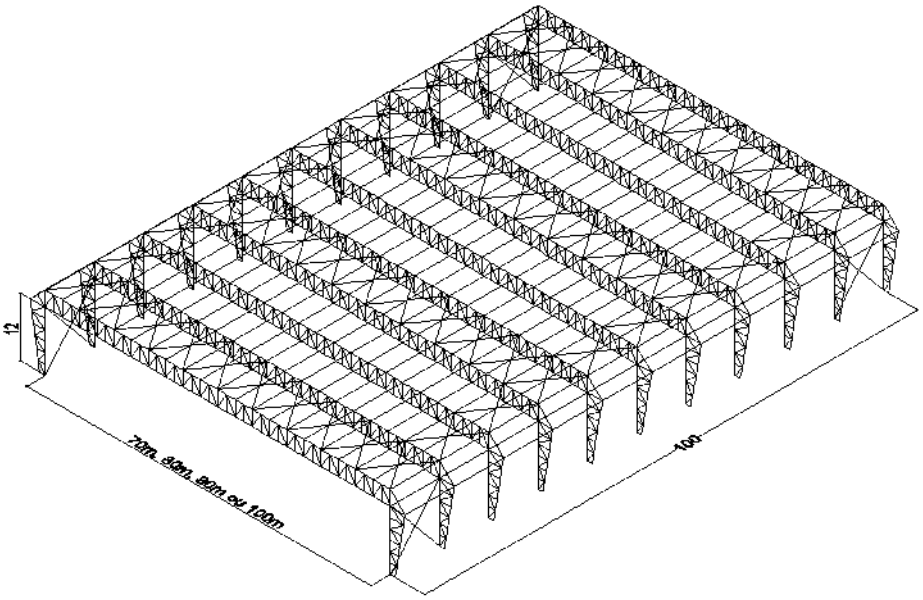

Figura 44 – Exemplo de representação isométrica do hangar em estudo e dimensões adotadas no estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho serão adotadas três tipologias diferentes para os pórticos planos com quatro vãos distintos, usando duas dimensões diferentes de espaçamento entre os pórticos. Serão avaliadas as mesmas tipologias em perfis laminados abertos e em perfis tubulares, sem levar em consideração a avaliação das soluções para terças e contraventamento. Na Tabela 1 podem ser vistas as tipologias a serem consideradas com os respectivos vãos. As tipologias são as seguintes:

- AR – Pórtico constituído de perfis abertos com a cobertura de treliça reta.
- AI – Pórtico constituído de perfis abertos com a cobertura de treliça com banzos inclinados.
- AA – Pórtico constituído de perfis abertos com a cobertura de treliça em arco.
- TR – Pórtico constituído de perfis tubulares com a cobertura de treliça reta.
- TI – Pórtico constituído de perfis tubulares com a cobertura de treliça com banzos inclinados.
- TA – Pórtico constituído de perfis tubulares com a cobertura de treliça em arco.

Para diferenciar a distância entre os pórticos, será utilizado um traço e um número detalhando esta distância, letras representando a solução de terças da cobertura e letra representando a tipologia de contraventamento vertical utilizada.

As soluções de terças possuem a seguinte nomenclatura:

- U – Terças em perfis laminados aberto do tipo "U"
- TS – Terças em perfis soldados do tipo "I"
- SJ – Terças em *Steel Joist*
- R – Terças em perfis tubulares retangulares

As soluções de contraventamento possuem a seguinte nomenclatura:

- X – Contraventamento em forma de "X"
- K – Contraventamento em forma de "K"
- Y – Contraventamento em forma de "Y"

Tem-se, por exemplo, o modelo AR70-5-U-X, representando um pórtico constituído de perfis abertos com a cobertura tipo treliça reta, vão de 70 metros, espaçamento entre pórticos de cinco metros, terças em perfil "U" e contraventamento vertical em forma de "X".

Tabela 1 – Nomenclatura dos modelos estruturais do trabalho

	70 metros	**80 metros**	**90 metros**	**100 metros**
AR	AR70	AR80	AR90	AR100
AI	AI70	AI80	AI90	AI100
AA	AA70	AA80	AA90	AA100
TR	TR70	TR80	TR90	TR100
TI	TI70	TI80	TI90	TI100
TA	TA70	TA80	TA90	TA100

Para o pórtico em treliça reta com o vão de 70 metros, foi adotada uma altura da viga de 3,0 metros, usando assim uma relação aproximada de L/23 a qual será seguida para os vãos de 80, 90 e 100 metros. Este valor foi escolhido seguinte o seguinte roteiro: inicialmente foi escolhida a relação L/40, pois a relação L/10 proposta por Bellei (2010) deixaria a viga com grandes dimensões, não usuais em projetos. Em seguida, foram verificados perfis que atendiam somente ao peso próprio e, a seguir, inseridos os carregamentos para verificação do estado limite último. Finalmente, foi verificado o

estado limite de serviço. Como as flechas no centro do vão ficaram maiores que as admissíveis, a altura da viga foi sendo aumentada, até atender os critérios normativos para deslocamentos. Lembra-se ainda que, neste trabalho, não foi considerada a contra flecha de fabricação e montagem. Este modelo pode ser visto na Figura 45.

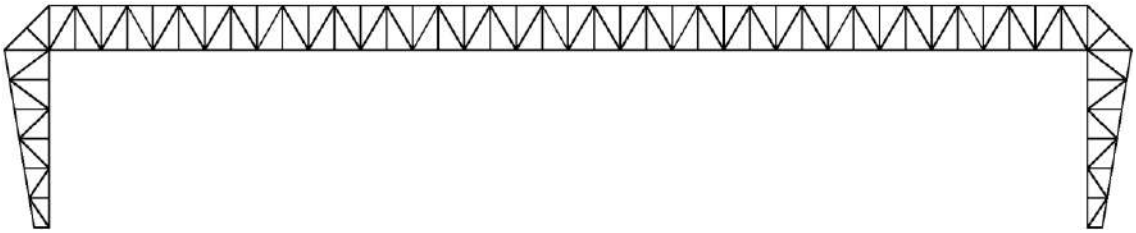

Figura 45 – Representação do pórtico com a cobertura em treliça reta

Para o pórtico com banzos inclinados e com o vão de 70 metros, foi adotada uma altura de viga de 2,6 metros, usando assim uma relação menor que para a treliça reta, de L/26, aproximadamente, uma vez que a inclinação dos banzos compensam as flechas existentes na cobertura composta com treliça reta, não necessitando assim de dimensões iguais ou maiores que o modelo citado. A inclinação dos banzos foi mantida em 10% todos os vãos, usual para edificações industriais. Este modelo pode ser visto na Figura 46.

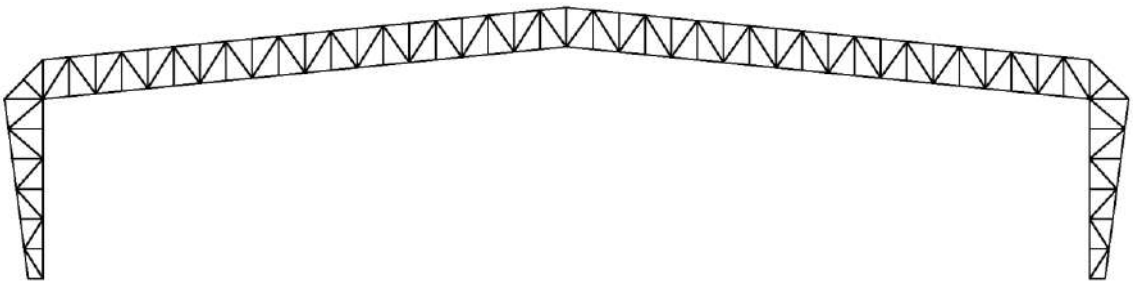

Figura 46 – Representação do pórtico com a cobertura em treliça de banzos inclinados.

Para o pórtico em arco e com o vão de 70 metros, foi adotada inicialmente uma altura da treliça do arco de 1,75 m, usando assim uma relação de L/40, conforme sugerido por Sales *et al.* (2013) para grandes vãos. Contudo, com a utilização desta recomendação, os valores dos deslocamentos no centro do vão ficaram excessivos, se comparados as tipologias anteriores, mas, ainda assim, respeitando os limites da NBR 8800/08. Para compatibilizar os deslocamentos deste modelo com os demais neste

trabalho (modelo com viga de cobertura reta e inclinada), a altura foi substituída para 2,25 m (relação aproximada de L/30). A flecha do arco teve um valor adotado de 3,5 metros, uma vez que o valor sugerido por Sales *et al.* (2013), de L/6 a L/5, conduziria um valor não usual (excessivo) para grandes vãos. As relações de altura da treliça e flecha foram mantidas para todos os vãos. As soluções em arco não serão constituídas de perfis calandrados, mas sim com perfis retos ligados por chapas *gusset* a cada nó. Este modelo pode ser visto na Figura 47.

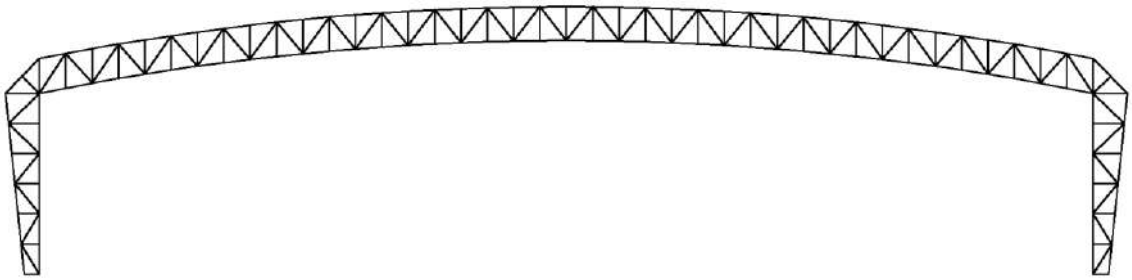

Figura 47 – Representação do pórtico com a cobertura em treliça em arco

As dimensões dos pilares do pórtico acompanham proporcionalmente o aumento do vão e da altura da treliça da cobertura para todos os modelos. A distância entre os perfis da base é de 1,0 m (a critério do autor) e a distância entre os perfis do topo é de 3,0 m. Para a cobertura em treliça de banzos inclinados, a distância entre os perfis da base é de 1,0 m e a distância entre os perfis do topo é 2,6 m e para a cobertura em arco, as distâncias ficaram entre 1,0 m e 2,25 m. Essas dimensões são para os modelos com vão L = 70 m.

O espaçamento entre os montantes da treliça de todos os modelos foi fixado em 1,75 m e o espaçamento entre as terças em 3,5 m para o vão L = 70 m. Fez-se representar que as treliças de todos os vãos houvesse um número de quarenta e um montantes. As dimensões da parametrização dos modelos utilizados neste trabalho são apresentadas nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Dimensões dos modelos com treliça reta

Vão (m)	Altura da Coluna (m)	Coluna Base Inferior (m)	Coluna Base Superior (m)	Altura da Treliça da Cobertura (m)	Espaçamento entre os montantes (m)
70	12	1,0	3,0	3,0	1,75
80	12	1,2	3,5	3,5	2,00
90	12	1,3	4,0	4,0	2,25
100	12	1,5	4,5	4,5	2,5

Tabela 3 – Dimensões dos modelos com treliça de banzos inclinados

Vão (m)	Altura da coluna (m)	Coluna Base Inferior (m)	Coluna Base Superior (m)	Altura da Treliça da Cobertura (m)	Espaçamento entre os montantes (m)
70	12	1,0	2,6	2,6	1,75
80	12	1,2	3,0	3,0	2,00
90	12	1,3	3,4	3,4	2,25
100	12	1,4	3,8	3,8	2,5

Tabela 4 – Dimensões dos modelos com treliça em arco

Vão (m)	Altura da Coluna (m)	Coluna Base Inferior (m)	Coluna Base Superior (m)	Altura da Treliça da Cobertura (m)	Espaçamento entre os montantes (m)	Flecha do Arco (m)
70	12	1,0	2,25	2,25	1,75	3,5
80	12	1,2	2,65	2,65	2,0	4,1
90	12	1,3	2,90	2,90	2,25	4,5
100	12	1,4	3,30	3,30	2,5	5,1

Para atender os espaçamentos estabelecidos entre terças, são necessárias telhas que atendam a este espaçamento entre apoios. Para isso, foi escolhida para o cálculo telhas do tipo trapezoidal MF100 da Metform® (Metform, 2015).

Nas Figuras 48 a 50 apresentam-se as distintas tipologias dos pórticos com suas respectivas representações de dimensões adotadas neste estudo de parametrização dos modelos.

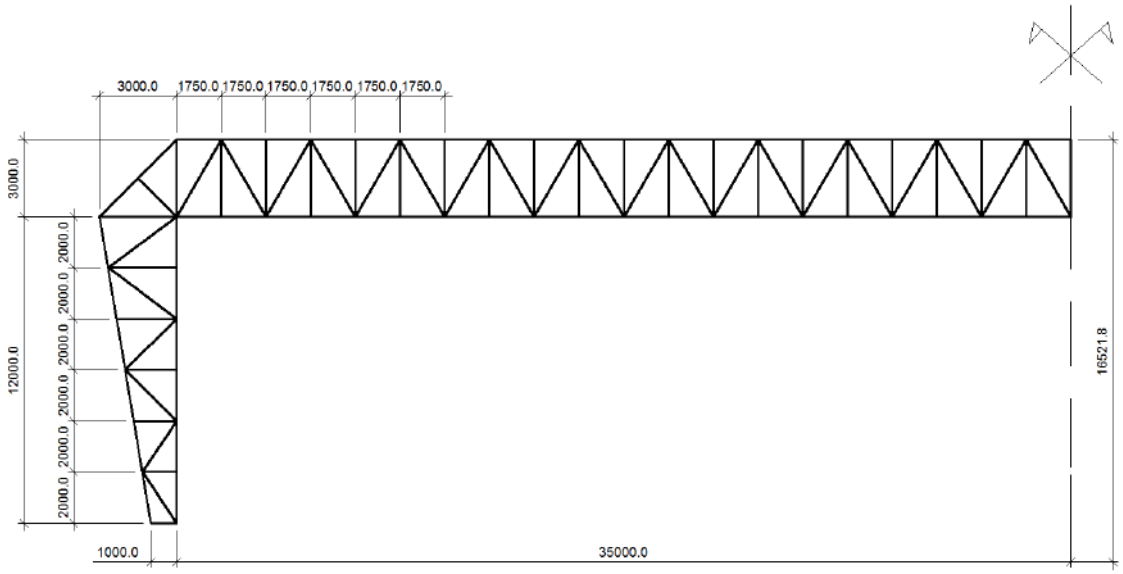

Figura 48 – Dimensões das seções dos modelos com cobertura reta para o vão L = 70 m (Ver Tabela 2)

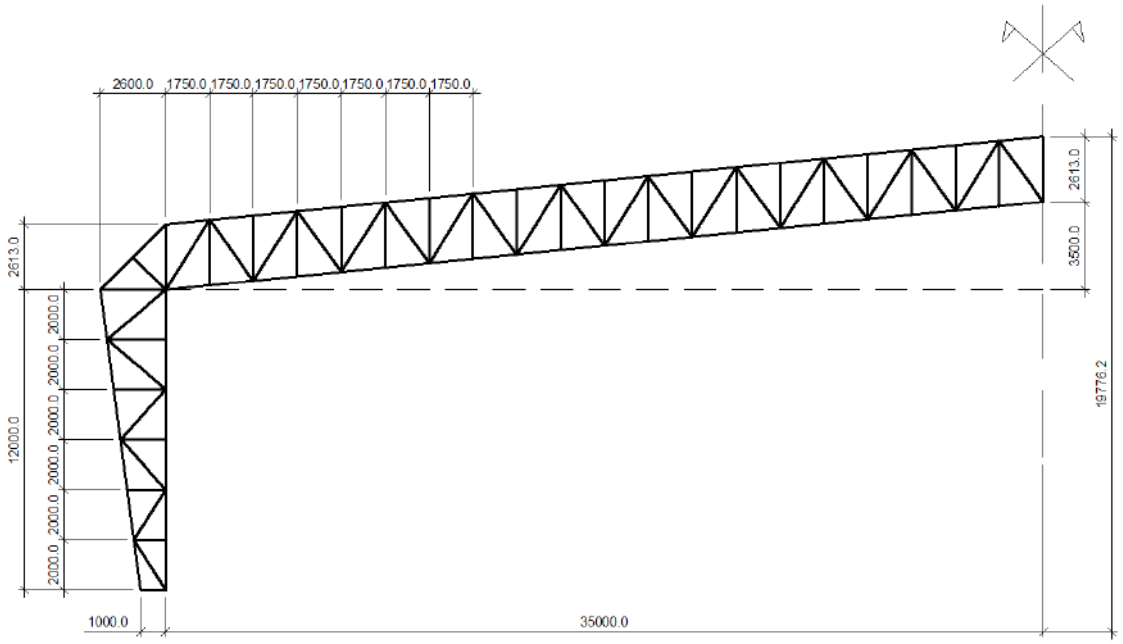

Figura 49 – Dimensões das seções dos modelos com cobertura de banzos inclinados para o vão L = 70 m (Ver Tabela 3)

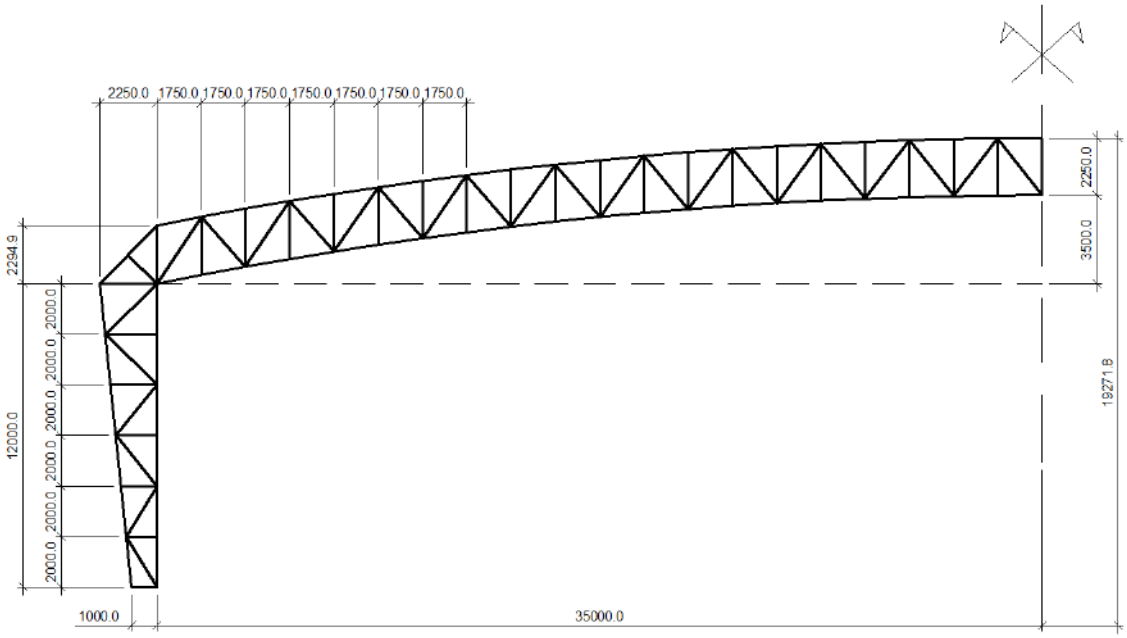

Figura 50 – Dimensões das seções dos modelos com cobertura em arco para o vão L = 70 m (Ver Tabela 4)

3.2. Composição das seções transversais

3.2.1. Seções transversais em perfis abertos

Para a composição das coberturas, nos três modelos constituídos de perfis laminados abertos, foi utilizada uma composição de dois perfis "U" na treliça de cobertura, de diferentes dimensões comerciais, representado na Figura 51. Para os pilares, foram utilizados perfis de seção múltipla e com seção variável, indicado na Figura 52.

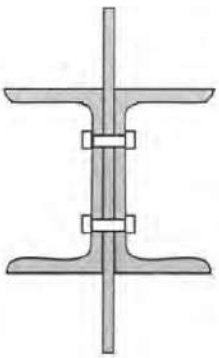

Figura 51 – Composição adotada de perfis "U" para a cobertura das treliças. (Pfeil, 2011)

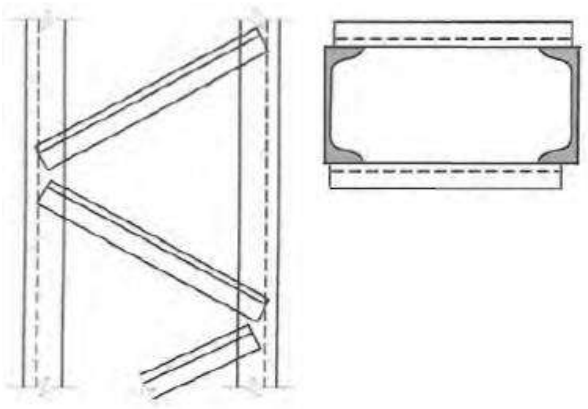

Figura 52 – Composição adotada de perfis “U” com cantoneiras para pilares (Pfeil, 2011)

Para seções que não atenderam às solicitações e onde não se justificava o aumento de seção para não alterar a continuidade da barra, como nos banzos, por exemplo, foram utilizados perfis com reforço de chapa nas mesas.

Os perfis foram escolhidos utilizando o seguinte critério: foram dimensionados nos modelos com vão de 70 metros e espaçamento entre os pórticos de 5 metros, os perfis que atendem somente a ação permanente de peso próprio. A partir desta situação, foram acrescentadas as demais cargas permanentes e variáveis e as solicitações devidas ao vento, e em seguida, foram trocados os perfis que eventualmente não atendiam aos critérios normativos para o estado limite último. Ao mudar o espaçamento entre os pórticos para 10 metros e aumentando o vão livre dos modelos, os perfis foram necessitando de reforços ou a troca por uma família acima.

Por critério do autor, nesta fase, os modelos com vãos de 70 metros e espaçamento entre pórticos de 5 metros não tiveram perfis reforçados. Ou seja, quando algum perfil não atendia à solicitação, o mesmo era trocado por um imediatamente superior. Na ausência de perfil com espessura superior na mesma família, foram utilizadas chapas de até 1/2’’ para reforço das mesas. Quando nem o reforço era suficiente, foi utilizada a troca de família de perfil para um imediatamente acima.

Como critérios básicos para manter uma parametrização entre os modelos, foram selecionados perfis com a mesma dimensão para os banzos superiores e inferiores, para diagonais, para montantes, para os nós do pórtico e para os pilares.

3.2.2. Seções transversais em perfis tubulares

Para a composição das coberturas, nos três modelos constituídos de perfis tubulares, foram utilizados tubos quadrados na treliça de cobertura. Para os pilares, foram utilizados perfis treliçados com seção variável, indicado na Figura 53, utilizando também perfis tubulares quadrados (TQ).

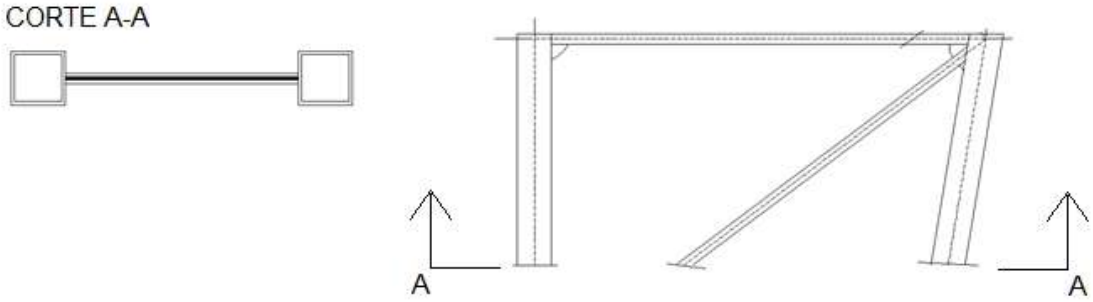

Figura 53 – Composição de perfis tubulares para colunas compostas

Os perfis para os modelos foram escolhidos utilizando os mesmos critérios vistos em 3.2.1. Contudo, como a gama de perfis tubulares por família (dimensão do perfil com espessuras distintas) é maior que dos perfis abertos, não foi considerado reforço de chapa, visto que o aumento da espessura ou do tamanho do perfil não justificava tal recurso.

No que se refere à montagem e transporte das peças para a composição dos elementos estruturais, nos modelos com vão de 70 metros, adotou-se a divisão em oito partes iguais, cada uma com 8,75 m de comprimento. Com isso, é necessário adotar tubos com espessuras iguais para facilitar a fabricação e posterior montagem. A parte relacionada à montagem dessas peças pode ser vista no capítulo 6.

Para a escolha dos tubos, foram utilizados critérios semelhantes ao caso dos perfis abertos. Foram dimensionados os modelos com vão de 70 metros e espaçamento entre pórticos de 5 metros, adotando perfis que atendem somente ao peso próprio. Em seguida, foram acrescentados os demais carregamentos e trocados os perfis, seguindo o critério apresentado anteriormente, de facilitação da montagem de tubos com diferentes espessuras. Ao mudar o espaçamento entre pórticos para 10 metros e aumentando o vão livre dos modelos, foram sendo trocados os tubos, de acordo com os resultados dos dimensionamentos estruturais.

3.3. Critérios para composição das terças

3.3.1. Terças em perfis laminados abertos

Para a escolha da composição das terças nos modelos estruturais, foram escolhidos três tipos de soluções: perfil “U” laminado, perfil “I” soldado e solução em *Steel Joist*. Em uma análise inicial, concluiu-se que os perfis “I” soldados ficavam possuíam um consumo de aço elevado para as tipologias estruturais com espaçamento entre pórticos de 5 metros. Para o desenvolvimento da análise dos perfis *Steel Joist*, de acordo com D´Alambert (2007), esse tipo de composição somente é utilizada para espaçamento entre pórticos a partir de 6 metros, motivo pelo qual também foi descartado. Com isso o modelo com espaçamento entre pórticos de 5 metros foi concebido com terças “U” laminado.

Para as tipologias com espaçamento entre pórticos de 10 metros, a utilização do perfil “U” laminado foi descartada, pois nenhuma seção atendia aos critérios de dimensionamento da NBR 8800/2008 para este vão. Com isso, foram realizados dois estudos: o primeiro utilizando perfis “I” soldados e o segundo utilizando o catálogo do *Steel Joist* apresentado em D´Alambert (2007) e ilustrado na Figura 54.

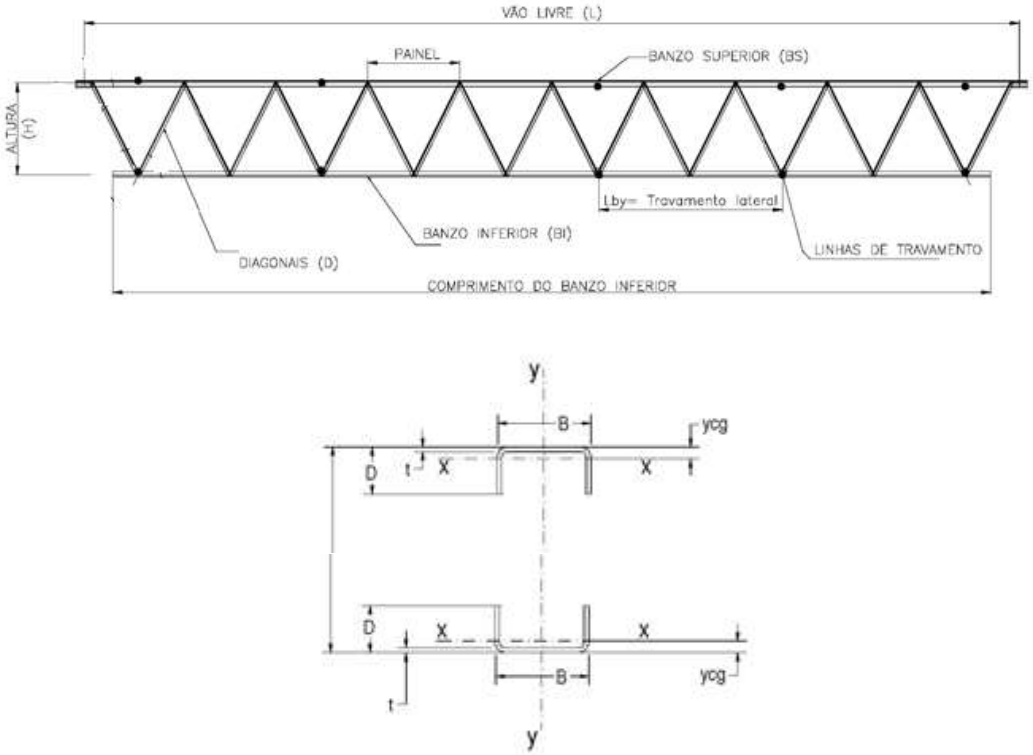

Figura 54 – Treliça Tipo Steel Joist “U” (Adaptado de D´Alambert, 2007)

3.3.2. Terças em perfis tubulares

Para a escolha da composição das terças nos modelos em tubos, foram escolhidos dois tipos de perfis: tubo retangular e *Steel Joist*.

Para a distância entre pórticos de 5 metros foi utilizado somente perfil tubular, uma vez que, de acordo com D´Alambert (2007), a utilização do *Steel Joist* é utilizada para espaçamento entre pórticos acima de 6 metros, motivo pelo qual não foi utilizado para este vão.

Para as tipologias com espaçamento entre pórticos de 10 metros, foram utilizados o perfil tubular retangular ou *Steel Joist.* O tipo de *Steel Joist* utilizado é composto por perfis tubulares quadrados, conforme mostra a Figura 55.

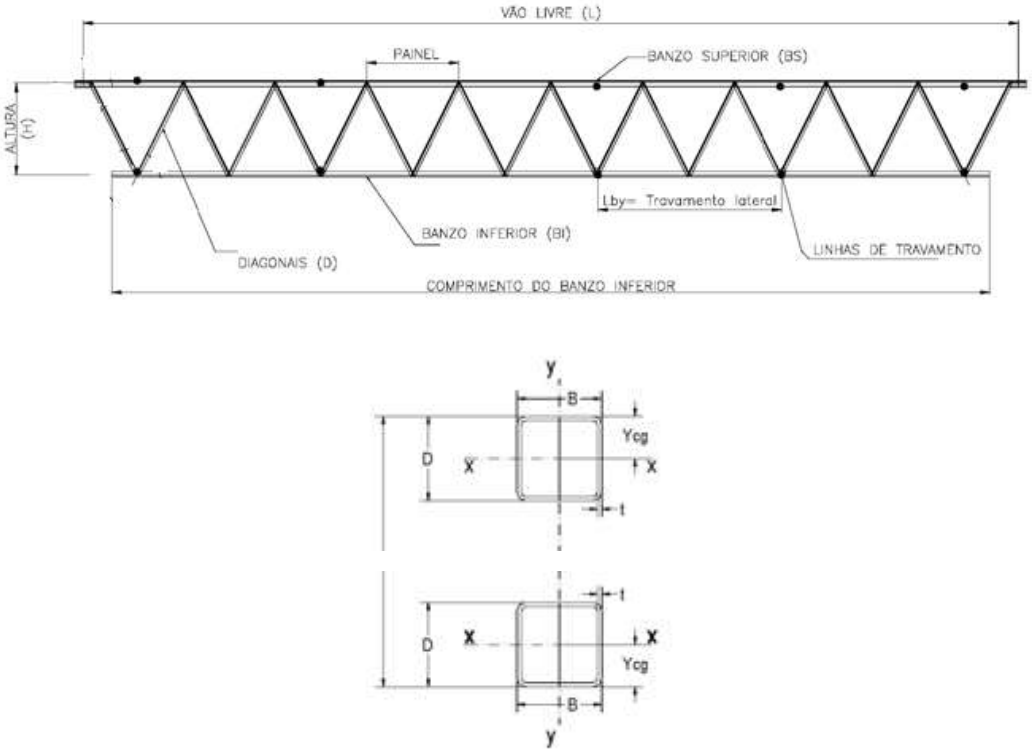

Figura 55 – Treliça Tipo Steel Joist Tubular Quadrado (Adaptado de D´Alambert, 2007)

3.4. Critério para composição dos sistemas de contraventamento

3.4.1. Contraventamento horizontal no plano da cobertura

O principal critério para a escolha dos elementos de contraventamento foi a esbeltez do elemento, uma vez que os comprimentos de cada barra eram demasiadamente grandes, principalmente para os modelos com distância entre pórticos

de 10 metros. Com isso, descartou-se a utilização de perfis em barras redondas com extremidades rosqueadas para este contraventamento, uma vez que não atenderiam ao critério da NBR 8800/2008 para o limite de esbeltez em peças tracionadas. O sistema escolhido foi em forma de “X” (Figura 56) constituídos em perfis cantoneira com abas em cruz. De acordo com CBCA (2013), recomenda-se que a distância entre os contraventamentos não ultrapasse 20 metros. Com isso, foram adotados neste trabalho, quatro linhas de contraventamento, uma vez que o comprimento total da edificação é de 100 metros. Além disso, para absorção dos esforços devido aos ventos foram previstos contraventamentos nas bordas da cobertura, em toda a extensão do hangar.

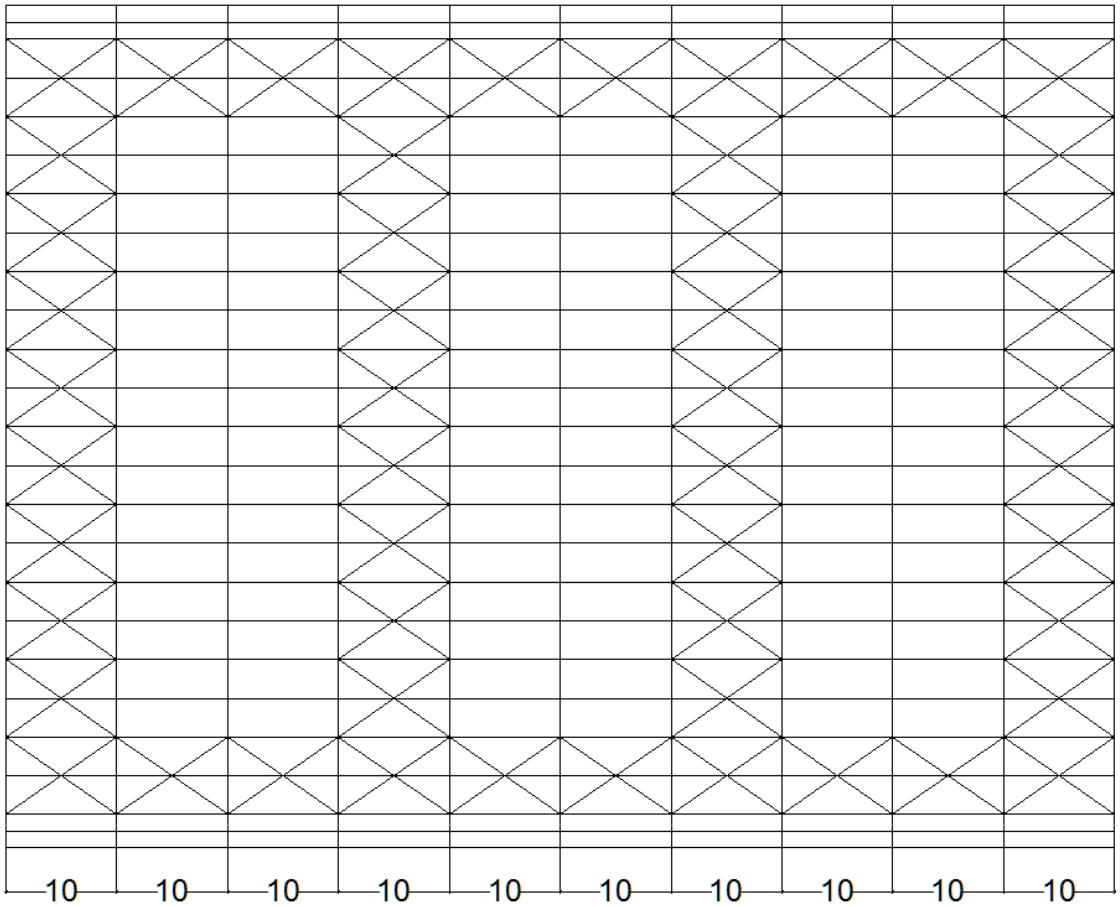

Figura 56 – Sistema de contraventamento horizontal utilizado

3.4.2. Contraventamento vertical

Os sistemas de contraventamento vertical entre as colunas utilizados neste trabalho são constituídos de diagonais em forma de “X” ou “K” ou em “Y”, com barras de cantoneiras duplas de abas paralelas. O contraventamento em “Y” tem como vantagem uma maior área de abertura para que as aberturas laterais dos pórticos não

sejam perdidas pelo contraventamento. As tipologias “K” e “Y” foram utilizadas somente nos modelos com distância entre pórticos de 10 metros. Para a distância entre pórticos de 5 metros foi utilizado somente diagonais em forma de “X” a critério do autor. Levou-se em consideração a utilização destes contraventamentos somente no primeiro e último pórtico da edificação, visando uma economia maior de aço, uma vez que essa composição já atenderia os limites normativos para os deslocamentos horizontais no plano dos contraventamentos verticais.

4. Análise e dimensionamento dos modelos estruturais

4.1. Considerações iniciais

As tipologias e o estudo das variáveis para a adoção dos modelos estruturais estudados neste trabalho foram apresentados no capítulo anterior. Neste capítulo, serão apresentados os principais aspectos utilizados neste trabalho para a análise e dimensionamento dos modelos estruturais. Para exemplificar, serão apresentados o dimensionamento dos modelos estruturais: (i) Treliça Reta com vão de 70 metros e distância entre pórticos de 5 m em perfis laminados abertos, com terças em perfil "U" e contraventamento vertical em "X" (AR70-5-U-X) e (ii) Treliça Reta com vão de 70 metros e distância entre pórticos de 5 m em perfis tubulares, com terças em tubo retangular e contraventamento vertical em "X" (TR70-5-T-X). Esses exemplos são representativos, evitando-se assim a apresentação de todos os 48 modelos estudados neste trabalho.

Para este trabalho serão analisados os pórticos planos, as soluções de terças que compõem o sistema de cobertura e o sistema de contraventamento. Os contraventamentos no plano da cobertura serão os mesmos para todos os modelos. Para os contraventamentos verticais serão utilizadas tipologias distintas ("X", "K" ou "Y") para a distância entre pórticos de 10 metros.

4.2. Ações atuantes nos modelos

Para a determinação das ações atuantes na estrutura, foram utilizadas como referência a ABNT NBR 8800/08, com as recomendações do seu Anexo B – Prescrições complementares sobre as ações causadas pelo uso e ocupação.

4.2.1. Ações Permanentes:

Paras as ações permanentes, foram considerados o peso próprio da estrutura e dos materiais e elementos ligados à edificação. As outras ações permanentes foram determinadas separadamente. Para os modelos com distância entre pórticos de 5 metros,

foi considerada uma carga permanente total de 0,241 kN/m², calculada em planilha eletrônica pelo autor, sendo levado em consideração o peso próprio das telhas, dos equipamentos de instalações hidráulicas e elétricas e peso das terças, seguindo recomendação de Pinheiro (2005). Para os modelos com distância entre pórticos de 10 metros, a carga permanente total considerada foi de 0,301 kN/m², calculada em planilha eletrônica pelo autor, de modo que se levasse em consideração um peso maior de terça, visto que o vão a vencer é o dobro do modelo anterior. Lembra-se que as cargas foram aplicadas nos nós da estrutura que recebem as terças. Para chegar nesses valores, leva-se em consideração a multiplicação da carga aqui atribuída pela área de influência.

4.2.2. Ações Variáveis:

Serão consideradas três ações variáveis no cálculo dos modelos estruturais: a sobrecarga da cobertura e a ação do vento na edificação.

- **Sobrecarga da cobertura:**

Foi utilizado o valor de 0,25 kN/m² de acordo com o ANEXO B da NBR 8800/08. Assim como as cargas permanentes, a sobrecarga de cobertura será aplicada nos nós onde as terças estão apoiadas.

- **Efeitos de temperatura:**

Foi utilizado o efeito de temperatura, calculado automaticamente pelo SAP 2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES, 2010) para o cálculo dos deslocamentos horizontais dos pórticos e cálculo do contraventamento vertical, de acordo com o item 4.5.9 deste trabalho, uma vez que a variação de temperatura para análise do pórtico plano não fez com que houvesse diferenças no dimensionamento. A variação de temperatura utilizada foi uma relação entre a maior variação em um dia no Rio de Janeiro: 20° C e 40° C, perfazendo uma variação de 20° C.

- **Ação do vento:**

Para o cálculo da ação do vento nos modelos, foram utilizadas as recomendações da NBR 6123 (ABNT, 1988). O cálculo foi automatizado através da utilização da

ferramenta computacional Ciclone (Gonçalves *et al.*, 2013). Admitiu-se uma situação diferente de vento para cada modelo (cobertura em treliça reta, treliça de banzos inclinados e treliça em arco), contudo utilizando a mesma velocidade básica do vento, V_0 = 35 m/s, levando em consideração que os hangares estariam situados na cidade do Rio de Janeiro. O comprimento total do hangar foi considerado como 100 metros para os espaçamento entre pórticos de 5 e 10 metros.

Considerou-se a edificação em terrenos planos ou com poucas ondulações, terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos, usando como exemplo campos de aviação, que é o caso da locação do hangar. Levou-se em consideração edificação sendo industrial, com alto fator de ocupação.

Foi levado em consideração em todos os modelos calculados que o coeficiente de pressão interna, C_{pi}, é de + 0,2 e – 0,3 sendo duas faces opostas permeáveis e as outras impermeáveis, levando em consideração o vento perpendicular à face permeável e perpendicular à face impermeável, uma vez que o vento poderá incidir com o hangar com os portões abertos ou fechados. Nas Figuras de 57 a 62 são apresentadas as hipóteses de atuação do vento nos modelos de treliça reta, treliça com banzos inclinados e treliça em arco, com os ventos a 0° e a 90°. Nas Tabelas de 6 a 10 são apresentados os carregamentos de vento para todos os modelos.

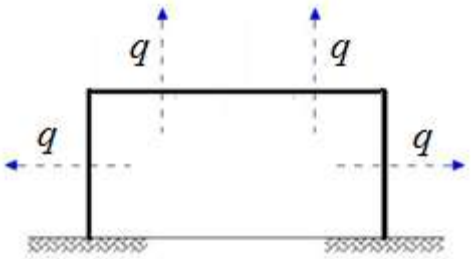

Figura 57 – Atuação do vento no modelo de treliça reta com vento a 0° (Gonçalves *et al.*, 2013)

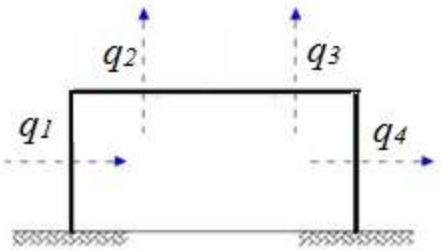

Figura 58 – Atuação do vento de treliça reta com vento a 90° (Gonçalves *et al.*, 2013)

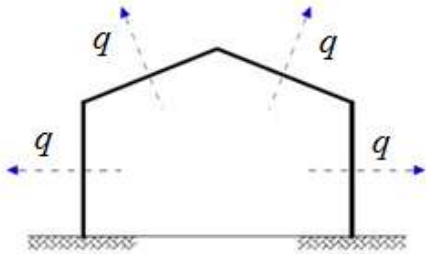

Figura 59 – Atuação do vento no modelo de treliça de banzos inclinados com vento a 0° (Gonçalves *et al.*, 2013)

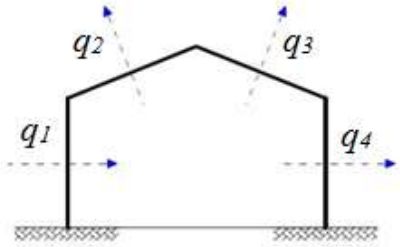

Figura 60 – Atuação do vento no modelo de treliça de banzos inclinados com vento a 90° (Gonçalves *et al.*, 2013)

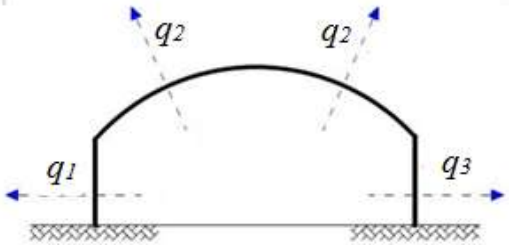

Figura 61 – Atuação do vento no modelo de treliça em arco com vento a 0° (Gonçalves *et al.*, 2013)

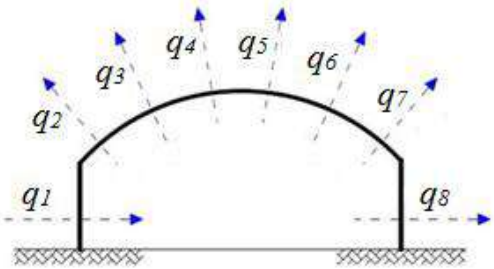

Figura 62 – Atuação do vento no modelo de treliça em arco com vento a 90° (Gonçalves *et al.*, 2013)

Tabela 5 – Carga de vento no modelo de treliça reta com distância entre pórticos de 5 metros

	α = 0°	**α = 90°**			
	q (kN/m)	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**
70 m	-3,52	1,06	-3,52	-3,52	0,70
80 m	-3,52	1,76	-3,52	-2,11	2,11
90 m	-3,52	1,76	-3,52	-2,11	2,11
100 m	-4,22	1,76	-4,22	-2,46	2,11

Tabela 6 – Carga de vento no modelo de treliça reta com distância entre pórticos de 10 metros

	α = 0°	**α = 90°**			
	q (kN/m)	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**
70 m	7,04	2,11	7,04	4,22	4,22
80 m	7,04	3,52	7,04	4,22	4,22
90 m	8,43	3,51	8,43	4,92	4,22
100 m	7,04	3,52	7,04	4,22	4,22

Tabela 7 – Carga de vento no modelo de treliça de banzo inclinado com distância entre pórticos de 5 metros

	α = 0°	**α = 90°**			
	q (kN/m)	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**
70 m	-3,70	1,85	-4,22	-2,22	-2,22
80 m	-3,72	1,86	-4,24	-2,23	-2,23
90 m	-3,75	1,87	-4,27	-2,25	-2,25
100 m	-3,77	1,88	-4,30	-2,26	-2,26

Tabela 8 – Carga de vento no modelo de treliça de banzo inclinado com distância entre pórticos de 10 metros

	α = 0°	**α = 90°**			
	q (kN/m)	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**
70 m	-7,40	3,70	-8,43	-4,44	-4,44
80 m	-7,45	3,72	-8,49	-4,47	-4,47
90 m	-7,47	3,74	-8,50	-4,49	-4,49
100 m	-7,54	3,77	-8,59	-4,52	-4,52

Tabela 9 – Carga de vento no modelo de treliça em arco com distância entre pórticos de 5 metros

	α = 0°			**α = 90°**							
	q_1 (kN/m)	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**	**q_5 (kN/m)**	**q_6 (kN/m)**	**q_7 (kN/m)**	**q_8 (kN/m)**
70 m	-3,78	-3,78	-3,78	1,89	-4,53	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-1,89	-2,27
80m	-3,81	-3,81	-3,81	1,91	-4,57	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-1,91	-2,29
90 m	-3,87	-3,87	-3,87	1,94	-4,65	-2,32	-2,32	-2,32	-2,32	-1,94	-2,32
100 m	-3,89	-3,89	-3,89	1,95	-4,67	-2,34	-2,34	-2,34	-2,34	-1,95	-2,34

Tabela 10 – Carga de vento no modelo de treliça em arco com distância entre pórticos de 10 metros

	α = 0°			**α = 90°**							
	q_1 (kN/m)	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_1 (kN/m)**	**q_2 (kN/m)**	**q_3 (kN/m)**	**q_4 (kN/m)**	**q_5 (kN/m)**	**q_6 (kN/m)**	**q_7 (kN/m)**	**q_8 (kN/m)**
70 m	-7,40	-7,40	-7,40	3,70	-8,88	-4,44	-4,44	-4,44	-4,44	-3,70	-4,44
80m	-7,62	-7,62	-7,62	3,81	-9,15	-4,57	-4,57	-4,57	-4,57	-3,81	-4,57
90 m	-7,70	-7,70	-7,70	3,84	-9,20	-4,61	-4,61	-4,61	-4,61	-3,84	-4,62
100 m	-7,78	-7,78	-7,78	3,89	-9,34	-4,67	-4,67	-4,67	-4,67	-3,89	-4,67

4.3. Combinação de ações

As combinações de ações realizadas neste trabalho seguiram o critério do item 4.7.6.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008). Foram consideradas ao todo três combinações, das quais duas correspondem à combinação favorável (carga permanente e vento de sucção). As combinações utilizadas foram as seguintes:

- COMB1 = 1,25 x Carga Permanente + 1,5 x Sobrecarga variável
- COMB2 = 1,00 x Carga Permanente + 1,4 x Vento 0°
- COMB3 = 1,00 x Carga Permanente + 1,4 x Vento 90°
- COMB4 = 1,25 x Carga Permanente + 1,5 x Sobrecarga variável + 1,2 x 0,6 x Efeito de temperatura
- COMB5 = 1,25 x Carga Permanente + 1,2 x Efeito de temperatura + 1,5 x 0,7 x Sobrecarga variável

Estas combinações foram a base da análise dos esforços, dimensionamento e verificação das peças estruturais.

4.4. Análise estrutural dos modelos

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações nas estruturas, de forma que se efetuem verificações para estado limite último e estado limite de serviço.

A classificação dos tipos de análise estrutural depende da lei constitutiva do material adotado e também dos efeitos causados pelos deslocamentos da edificação. A NBR 8800 (ABNT, 2008) permite que os esforços internos possam ser determinados por análise global elástica (levando em consideração diagramas tensão-deformação elástico-linear, seguindo a Lei de Hooke) ou por análise global plástica (levando em consideração diagramas tensão-deformação rígido-plástico, elastoplástico perfeito ou elastoplástico não-linear).

Em relação aos efeitos causados pelos deslocamentos da estrutura, os esforços internos podem ser determinados por análise linear, utilizando a teoria dos esforços de primeira ordem, levando em consideração a estrutura indeformada ou por análise não linear, levando em consideração a estrutura deformada.

Uma vez que as estruturas de galpões são pórticos planos de um só pavimento, normalmente de pequena deslocabilidade lateral (Nogueira, 2009) será adotada a análise elástica de primeira ordem.

A análise estrutural dos modelos foi realizada utilizando a ferramenta computacional SAP2000 – Versão 14 (COMPUTERS AND STRUCTURES, 2010). O SAP é um programa que realiza análise linear e não linear de estruturas, muito utilizado por profissionais de engenharia e no meio acadêmico e da pesquisa.

Para exemplificar a rotina de análise realizada em todos os modelos estruturais, serão representados a seguir os casos de carregamentos considerados, as vinculações das barras e dos apoios e apresentados resultados obtidos da análise estrutural do modelo AR70-5 (Modelo constituídos de perfis laminados abertos, com vão de 70 metros e distância entre pórticos de 5 metros e cobertura de treliça reta).

Na Figura 63 pode-se observar o carregamento permanente na edificação. Neste trabalho, chamou-se de peso próprio.

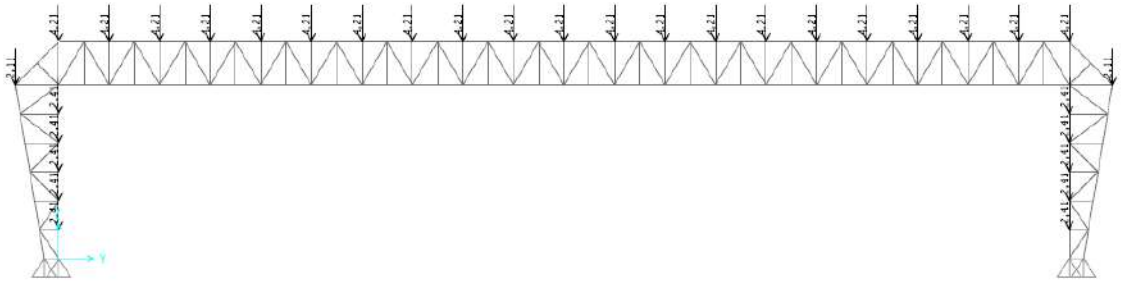

Figura 63 – Ações devidas ao carregamento permanente na cobertura – Modelo AR70-5

Na Figura 64 pode-se observar o carregamento devido à sobrecarga de cobertura no modelo estrutural. Nas Figuras 65 e 66 podem ser visualizadas as ações devidas ao vento a 0° e vento a 90°, respectivamente. Lembra-se que, ao incidir na edificação, o vento atua na face do telhado e este transfere este carregamento às terças. Desta forma, a aplicação nodal das cargas é inserida na direção normal ao plano da cobertura, nos nós correspondentes às terças.

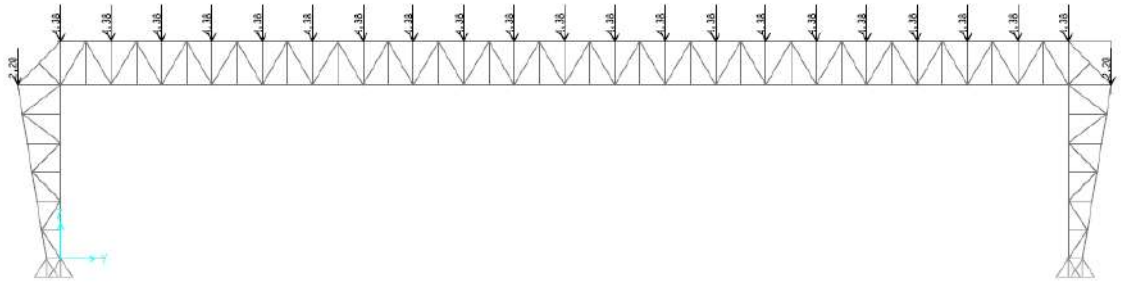

Figura 64 – Ações devidas à sobrecarga variável (sobrecarga de cobertura) – Modelo AR70-5

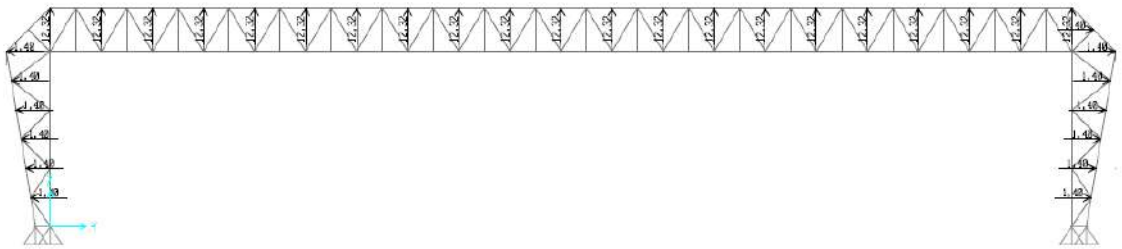

Figura 65 – Ações devidas ao vento a 0° - Modelo AR70-5

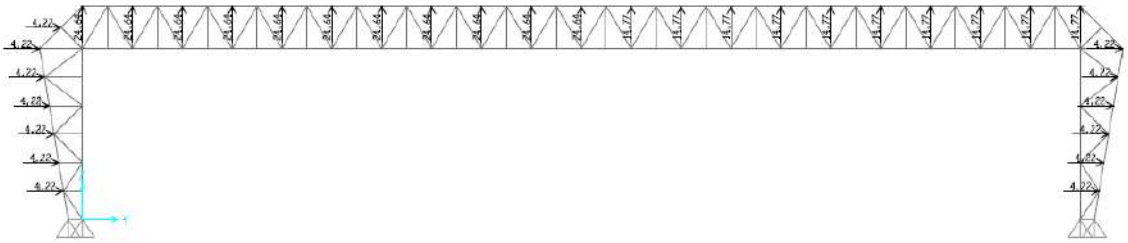

Figura 66 – Ações devidas ao vento a 90° - Modelo AR70-5

A vinculação das barras do modelo considerado pode ser visto na Figura 67. Observa-se que todas as diagonais e montantes foram modeladas com as extremidades rotuladas, para que as vigas da cobertura e as colunas funcionem como treliça. Observa-se que as colunas são rotuladas com a base a fim de não transmitirem momentos para a fundação.

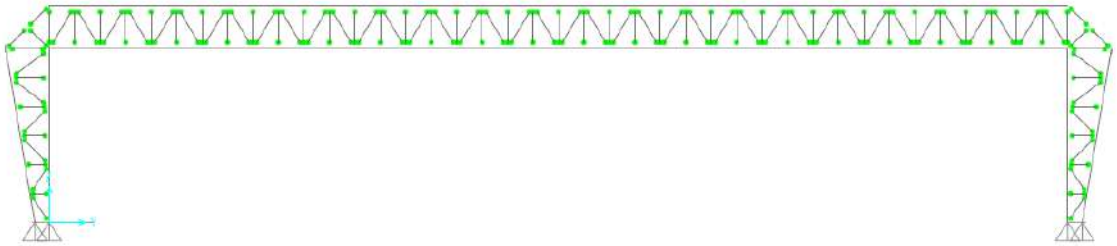

Figura 67 – Visualização das vinculações das barras – Modelo AR70-5

Nas Figuras 68, 69, 70 estão apresentados os resultados das análises, com os esforços axiais devidos às combinações de cargas no modelo AR70-5.

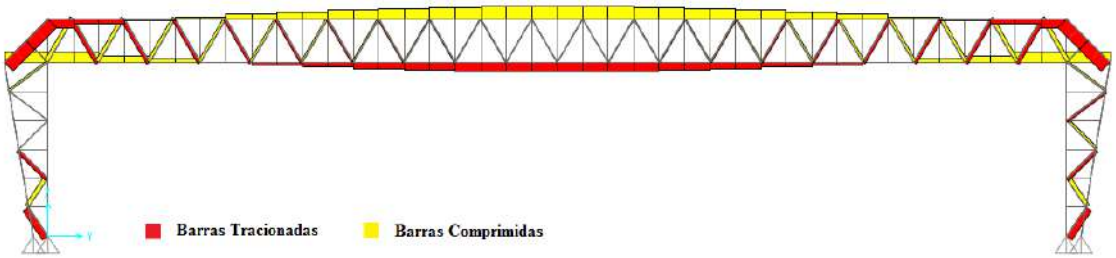

Figura 68 – Diagrama de Esforços Normais devido a COMB1 (1,25CP + 1,5SV) – Modelo AR70-5

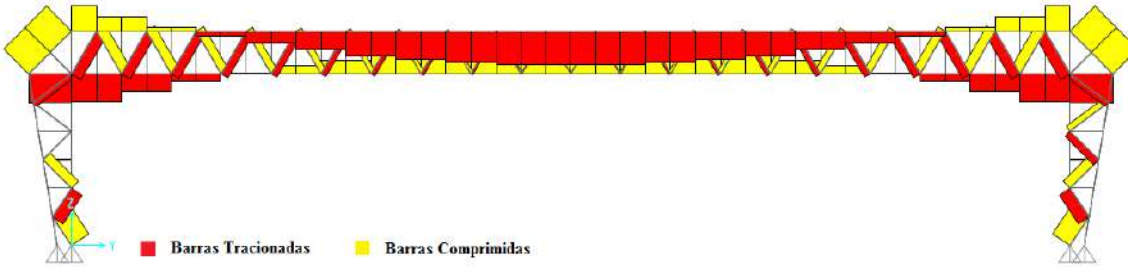

Figura 69 – Diagrama de Esforços Normais devido à COMB2 (1,0CP + 1,4V0) – Modelo AR70-5

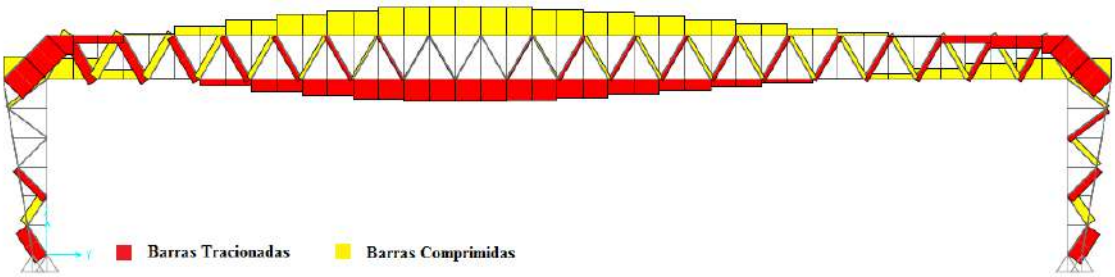

Figura 70 – Diagrama de Esforços Normais devido à COMB3 (1,0CP + 1,4V90) – Modelo AR70-5

4.5. Dimensionamento dos modelos estruturais

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), o Método dos Estados Limites, utilizado para o dimensionamento de uma estrutura de aço, exige que nenhum estado-limite seja excedido quando uma estrutura estiver submetida a todas as combinações previstas de ações. Caso o limite de qualquer uma dessas ações seja ultrapassado, a estrutura não atende aos objetivos para os quais foi idealizada. Os estados-limites a serem considerados são os estados limites últimos (ELU), relacionados à capacidade de resistência das peças e segurança das estruturas, e os estados limites de serviço (ELS), relacionados à utilização da estrutura em condições de serviço.

4.5.1. Verificação do estado limite de serviço no pórtico transversal do modelo AR70-5 e TR70-5

Para a verificação dos deslocamentos horizontais e verticais nos pórticos transversais, utilizou-se o previsto no ANEXO C – Deslocamentos Máximos da NBR

8800 (ABNT, 2008). Os limites indicados para deslocamentos em edifícios industriais são: H/400 a H/200, sendo “H” a altura total da coluna para os deslocamentos horizontais e; L/180, sendo “L” o vão teóricos entre dois apoios para as flechas.

A combinação utilizada para a verificação dos estados limites de serviço foi o maior valor dentre as seguinte (previstas na NBR 8800/2008):

- COMBS1: 1,00 x (Peso próprio + Carga Permanente) + 0,3 x Vento 0°
- COMBS2: 1,00 x (Peso próprio + Carga Permanente) + 0,3 x Vento 90°
- COMBS3: 1,00 x (Peso próprio + Carga Permanente)
- COMBS4: 1,00 x (Peso próprio + Carga Permanente) + 1,00 x Vento 0°
- COMBS5: 1,00 x (Peso próprio + Carga Permanente) + 1,00 x Vento 90°

Na Figura 71 é apresentado o pórtico deformado do modelo AR70-5, utilizando o pior caso de deslocamentos verticais e horizontais (COMBS3). Nesta combinação os deslocamentos horizontais são da ordem de 0,2 cm e os deslocamentos verticais são da ordem de 12,9 cm. Levando em consideração que os valores previstos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) são 28,0 cm (L/250) para os deslocamentos verticais e 3,0 cm (H/400) para os deslocamentos horizontais, este modelo atende ao Estado Limite de Serviço.

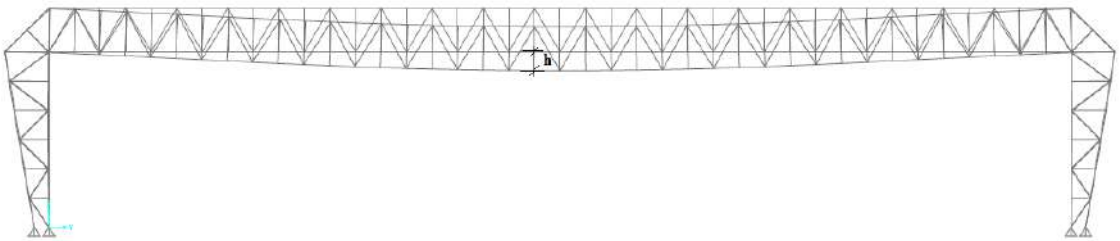

Figura 71 – Deformada do modelo AR70-5 devido a COMBS3.

No modelo TR70-5, o pior caso de deslocamentos verticais e horizontais é a COMBS3. Nesta combinação, os deslocamentos horizontais são da ordem de 0,12 cm e os deslocamentos verticais são da ordem de 12,0 cm. Levando em consideração os limites vistos anteriormente, este modelo também atende ao Estado Limite de Serviço. Além disso, é possível verificar que os deslocamentos para o modelo constituído de perfis tubulares é um pouco inferior que o constituído de perfil aberto. Ressalta-se que não é objetivo deste trabalho trabalhar na otimização dos deslocamentos, focando-se então apenas na verificação dos mesmos.

4.5.2. Verificação do estado limite último nos pórticos transversais do modelo AR70-5:

Como exemplo do trabalho realizado para o dimensionamento dos pórticos transversais dos modelos presentes neste trabalho, serão apresentados os roteiros e procedimentos que foram utilizados para a definição das seções transversais.

Com base na análise dos esforços axiais de cada combinação vistos no item 4.4 com a utilização da ferramenta computacional SAP2000, foram determinados os dimensionamentos à tração e à compressão dos perfis que compunham as seções transversais dos modelos. A escolha dos perfis adotados obedece a segurança estrutural (ELU) das barras, relativas às solicitações de tração, compressão e flexão, assim como o limite de esbeltez previsto na NBR 8800 (ABNT, 2008) de no máximo 200 para peças comprimidas e 300 para peças tracionadas. Lembra-se que para os modelos AR70-5 não foram utilizados os reforços de chapas nas mesas. Para exemplificar, será determinado o dimensionamento da barra mais solicitada à tração e da barra mais solicitada à compressão e do modelo AR70-5 e TR70-5, que podem ser visualizados no ANEXO A.

- **Dimensionamento da barra mais solicitada à tração:**

A barra mais solicitada a tração do modelo AR70-5 tem um esforço axial N_d = 629,4 kN na COMB2. O perfil escolhido foi 2U 152,4 x 12,2 kg/m, pois, a critério do autor, esses foram os perfis mínimos da análise e as suas propriedades geométricas podem ser vistas no ANEXO A. Para o cálculo da resistência à tração, será realizado um pré-dimensionamento dos parafusos para definição do número de furos na seção, para o cálculo da área líquida. Considerando-se um parafuso ASTM A325 de 12,7 mm de diâmetro, tem-se, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$F_{t,RD} = \frac{0{,}5.A_b.f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

A_b = área bruta da seção transversal do parafuso;

f_u = resistência à ruptura do material do parafuso à tração;

γ_{a2} = coeficiente de ponderação das resistências.

Para o caso em tela, tem-se que:

$$F_{t,RD} = \frac{0{,}5.0{,}25.\pi.(1{,}27)^2.82{,}5}{1{,}35}$$

$F_{t,RD}$ = 52,3 kN por parafuso

Leva-se em consideração que haverá corte duplo. Com isso, a resistência do parafuso será dobrada. Serão então adotados seis parafusos em três linhas dispostas duas a duas. O detalhe da ligação pode ser visto no capítulo 6, na Figura 98.

Após o pré-dimensionamento dos parafusos, será calculada a resistência à tração do perfil. Considerando-se o perfil escolhido e aço ASTM A572 Gr. 50, tem-se que para o escoamento da seção bruta, seguindo o preconizado na NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$N_{t,RD} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

A_g = área bruta da seção transversal do perfil;

f_y = resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} = coeficiente de ponderação das resistências.

Tem-se então:

$$N_{t,RD} = \frac{2.30{,}3.34{,}5}{1{,}1} = 1900{,}2kN > N_{sd} = 629{,}4kN(Ok)$$

Após a resistência da seção bruta, calcula-se a resistência à seção liquida. O roteiro de cálculo está definido no ANEXO A. De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$N_{t,RD} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

Calcula-se então a resistência:

$$R_d = \frac{2.23{,}8.45}{1{,}35} = 1586{,}6kN > N_{sd} = 629{,}4kN(Ok)$$

É importante ressaltar que o item 5.2.8.2 da NBR 8800/2008 recomenda que perfis tracionados devam ter esbeltez limitada a 300. Levando em consideração que o comprimento da barra analisada é 1,75 m, tem-se que:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 300$$

Então:

$$\left(175/2{,}34\right) = 74{,}8 \leq 300(Ok)$$

Com isso, o perfil 2U 152,2 x 12,2 kg/m atendeu a todos os critérios da NBR 8800/2008 para peças submetidas à tração axial.

- **Dimensionamento da barra mais solicitada à compressão:**

A barra mais solicitada à compressão do modelo AR70-5 apresenta esforço axial N_d = 591,26 kN na COMB2. O perfil escolhido foi 2U 152,4 x 12,2 kg/m, pois a critério do autor, esses foram os perfis mínimos da análise para os banzos inferiores. Tem-se então pela NBR 8800/2008:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi.Q.A_g.f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

χ = fator de redução associado à resistência a compressão;

Q = fator de redução total associado à flambagem local;

A_g = área bruta da seção transversal da barra.

Seguindo os critérios do item 5.3.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008), o índice de esbeltez de uma peça comprimida deve ser menor que 200.

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 200$$

Com isso, tem-se:

$$\lambda = k.L/i_x = 1{,}00.175/2{,}34 = 74{,}8$$

$$\lambda = k.L/i_y = 1{,}00.300/5{,}93 = 50{,}6$$

Verifica-se, portanto, que esta barra atende ao critério da limitação do índice de esbeltez dado em norma e vê-se que a predominância no dimensionamento é a flambagem no plano da treliça, pois o índice de esbeltez fora do plano (eixo y-y) é menor.

Verificando-se a marcha de cálculo dos fatores acima no ANEXO A, calcula-se então o valor da resistência à compressão deste perfil:

$$N_{c,Rd} = \frac{0{,}66.1{,}00.2.28{,}24.34{,}5}{1{,}1} = 1169{,}14kN > N_{sd} = 591{,}26\text{kN (Ok)}$$

Com isso, o perfil 2U 152,2 x 12,2 kg/m atendeu a todos os critérios da NBR 8800 (ABNT, 2008) para peças submetidas à compressão axial.

4.5.8. Dimensionamento das terças da cobertura do modelo AR70-5:

As terças de cobertura no modelo AR70-5 foram adotadas em perfil "U" laminado. Com o objetivo de exemplificar o trabalho que foi realizado para o dimensionamento das terças, serão apresentados os roteiros e procedimentos utilizados. O procedimento utilizado para definição dos carregamentos, esforços, combinações e verificação do Estado Limite de Serviço e do Estado Limite Último estão listados no Anexo B.

O pré-dimensionamento para verificação do perfil que atende os esforços nas terças foi realizada com a ferramenta computacional Visual Metal (Pravia, 2006). A partir da definição do perfil "U" 152x15,6 kg/m, foram utilizados os critérios de dimensionamento prescritos na NBR 8800 (ABNT, 2008) para peças submetidas a momento fletor e esforço cortante. As propriedades geométricas deste perfil podem ser visualizadas no ANEXO B.

Para definição do momento fletor resistente de cálculo, é necessário calcular os parâmetros referentes ao momento fletor resistente. Os valores de cálculo podem ser visualizados no ANEXO B.

Com isso, a partir dos parâmetros descritos na NBR 8800/2008, tem-se os seguintes valores de momento resistente:

- Flambagem Local da Alma:

Verifica-se a seção tem a alma compacta. Com isso, o valor do momento resistente é dado na equação:

$$M_r = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

M_{pl} = o momento plástico da seção

γ_{a1} = coeficiente de ponderação das resistências.

Então, a resistência da seção é dada por:

$$M_r = \frac{3521}{1{,}1} = 3200{,}90 kNcm$$

- Flambagem Local da Mesa:

Verifica-se que a seção tem a mesa compacta. Com isso, de acordo com a NBR 8800/2008 o cálculo é análogo à alma. Então, o momento resistente é:

$$M_r = \frac{3521}{1{,}1} = 3200{,}90 kNcm$$

- Flambagem Lateral com Torção:

Verifica-se que para o estado limite FLT quando $\lambda > \lambda_r$, deve-se usar a seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo:

M_{cr} = Momento crítico para Flambagem Lateral com Torção.

Tem-se então:

$$\mathrm{M_{Rd}} = \frac{1138{,}77}{1{,}1} \leq \frac{3521}{1{,}1} = 1035{,}25 \mathrm{kNcm}$$

Conclui-se que a resistência a ser considerada é 1035,25 kNcm.

Para a resistência ao esforço cortante, tem-se a seguinte expressão:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo:

V_{pl} = Força cortante correspondente à plastificação da alma.

Com isso, tem-se que:

$$V_{Rd} = \frac{251,08}{1,1} = 228,25kN$$

A resistência ao cisalhamento do perfil é então 228,25 kN.

No ANEXO B são apresentados os cálculos correspondentes à definição do carregamento e dos esforços solicitantes internos da terça analisada. Comparam-se então os esforços solicitantes internos com as resistências encontradas nos cálculos acima.

Então:

$$M_{sd} = 870 \text{ kNcm} \leq M_{rd} = 1035,25 \text{ kNcm (Ok)}$$

$$N_{sd} = 8,7 \text{ kN} \leq N_{rd} = 228,25 \text{ kN (Ok)}$$

Logo, o perfil escolhido para as terças do modelo AR70-5 atendem os critérios de Estado Limite Último.

4.5.9. Dimensionamento do contraventamento vertical do AR70-5:

Com o objetivo de exemplificar o trabalho realizado para o dimensionamento do contraventamento vertical dos modelos presentes neste trabalho, serão apresentados os roteiros e procedimentos que foram utilizados para a definição das seções transversais do sistema de contraventamento vertical do modelo AR70-5.

De acordo com Bellei (2006), no cálculo dos contraventamentos verticais, dimensiona-se somente as barras submetidas à tração, uma vez que o dimensionamento à compressão seria antieconômico. Será verificado então o perfil escolhido na composição do sistema de contraventamento, 2L 127 x 18,3 kg/m. Verifica-se que o limitante no dimensionamento do contraventamento é a esbeltez do elemento, mesmo sendo ele tracionado. Os cálculos referentes às propriedades geométricas e o cálculo da resistência encontram-se no ANEXO A.

Na Figura 72, observa-se a estrutura deformada longitudinalmente de acordo com as combinações vistas no item 4.3 deste trabalho.

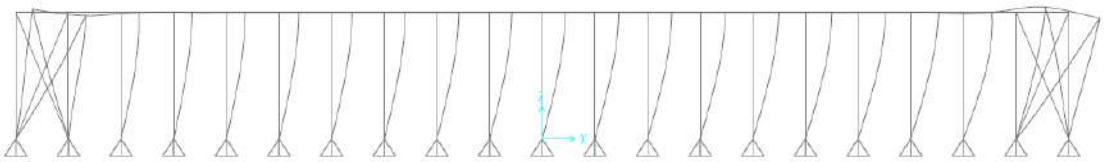

Figura 72 – Deslocamentos horizontais na direção dos contraventamentos

O deslocamento máximo verificado lateralmente no topo da edificação neste modelo foi de 1,5 cm. Como o valor máximo previsto pela NBR 8800/2008 é 4,0 cm (H/300), o resultado da análise atende ao Estado Limite de Serviço.

4.5.10. Verificação do estado limite último nos pórticos transversais do modelo TR70-5:

- **Dimensionamento da barra mais solicitada à tração:**

A barra mais solicitada à tração do modelo TR70-5 apresenta esforço axial N_{sd} = 659,7 kN na COMB2. O perfil escolhido foi TQ 110x26,9 kg/m, a critério do autor e suas propriedades geométricas podem ser vistas no ANEXO A.

Considerando-se o perfil escolhido e aço VMB 350, tem-se que para o limite de escoamento da seção bruta, seguindo o preconizado na NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$N_{t,RD} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

A_g = área bruta da seção transversal do perfil;

f_y = resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} = coeficiente de ponderação das resistências.

Tem-se então:

$$N_{t,RD} = \frac{34{,}3.35}{1{,}1} = 1091{,}4kN > N_{sd} = 659{,}7kN(Ok)$$

É importante ressaltar que o item 5.2.8.2 da NBR 8800/2008 recomenda que perfis tracionados não devam ter esbeltezes maiores que 300. Levando em consideração que o comprimento da barra analisada é 1,75 m, tem-se que:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 300$$

Então:

$$\left(175/3{,}95\right) = 44{,}3 \leq 300(Ok)$$

Com isso, o perfil TQ 110x26,9 kg/m atendeu a todos os critérios da NBR 8800/2008 para peças submetidas à tração axial.

- **Dimensionamento da barra mais solicitada à compressão:**

A barra mais solicitada a compressão do modelo TR70-5 apresenta esforço axial N_{sd} = 591,26 kN na COMB2. O perfil escolhido foi TQ 110x26,9 kg/m, a critério do autor. Tem-se então pela NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi.Q.A_g.f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

χ = fator de redução associado à resistência à compressão;

Q = fator de redução total associado à flambagem local;

A_g = área bruta da seção transversal da barra.

Seguindo os critérios do item 5.3.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008), o índice de esbeltez de uma peça comprimida deve ser menor que 200:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 200$$

Com isso, tem-se:

$$\lambda = k.L/i = 1{,}00.175/3{,}95 = 44{,}3$$

Verifica-se, portanto, que esta barra atende ao critério da limitação do índice de esbeltez dado em norma.

Verificando-se a marcha de cálculo dos fatores acima no ANEXO A, calcula-se então o valor da resistência à compressão deste perfil:

$$N_{c,Rd} = \frac{0{,}96.1{,}00.34{,}3.35}{1{,}1} = 1047{,}7kN > N_{sd} = 591{,}26kN(Ok)$$

Com isso, o perfil TQ 110x26,9 kg/m atendeu aos critérios da NBR 8800 (ABNT, 2008) para peças tubulares submetidas a compressão axial.

4.5.11. Dimensionamento das terças da cobertura do modelo TR70-5:

O perfil considerado para a terça de cobertura no modelo TR70-5 foi o perfil tubular retangular. Com o objetivo de exemplificar o trabalho realizado para o dimensionamento das terças, serão apresentados os roteiros utilizados. O procedimento utilizado para definição dos carregamentos, esforços, combinações verificação do Estado Limite de Serviço estão listados no Anexo B.

Para definição do momento fletor resistente de cálculo, é necessário calcular os parâmetros referentes ao momento fletor resistente. Os valores de cálculo podem ser visualizados no ANEXO B. É importante ressaltar que o limitante na escolha das terças não foi a resistência, mas sim a flecha. O perfil utilizado para este modelo foi o TR 120x80x12,9 kg/m.

Com isso, a partir dos parâmetros descritos na NBR 8800 (ABNT, 2008), tem-se os seguintes valores de momento resistente:

- Flambagem Local da Alma:

Verifica-se que a seção com alma compacta. Com isso, o valor do momento resistente é dado na equação:

$$M_r = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

M_{pl} = o momento plástico da seção

γ_{a1} = coeficiente de ponderação das resistências.

Então, a resistência da seção é dada por:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z.f_y}{1{,}1} = \frac{72{,}4.35}{1{,}1} = 2303{,}6kN.cm$$

- Flambagem Local da Mesa:

Verifica-se que a seção tem as mesas compactas. Com isso, de acordo com a NBR 8800/2008 o cálculo é análogo à alma. Então, o momento resistente é M_{rd} = 2303,6 kN.cm

- Flambagem Lateral com Torção:

Verifica-se que para o estado limite FLT quando $\lambda > \lambda_r$, deve-se usar a seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo:

M_{cr} = Momento crítico para Flambagem Lateral com Torção.

Tem-se então:

$$M_{Rd} = 2276{,}2 \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{72{,}4.35}{1{,}1} = 2303{,}6 kN.cm (OK!)$$

Após a análise da Flambagem Local da Alma e da Mesa e da Flambagem Lateral com Torção, conclui-se que a resistência a ser considerada é M_{Rd} = 2303,6 kN.cm.

Para a resistência ao esforço cortante, tem-se a seguinte expressão:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo:

V_{pl} = Força cortante correspondente à plastificação da alma.

Com isso, tem-se que:

$$V_{Rd} = \frac{1050}{1{,}1} = 954{,}5 kN$$

A resistência ao cisalhamento do perfil é V_{Rd} = 954,5 kN.

No ANEXO B, são apresentados os cálculos correspondentes à definição do carregamento e dos esforços solicitantes internos da terça analisada. Comparam-se então os esforços solicitantes internos com as resistências encontradas nos cálculos acima.

Então:

$$M_{Sd} = 880 \text{ kNcm} \leq M_{Rd} = 2303{,}6 \text{ kNcm (Ok)}$$

$$N_{Sd} = 8{,}7 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 954{,}5 \text{ kN (Ok)}$$

Logo, o perfil escolhido para as terças do modelo TR70-5 atende as solicitações.

4.6. Representação dos resultados obtidos no dimensionamento

Conforme citado anteriormente, diante do número expressivo de modelos estruturais analisados e dimensionados, serão apresentados os resumos de consumo de aço dos modelos analisados e dimensionados neste capítulo: treliça reta com perfis abertos e com perfis tubulares, vãos de 70 metros e distância entre pórticos de 5 metros (AR70-5 e TR70-5). Nesse resumo serão apresentados os componentes constituintes do escopo de análise do trabalho, o comprimento total de cada elemento, a taxa de consumo de aço para os contraventamentos e terças e, por fim, o consumo final do modelo. Nas Tabelas 11 e 12 podem ser vistos os resumos de consumo de materiais para os modelos AR70-5 e TR70-5, respectivamente.

Tabela 11 – Resumo de materiais do modelo AR70-5

Elemento	Perfil	Comp. Total (m)	Peso (kg)
Colunas	U 381 x 81,85	48,3	3956
Colunas	2L 101,6 x 9,81	54,8	1075
Banzos, Diagonais e Montantes	2U 152,4 x 12,2	375,0	9449
Diagonais	2U 152,4 x 15,6	20,8	650
Nó de pórtico	2U 203,2 x 20,5	12,0	492
		Peso total do pórtico principal (kg)	15622
		Área de influência (m²)	350
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	2,0
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,7
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	44,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**51,3**

Tabela 12 – Resumo de materiais do modelo TR70-5

Elemento	Perfil	Comp. Total (m)	Peso (kg)
Colunas	TQ200x37,6	48,3	1817
Colunas	TQ60x11,5	54,8	630
Nó de pórtico	TQ100x22,3	20,5	457
Diagonais e Montantes	TQ110x15,9	260,0	4134
Banzos	TQ110x17,6	70,0	1232,0
Banzos	TQ110x24,6	56,0	1378
Banzos	TQ110x26,9	14,0	377
		Peso total do pórtico principal (kg)	10026
		Área de influência (m²)	350
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,4
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	3,9
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**33,9**

5. Análise e discussão dos resultados

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentadas as taxas de consumo de aço obtido em cada modelo estrutural estudado, levando em consideração os elementos constituintes do pórtico principal, soluções de terças e contraventamentos. Como já relatado no capítulo 2, diversas bibliografias mencionam como referência a taxa de consumo de aço. Com isso, este trabalho também fará referência a este parâmetro, apontando as melhores soluções encontradas.

Logo, após a etapa descrita no capítulo 4 (dimensionamento dos modelos estruturais), confeccionou-se uma lista de consumo de material com as informações dos perfis constituintes de cada modelo estrutural e, após isso, junto com base sua área de influência, determinou-se a taxa de consumo de aço para cada modelo.

5.2. Análise comparativa entre os modelos laminados abertos

Na Figura 73, pode ser visto o gráfico com a taxa de consumo de aço para os modelos constituídos de perfis abertos com distância entre pórticos de 5 metros e levando em consideração o consumo das terças e o consumo dos contraventamento horizontais e verticais escolhidos para esta distância entre pórticos.

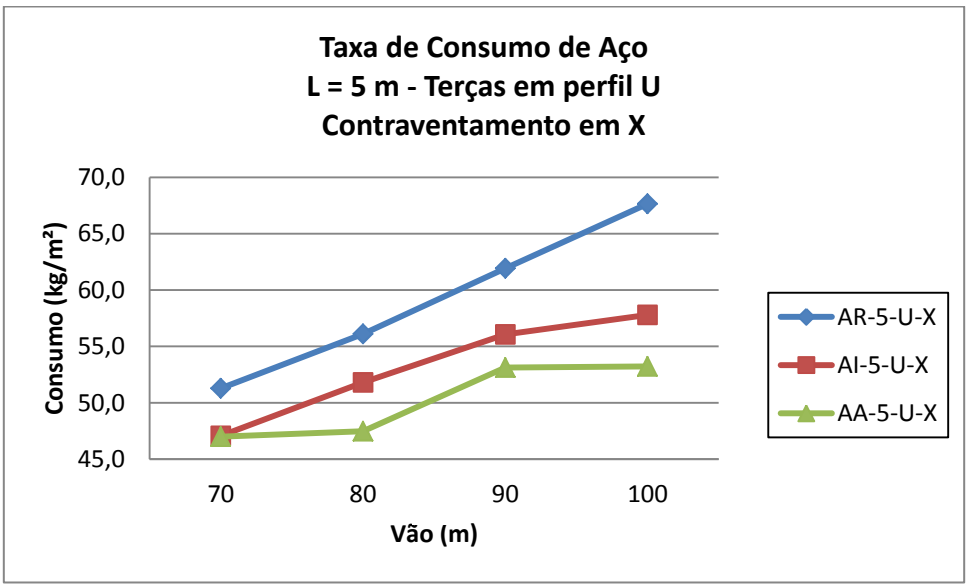

Figura 73 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis abertos com distância entre pórticos de 5 metros

Pode-se observar que para o vão de 70 metros, o modelo AR-5-U-X possui um consumo de aço 6% maior que o do modelo AI-5-U-X e aproximadamente 7% maior que o do modelo AA-5-U-X. Entre os modelos AI-5-U-X e AA-5-U-X a diferença entre o consumo é quase desprezível, sendo de aproximadamente 1%. Essa pouca diferença é devida ao fato da parametrização para vãos de 70 metros não levar em consideração o reforço de chapa dos perfis. Ao aumentar o vão para 80 metros, a diferença entre os consumos já começa a aumentar, ficando da ordem de 8% a diferença entre os modelos AI-5-U-X e AA-5-U-X. Para o vão de 90 metros, o modelo AR-5-U-X distancia-se ainda mais dos outros e a diferença de consumo aumenta para 10% entre o modelo AI-5-U-X e 17% entre o modelo AA-5-U-X. A diferença entre os modelos AI-5-U-X e LTA-5 cai para 6%, devido ao fato do peso dos perfis utilizados quase se equivalerem. Para o vão de 100 metros, o modelo AR-5-U-X distancia-se dos demais, ficando cerca de 27% maior o consumo em relação ao modelo que tem o menor consumo, o AA-5-U-X. Com isso, pode ser observado que o modelo AA-5-U-X é o que apresenta o menor consumo para todos os vãos, sendo a escolha mais indicada quando utilizar pórtico plano de perfis laminados e distância entre pórticos de 5 metros. Na Figura 74, pode-se ver um gráfico com a taxa de consumo global entre os modelos.

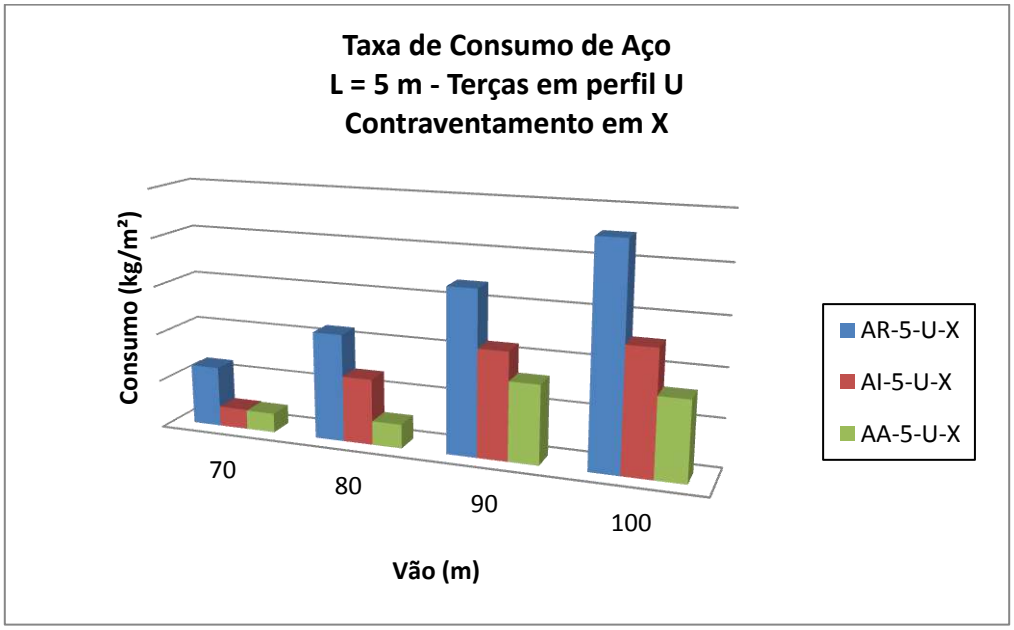

Figura 74 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 5 metros.

Na Figura 75, pode ser visto o gráfico com a taxa de consumo de aço para modelos abertos com distância entre pórticos de 10 metros e levando em consideração o consumo das terças constituídas de perfis "I" soldados e de perfis *Steel Joist* e dos contraventamentos horizontais e verticais, estes em forma de "X".

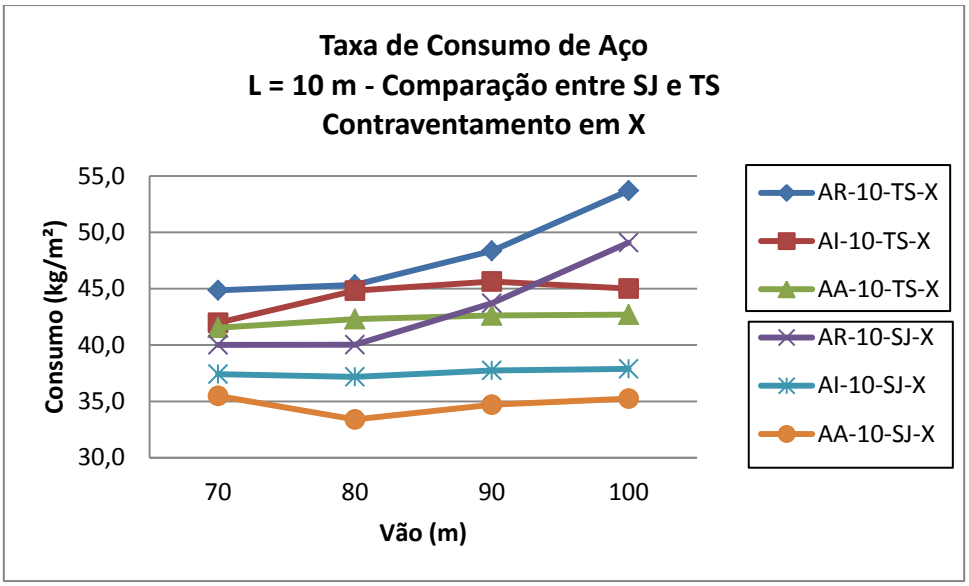

Figura 75 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis abertos com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em "X"

Pode-se observar que para o vão de 70 metros, constituídos com o contraventamento vertical em forma de "X", o modelo que apresenta o maior consumo de aço é o modelo AR-10-TS-X, constituído de terça com perfis soldados. O seu consumo foi cerca de 37% maior que o modelo de menor consumo, AA-10-SJ-X, constituído de terça *Steel Joist*. Levando em consideração a diferença entre os modelos com terça com perfis soldados e com perfis *Steel Joist*, observa-se que estes têm a média de consumo 24% menor que os perfis soldados, conclui-se então a vantagem para o uso dessa solução, por se tratarem de sistemas leves. Como ocorreu na distância entre pórticos de 5 metros, os modelos AI-10-TS-X e AA-10-TS-X possuem uma diferença desprezível entre o consumo dos modelos, de cerca de 1%, sendo essa diferença explicada pela definição de variáveis do modelo, que não leva em consideração a utilização de reforços de chapas nos perfis.

Para o vão de 80 metros a diferença entre os consumos se acentua, sendo que os modelos AA-10-TS-X e AA-10-SJ-X reduzem o consumo em cerca de 1%. Isso se explica pela parametrização dos modelos, levando em consideração que grande parte

dos perfis utilizados para 70 metros de vão continuam atendendo para o vão de 80 metros. Vê-se que a diferença entre o modelo de maior consumo AR-10-TS-X e o de menor, AA-10-SJ-X aumenta para 45%..

Para o vão de 90 metros a diferença entre os consumos continua a se acentuar, sendo a diferença entre o modelo de maior consumo, AR-10-TS-X e o de menor, AA-10-SJ-X, igual a 52%. Para este vão observa-se que o modelo AR-10-SJ-X ultrapassa o consumo do modelo com o menor consumo entre os que possuem a solução de terças soldadas, o modelo AA-10-TS-X, essencialmente indica a grande desvantagem da escolha dos modelos AR-10-TS-X e AR-10-SJ-X para o vão de 90 metros.

Para o vão de 100 metros a diferença entre os consumos chega ao máximo, sendo a diferença para o modelo de maior consumo e o de menor, AR-10-TS-X e AA-10-SJ-X igual a 63%. Para esse vão, também se observa que o modelo AR-10-SJ-X tem o consumo maior que o modelo de segundo maior consumo com terça de solução soldada.

Na Figura 76, pode ser visto o gráfico com a taxa de consumo de aço para modelos laminados abertos com distância entre pórticos de 10 metros e levando em consideração o consumo das terças, constituídas de perfis "I" soldados e de perfis *Steel Joist* e dos contraventamentos horizontais e verticais, estes em formas de "K". Na Figura 77, observa-se o contraventamento vertical em forma de "Y".

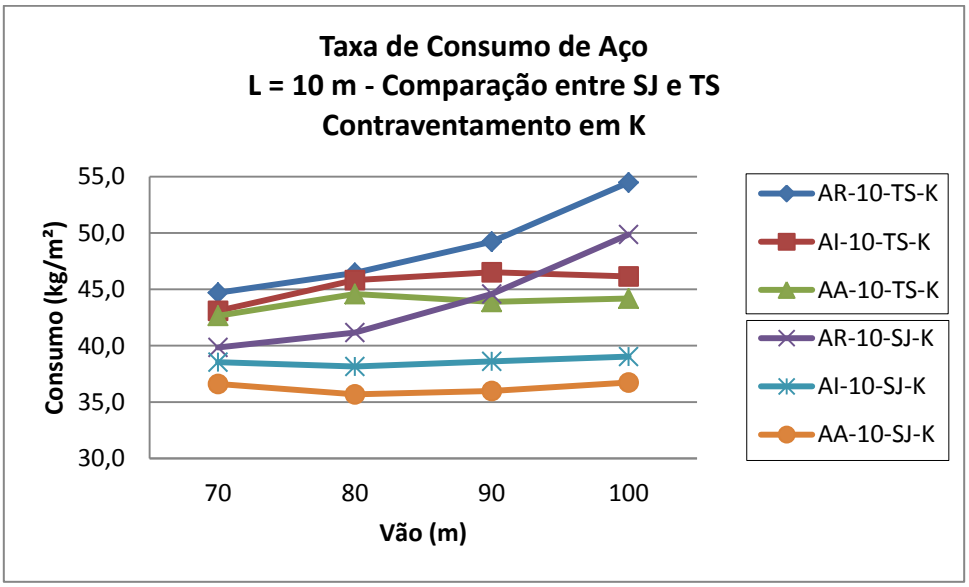

Figura 76 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis abertos com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em "K"

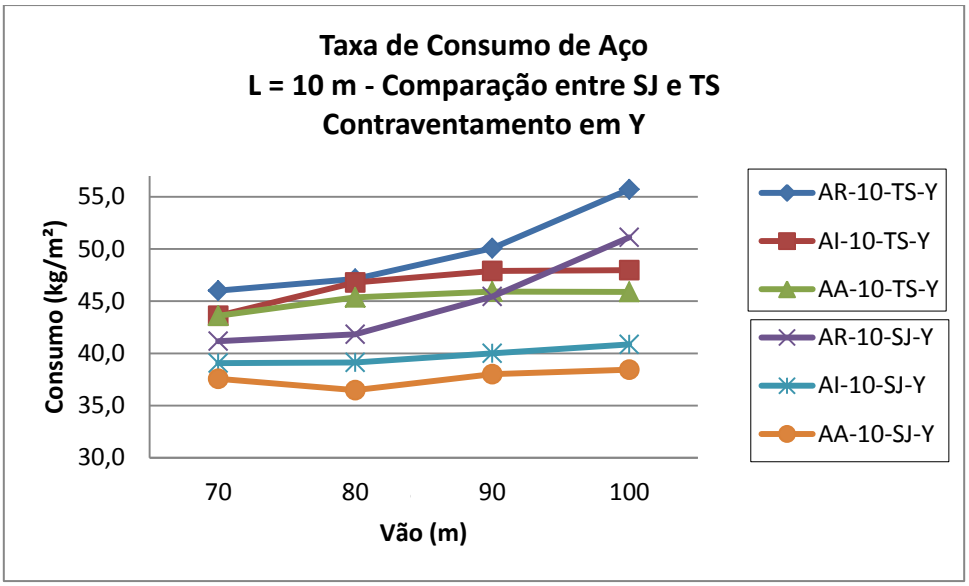

Figura 77 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis abertos com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em “Y”

Observa-se que a tendência de consumo mantém-se análogas nos modelos de contraventamento em "X", "K" e "Y". Observa-se que solução em "Y" possui um maior consumo. É importante salientar que no dimensionamento dos contraventamentos o mais importante foi a esbeltez dos elementos frente à verificação de tração ou compressão axial do elemento.

O fator predominante no dimensionamento em Y foi o deslocamento lateral do pórtico. Por este motivo o consumo do contraventamento em "Y" ficou maior que os demais. Com isso, verifica-se que a solução de contraventamento em "X" é a mais econômica em todos os casos. Contudo, caso opte-se por aberturas para passagem de pessoas ou equipamentos, este tipo de contraventamento não é o mais indicado, utilizando-se então o contraventamento em "K" ou "Y", que garantem um espaço para passagem ainda maior, em detrimento do menor consumo de aço.

Por fim, vê-se que o modelo AA-10-SJ-X é o modelo que possui o menor consumo entre os demais, para todos os vãos, sendo a escolha mais indicada para ser utilizada quando se utilizar estruturas planas com distância entre pórticos de 10 metros. Conforme os resultados obtidos para todos os vãos, vê-se que a solução de terça constituída de perfil *Steel Joist* é cerca de 25% mais econômica, em relação ao consumo de aço do que a solução de terça constituída de perfis soldados. Na Figura 78 pode ser vista uma taxa de consumo global comparativa dos modelos com terça em perfil soldado e soluções de contraventamento em “X”, “K” e “Y”.

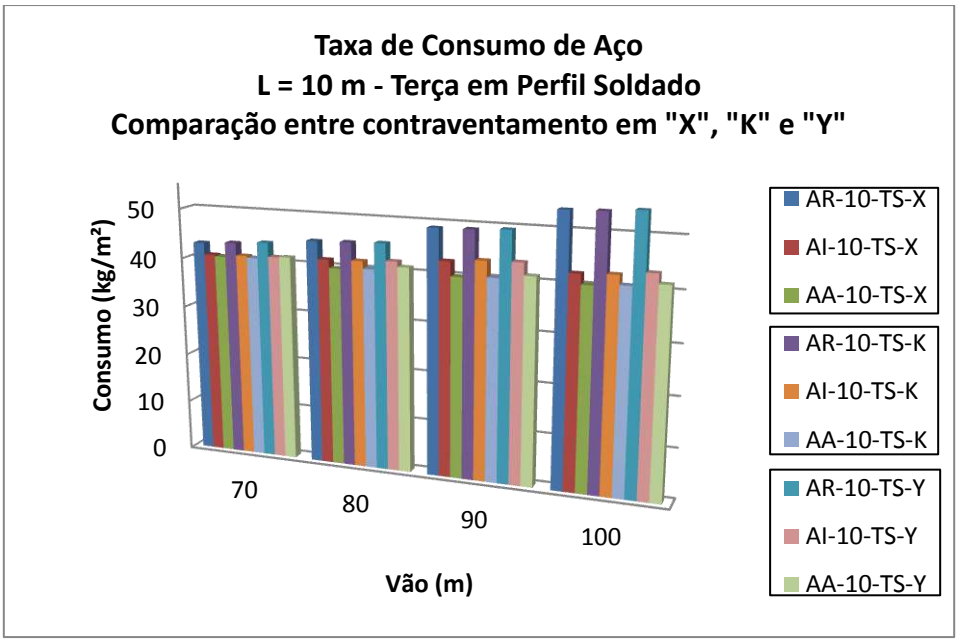

Figura 78 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 10 metros com terça em perfil soldado.

Na Figura 79 pode ser vista taxa de consumo global dos modelos com terça em perfil *Steel Joist* e soluções de contraventamento em “X”, “K” e “Y”. Nesta Figura-se evidencia-se claramente que o consumo de aço para os modelos constituídos com terças *Steel Joist* é menor que os modelos com terça em perfis soldados, mesmo com o contraventamento em “Y”, que apresenta o maior consumo dentre todos os modelos.

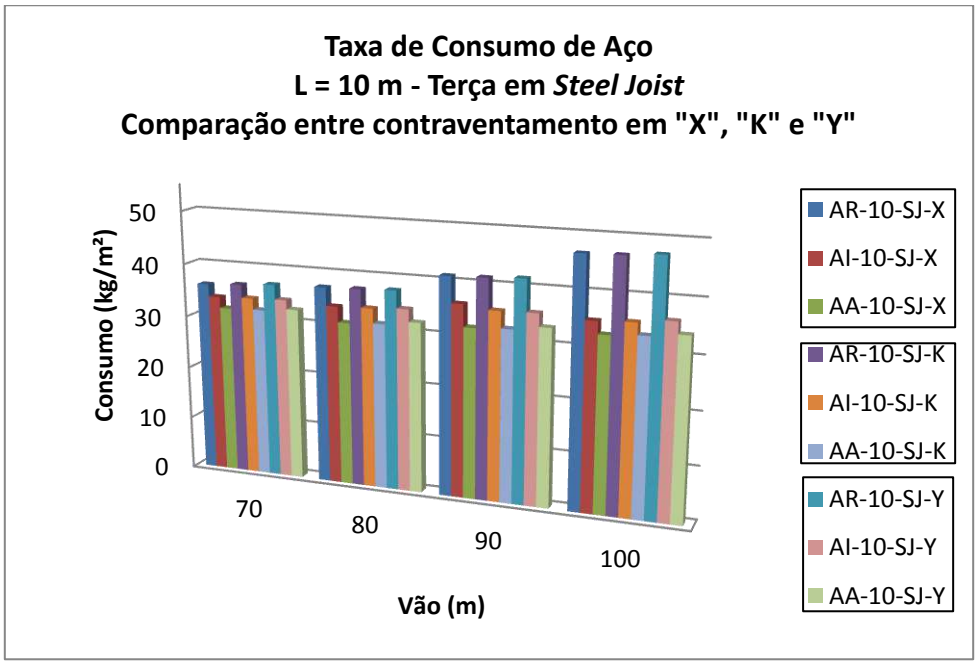

Figura 79 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 10 metros com terça em *Steel Joist*.

Na Figura 80 pode ser vista a taxa de consumo entre todos os modelos estruturais abertos, já levando em consideração a solução de terça constituída de perfis soldados e do tipo *Steel Joist* e com o contraventamento em X, visto que é a solução de contraventamento com menor consumo. Vê-se que o modelo com melhor resultado é o modelo constituído de treliça em arco com distância entre pórticos de 10 metros.

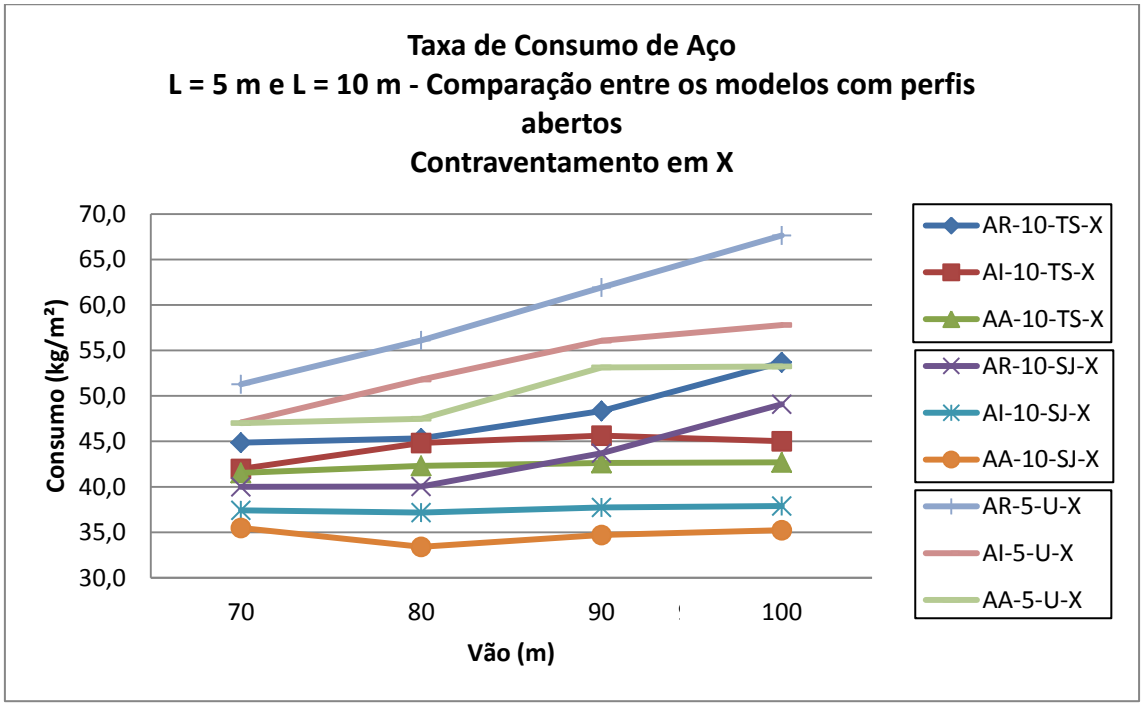

Figura 80 – Comparação da taxa de consumo de aço entre todos os modelos constituídos de perfis abertos

5.3. Análise comparativa entre os modelos tubulares

5.3.1. Análise dos modelos com distância entre pórticos de 5 metros

Na Figura 81 pode-se observar o gráfico com a taxa de consumo de aço para os modelos tubulares com distância entre pórticos de 5 metros e levando em consideração o consumo das terças e consumo dos contraventamentos horizontais e verticais. Lembra-se que para os modelos com distância entre pórticos de 5 metros foi levado em consideração as terças constituídas de perfis tubulares e o contraventamento em forma de “X”.

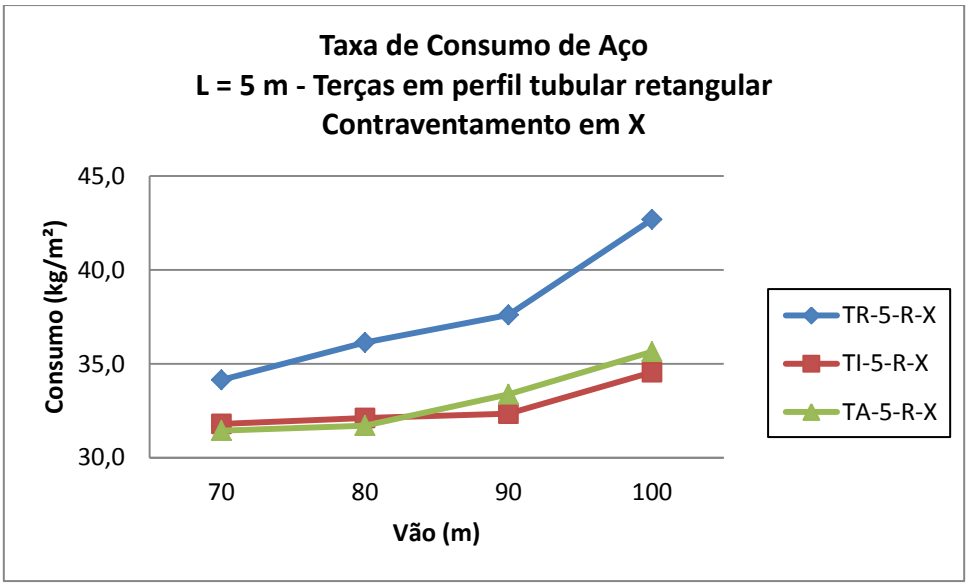

Figura 81 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 5 metros

Observa-se que para o vão de 70 metros o modelo TR-5-R-X possui um consumo de aço maior que os modelos TI-5-R-X e TA-5-R-X, apenas 1,4 e 2,4%, respectivamente, devendo-se ao fato da parametrização dos modelos (levando em consideração que os três modelos possuem o mesmo perfil inicial para dimensionamento). Além disso, houve uma redução entre a diferença do consumo entre os três modelos, devido ao fato do consumo de contraventamento e terça serem menores no modelo TR-5-R-X que nos demais.

Ao variar o vão para 80 metros, a diferença entre os consumos aumenta consideravelmente, sendo modelo TR-5-R-X possuindo um consumo 13% maior que os demais. Observa-se ainda que não há diferença entre o consumo dos modelos TI-5-R-X e TA-5-R-X. Isso se dá devido ao fato dos componentes adicionais da estrutura (contraventamento e terças) do modelo TA-5-R-X possuir consumo maior que o modelo TI-5-R-X, devido aos esforços de vento nas terças serem maiores neste modelo, fazendo com que as terças tenham dimensões maiores.

Para o vão de 90 metros, o modelo TR-5-R-X continua com o consumo maior que os demais modelos, com uma diferença de 14% para o modelo TI-5-R-X e 11% para o modelo TA-5-R-X. Visualiza-se que neste vão o modelo TI-5-R-X possui um consumo cerca de 3% menor que o modelo TA-5-R-X. Isso se deve ao fato, já explicado anteriormente, que os modelos TA-5-R-X em todos os vãos possuem um consumo

maior dos componentes adicionais, fazendo com isso que esse modelo tenha um consumo global maior que o modelo TI-5-R-X.

No vão de 100 metros, o modelo TR-5-R-X tem um aumento considerável no consumo, ficando aproximadamente 19% maior que o modelo de menor consumo (TI-5-R-X).

Por fim, vê-se que o modelo TA-5-R-X possui o menor consumo nos vãos de 70 e 80 metros e o modelo TI-5-R-X possui o menor consumo nos vãos de 90 e 100 metros. Evidencia-se que a maior diferença entre ambos está nos vão de 90 e 100 metros quando o modelo TI-5-R-X tem um consumo médio de aproximadamente 3% de diferença em relação ao modelo TA-5-R-X. Verificando a partir de uma média entre os consumos que a diferença é 1% favorável aos modelos TI-5-R-X, tem-se indício de que esse modelo é a melhor solução para a distância entre pórticos de 5 metros. Na Figura 82, pode ser vista a taxa de consumo global de aço para os modelos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 5 metros.

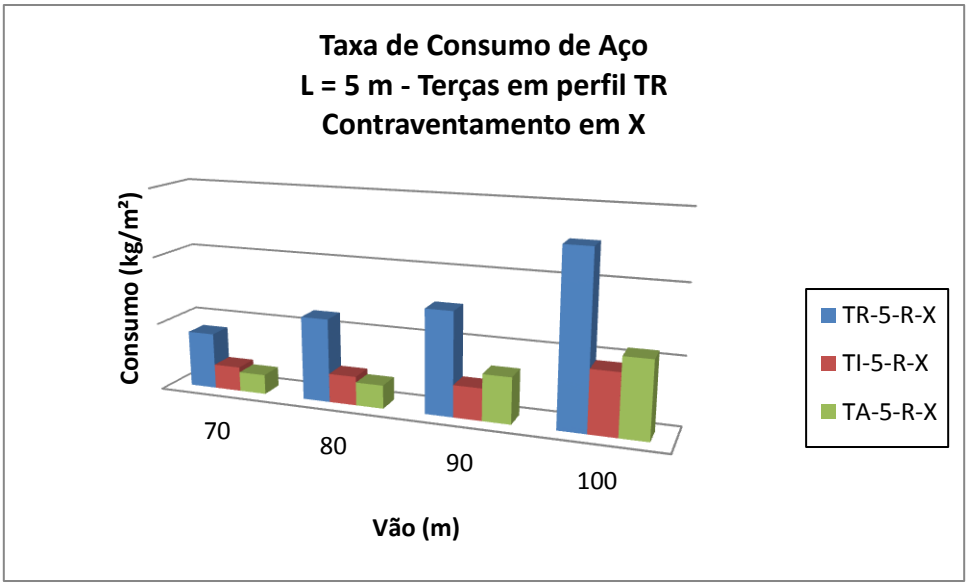

Figura 82 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 5 metros.

5.3.1. Análise dos modelos com distância entre pórticos de 10 metros

Na Figura 83 pode ser visto o gráfico com a taxa de consumo de aço para modelos tubulares com distância entre pórticos de 10 metros e levando em consideração

o consumo das terças, constituídas de perfis tubulares retangulares e *Steel Joist* e dos contraventamentos horizontais e verticais, estes em formas de "X".

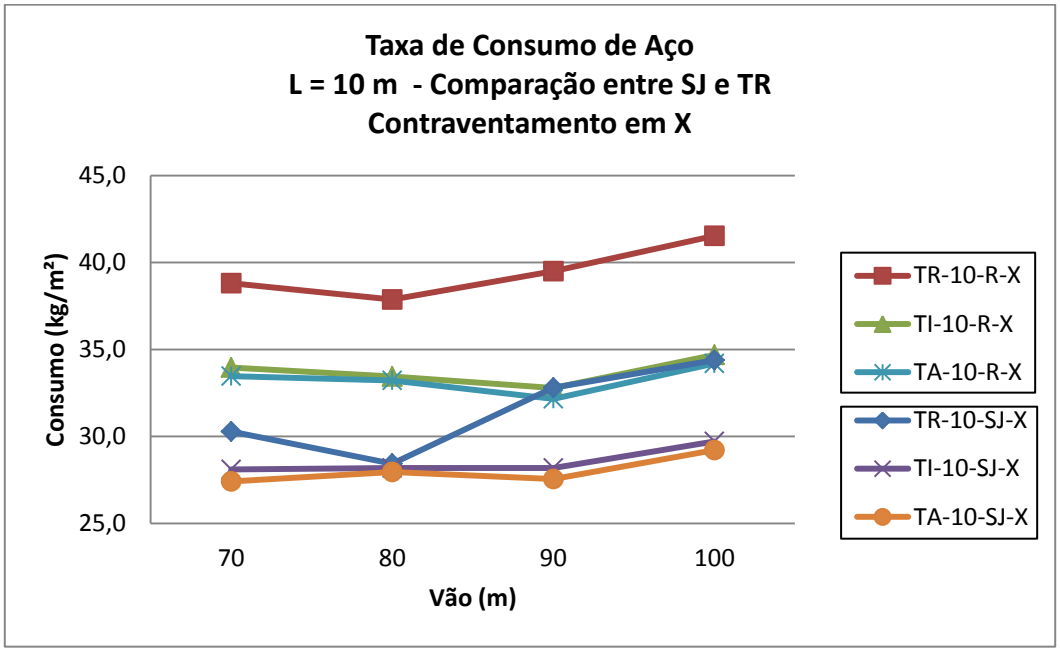

Figura 83 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em "X"

Verifica-se que para o vão de 70 metros com contraventamento em X o modelo que possui o menor consumo é o modelo TA-10-SJ-X (treliça em arco com terças em *Steel Joist*). A diferença entre esse e o modelo de maior consumo, TR-10-R-X, é de 36%. Desta análise é possível destacar que os modelos com terças constituídas de perfis *Steel Joist* levam vantagem em relação aos modelos com terças constituídas de perfis tubulares retangulares. É possível observar que o modelo que mantém maior consumo, seja com terças em perfis *Steel Joist*, seja com terças com perfis tubulares, é o modelo TR-10-R-X (treliça reta), sendo o modelo com a pior resposta em relação ao consumo de aço.

Para o vão de 80 metros, continua a tendência que o modelo com o menor consumo é o TA-10-SJ-X e com maior consumo é o TR-10-R-X. Contudo, a diferença entre os consumos reduz-se para 26%, 10% menor que no vão de 70 metros. Isso se deve ao fato do consumo do modelo TR-10-R-X diminuir devido à parametrização inicial do modelo e o consumo TA-10-SJ-X aumentar. É possível também observar que o consumo do modelo TR-10-SJ-X cai consideravelmente. Além de haver uma redução no consumo por conta do contraventamento, há também a redução no consumo da terça.

Essa redução é explicada pelo fato dos perfis que atendem ao vão de 70 metros continuam atendendo para o vão de 80 metros. A diferença média entre consumos das terças constituídas com perfis *Steel Joist* e das terças com perfis tubulares é de 19%, com a primeira em vantagem em relação ao consumo.

Em relação ao vão de 90 metros, a diferença percentual entre os modelos de menor e maior consumo, TR-10-R-X e TA-10-SJ-X, respectivamente, volta a aumentar, ficando essa diferença em 30%. Essa diferença é explicada pelo aumento considerável no consumo do modelo TR-10-R-X e uma redução no consumo do modelo TA-10-SJ-X. A diminuição no consumo do modelo TA-10-SJ-X se dá pelo fato do aumento do consumo dos perfis constituintes do pórtico principal terem sido pequenos em relação à diminuição no consumo do contraventamento e das terças. Neste vão é possível observar que o modelo TR-10-SJ-X tem um aumento tão grande no consumo de aço e este fica com um consumo maior que os modelos com terças em perfis retangulares, evidenciando que para vãos acima de 90 metros, os modelos com treliça de cobertura reta são menos eficientes. A diferença entre consumos nas soluções distintas de terças para o vão de 90 metros chegam a 15%, devido ao fato do consumo do modelo TR-10-SJ-X ter aumentado consideravelmente.

Por fim, para o vão de 100 metros é possível verificar que os modelos com menor e maior consumo no total são os mesmos para todos os vãos estudados anteriormente (TA-10-SJ-X e TR-10-R-X). A diferença entre ambos mantém-se em 30%, devido ao fato do consumo do modelo TA-10-SJ-X ter aumentado mais que o modelo TR-10-TT-X. A diferença entre consumos das soluções distintas fica em 15%.

Na Figura 84, pode ser visto o gráfico com a taxa de consumo de aço para modelos tubulares com distância entre pórticos de 10 metros, levando em consideração o consumo das terças constituídas de perfis tubulares retangulares e *Steel Joist*, além dos contraventamentos horizontais e verticais, estes últimos em formas de “K”. Na Figura 85 encontram-se os resultados para contraventamento vertical em forma de “Y”.

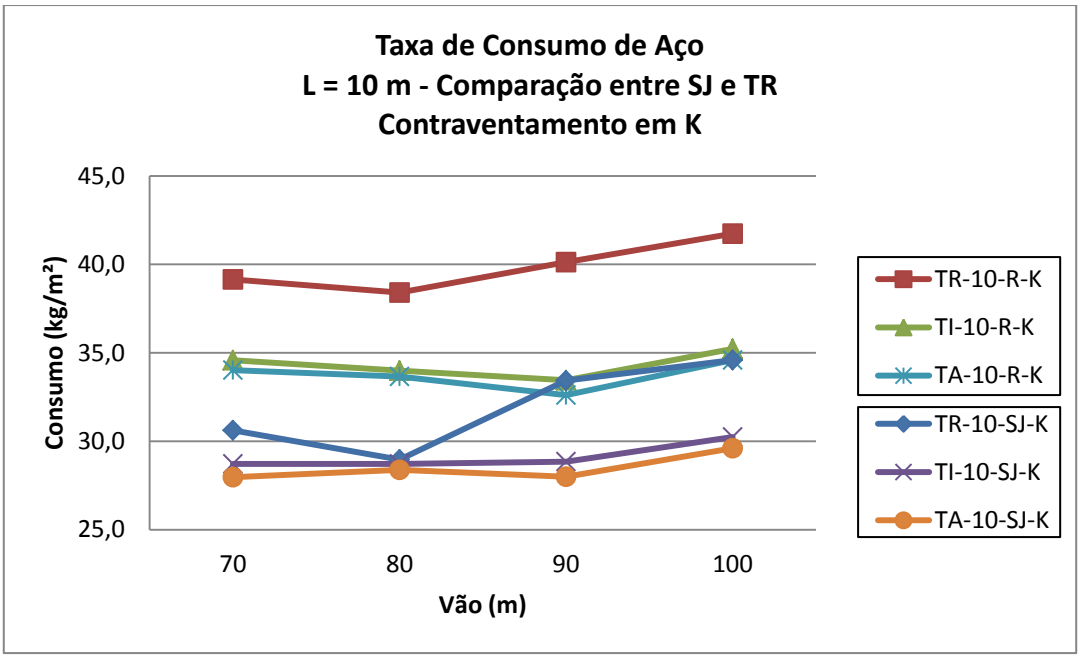

Figura 84 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em “K”

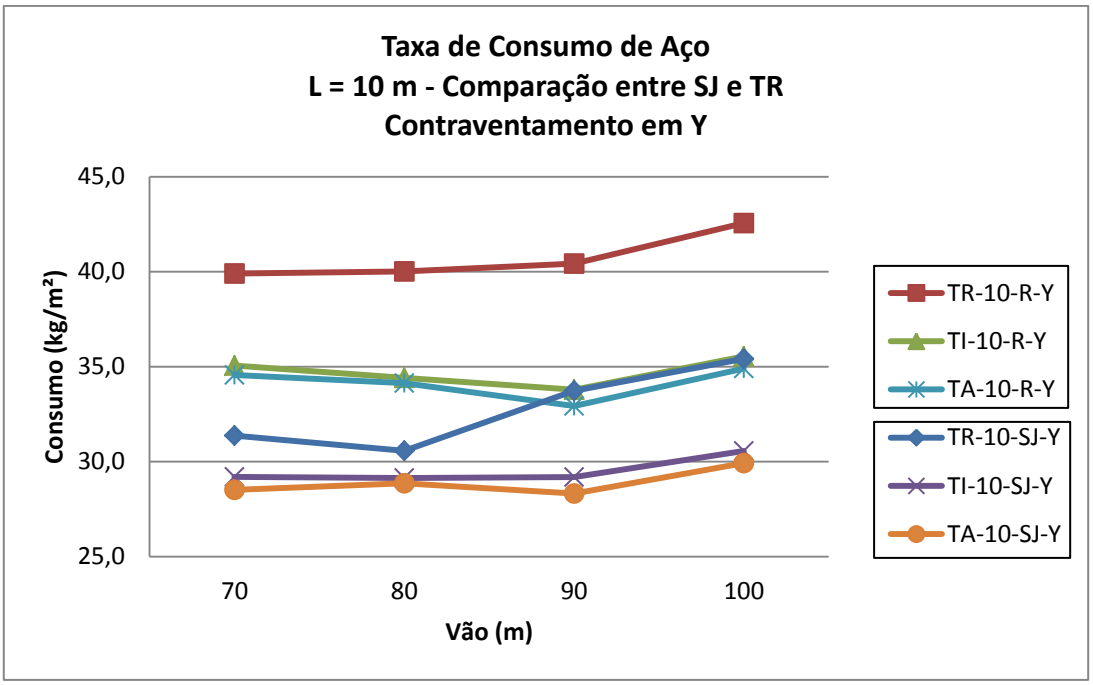

Figura 85 – Taxa de consumo de aço para modelos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 10 metros e contraventamento em “Y”

Pode ser observado que a tendência de consumo mantém-se praticamente a mesma em relaçao aos modelos “X”, “Y” e “K”. Verifica-se que a diferença média entre consumo ficou em cerca de 3%, sendo a solução com contraventamento em “Y” com o

maior consumo entre os demais. Assim como nos modelos constituídos de perfis abertos, o mais importante no dimensionamento dos contraventamentos foi a esbeltez das barras. Para o caso de hangares, onde é necessário o aproveitamento das laterais do galpão para a inserção de oficinas de manutenção, o contraventamento em “Y” é o mais indicado, uma vez que é possível com esta solução terem aberturas grandes o suficiente para passagem de máquinas e equipamentos. Contudo, a solução com maior economia em relação ao consumo é a solução em “X”, seguida da solução em “K”.

Vê-se então, por fim, que o modelo TA-10-SJ-X é o que possui menor consumo de aço em relação a todos os outros modelos, sendo a solução mais indicada para ser quando se utiliza pórticos planos com distância entre pórticos de 10 metros. Conforme o estudo dos resultados demonstra, vê-se que a solução de terças em perfis *Steel Joist* é a mais econômica, tendo uma diferença média de 18% em relação a solução com terças em perfis tubulares retangulares.

Na Figura 86 pode ser vista uma variação global entre a taxa de consumo dos modelos com terça em perfil tubular retangular e soluções de contraventamento em "X", "K" e "Y". Nesta Figura pode ser observada claramente a desvantagem dos modelos com a cobertura em treliça reta frente aos demais.

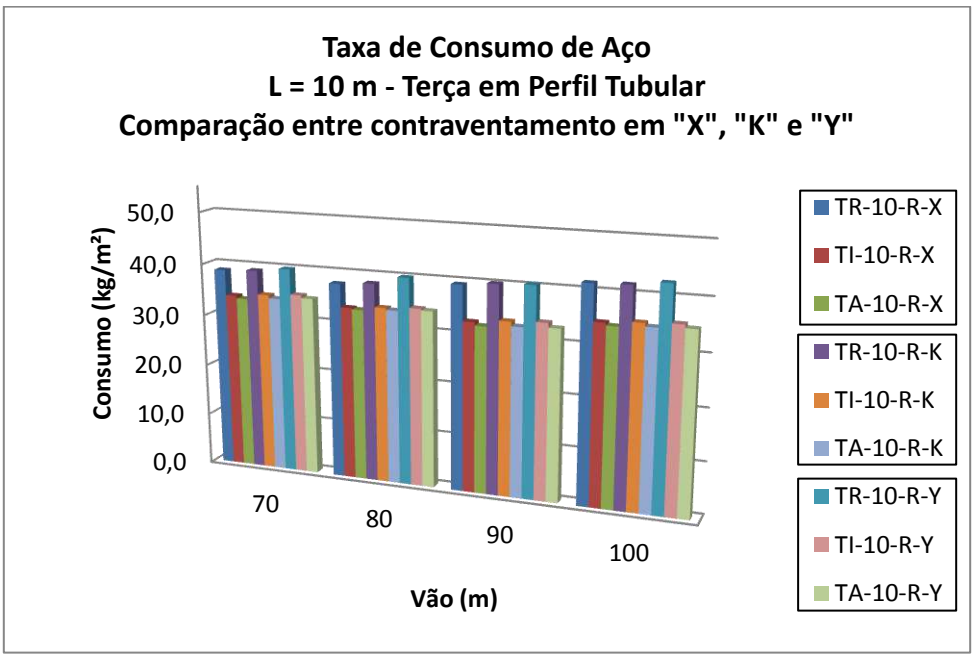

Figura 86 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 10 metros com terça em perfil tubular.

Pode-se visualizar na Figura 87 taxa de consumo global dos modelos constituídos de perfis tubulares com terças em perfil *Steel Joist* e com as soluções de contraventamento distintas em "X", "K" e "Y". Pode ser visualizado nesta Figura que os modelos constituídos com terças *Steel Joist* possuem menor consumo entre os modelos constituídos com terças tubulares. Vê-se claramente que para o vão de 80 metros, os modelos com a cobertura em treliça reta não levam tanta desvatagem frente aos demais como nos outros vãos.

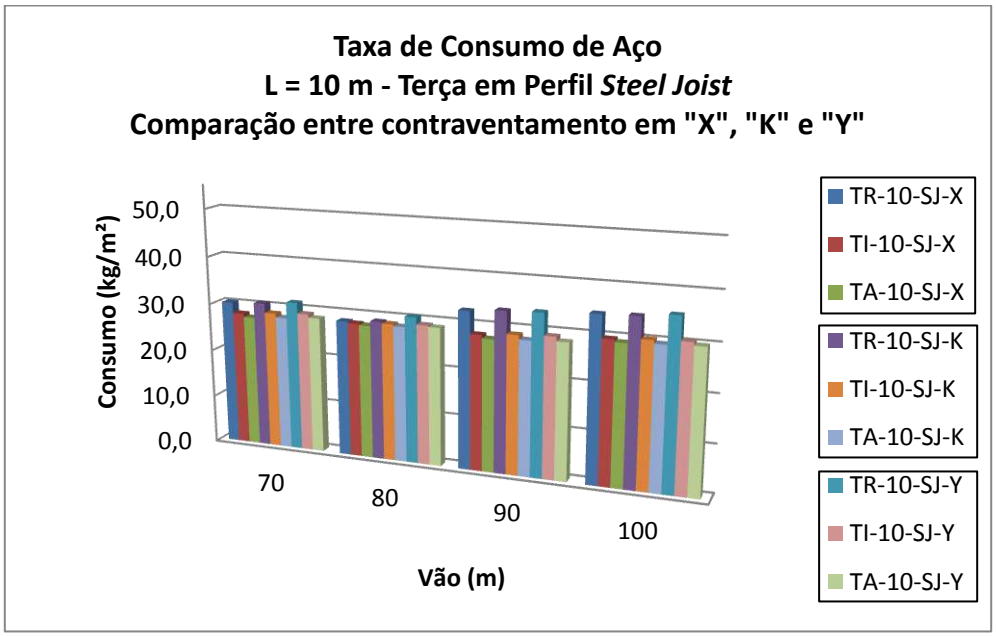

Figura 87 – Taxa de consumo global por tipologia em função do vão livre, com distância entre pórticos de 10 metros com terça em *Steel Joist*.

Na Figura 88 pode ser observada a taxa de consumo entre todos os modelos estruturais constituídos de perfis tubulares.

Foi levado em consideração a solução de terça em perfis tubulares e a de perfis do tipo *Steel Joist*. A título de comparação e a criterio do autor, foram escolhidos os modelos com contraventamento em "X", uma vez que esta solução apresenta o menor consumo de aço global, como já mostrado anteriormente.

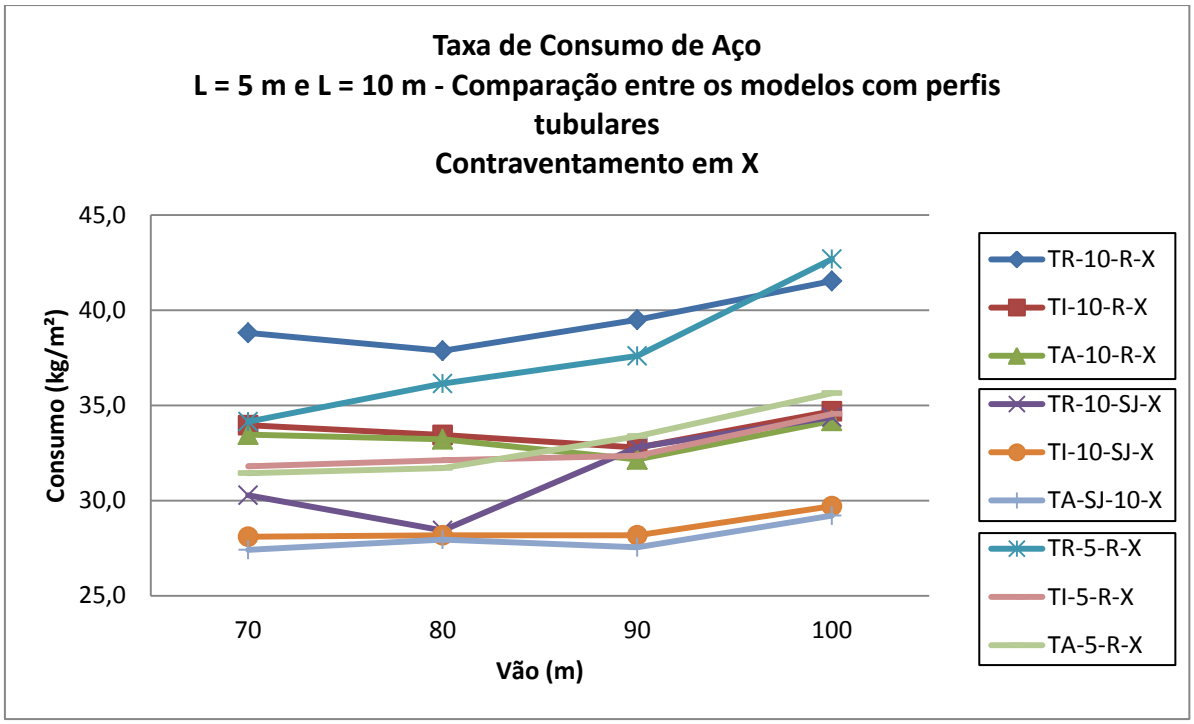

Figura 88 – Taxa de consumo comparativa entre todos os modelos constituídos de perfis tubulares

No vão de 70 e 80 metros, os modelos com distância entre pórticos de 10 metros com terças em perfis *Steel Joist* apresentam menor consumo. Contudo, nesses vãos, os modelos com distância entre pórticos de 5 metros com a cobertura inclinada (TTI) e cobertura em arco (TA) apresentam menor consumo de aço frente aos modelos com distância entre pórticos de 10 metros, com 8% a menos no consumo. Isso se deve ao fato de os elementos complementares do hangar (terças e contraventamento) possuírem um consumo maior para a distância entre pórticos de 10 metros, principalmente em relação às terças, uma vez que se fosse levado em consideração somente o consumo de aço do pórtico, os modelos com distância entre pórticos de 10 metros sempre levam vantagem.

Para o vão de 90 metros, os modelos citados anteriormente ficam com um consumo parecido, com uma pequena vantagem (cerca de 2%) para os modelos com distância entre pórticos de 5 metros. Neste vão, o consumo do modelo com cobertura reta com terça em *Steel Joist* aumenta consideravelmente ficando também este modelo com um consumo de aço maior que o modelo com cobertura inclinada e distância entre pórticos de 5 metros. Por fim, no vão de 100 metros, fica evidenciado que o modelo de menor consumo é o modelo com cobertura em arco com terça em perfil *Steel Joist* e

com distância entre pórticos de 10 metros (TA-10-SJ-X), enquanto o modelo com maior consumo é o modelo com cobertura reta e com distância entre pórticos de 5 metros (TR-5-R-X). Para esse vão de 90 metros também se observa que os modelos com distância entre pórticos de 5 metros voltam a ter um consumo maior, em 2%, do que os modelos com distância entre pórticos de 10 metros.

5.4. Análise comparativa dos modelos constituídos de perfis abertos com os modelos constituídos de perfis tubulares

5.4.1. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 5 metros

Na Figura 89, pode ser visto o gráfico comparativo entre os modelos com perfis abertos e modelos com perfis tubulares.

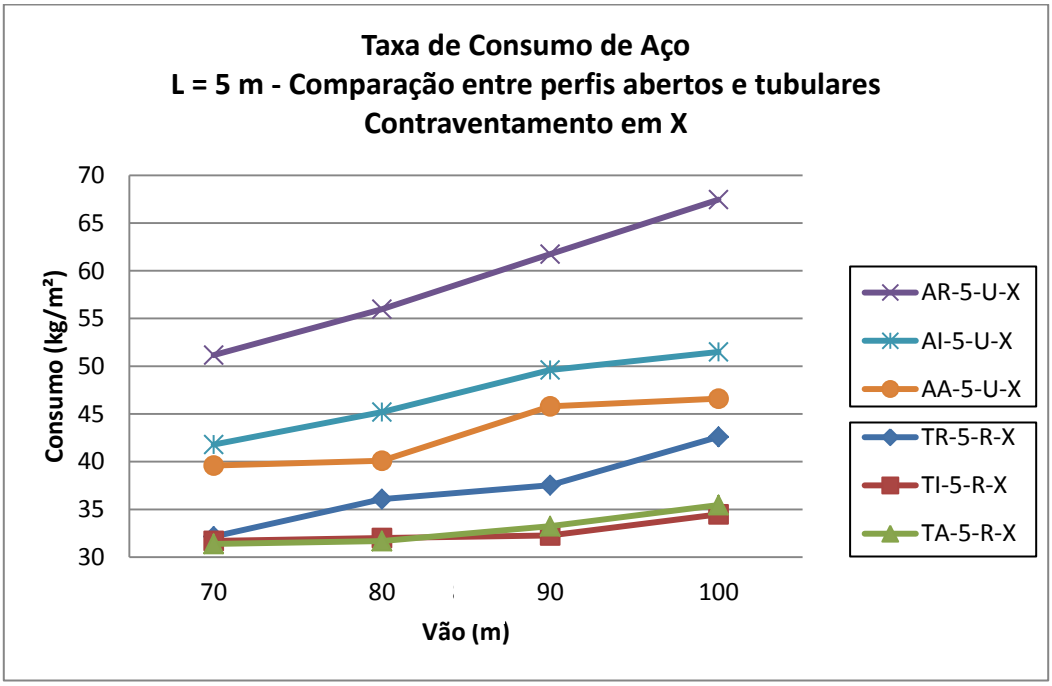

Figura 89 – Taxa de consumo de aço comparativa entre modelos com constituídos de perfis abertos e perfis tubulares

Para o vão de 70 metros, vê-se que a diferença entre o modelo com menor consumo (TA-5-R-X) e o de maior consumo (AR-5-U-X) é de 38%. Os modelos com menores consumos são o AA-5-U-X para perfis abertos e o TA-5-R-X para perfis tubulares. A diferença entre eles é de 20%, mostrando que os modelos constituídos por perfis tubulares possuem vantagem na questão do consumo de aço. Para o vão de 80 metros, a diferença entre o maior consumo (AR-5-U-X) e o menor consumo (TA-5-U-

X) aumentou ainda mais, estando próximo de 43%. Vê-se também que para este vão, a diferença entre o perfil de maior consumo entre os tubulares (TR-5-R-X) e o de menor consumo entre os perfis abertos (AA-5-U-X) é de 11%. Esse é o vão em que essa diferença é a menor entre os modelos abertos e tubulares

Analisando o vão de 90 metros, percebe-se que a diferença entre o perfil com o menor consumo entre os abertos e o maior consumo entre os fechados aumenta para 48% e a diferença entre o maior consumo dos abertos e o menor consumo dos fechados (AR-5-U-X e TI-5-R-X, respectivamente) sobe para 49%.

Realizando uma média do consumo entre os modelos AR-5-U-X e TR-5-R-X, a diferença fica em torno de 59%. Entre os modelos AI-5-U-X e TI-5-R-X fica em torno de 44%. E entre os modelos AA-5-U-X e TA-5-R-X fica em torno de 30%. Nesta análise, observa-se que a maior redução do consumo entre pórticos constituídos de perfis abertos e tubulares se dá com os modelos com treliça reta. Com isso, vê-se que, de numa maneira global, os perfis tubulares são 44% mais econômicos que os perfis abertos na questão de consumo de aço, sendo uma opção viável para o projeto de hangares de grandes vãos. Na Figura 90 pode-se ver uma linha de tendência dos valores médios de consumo dos modelos com perfis abertos e os modelos com perfis tubulares.

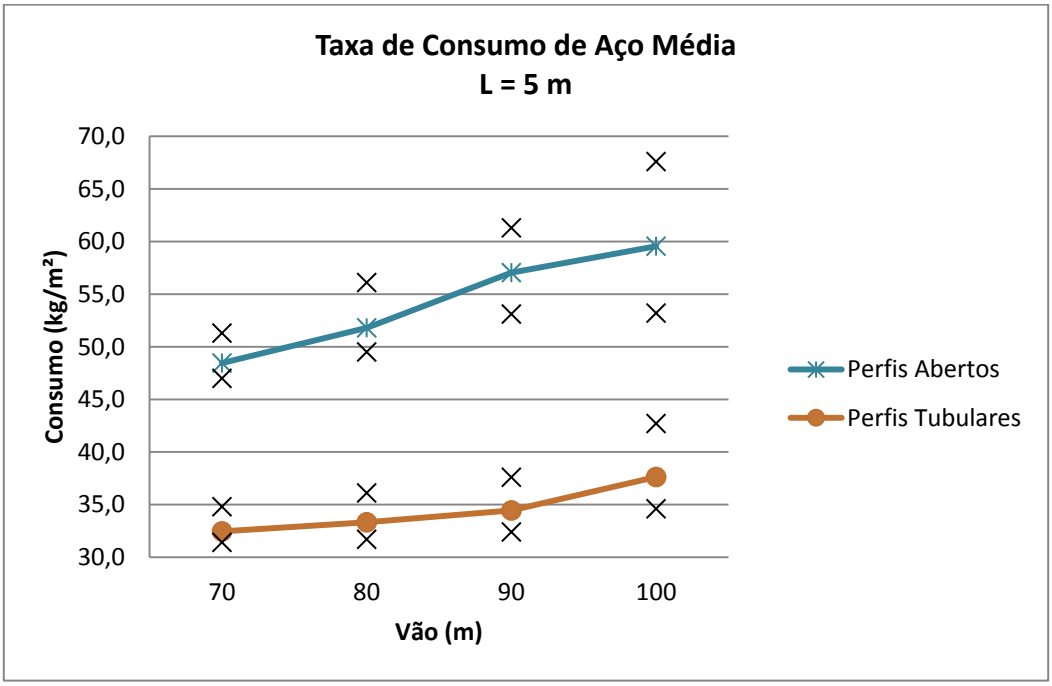

Figura 90 – Taxa de consumo de aço média entre modelos constituídos de perfis abertos e tubulares com distância entre pórticos de 5 metros

5.4.2. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 10 metros

Na Figura 91 pode ser visto o gráfico comparativo entre os modelos com perfis abertos e modelos com perfis tubulares com distância entre pórticos de 10 metros. Lembra-se que não há diferença entre os modelos de contraventamento entre os perfis abertos e tubulares. Com relação às terças, nos modelos abertos as terças com perfil *Steel Joist* são constituídos de perfis U e nos modelos tubulares são constituídos de perfis tubulares quadrados. As terças convencionais nos modelos abertos são constituídas de perfis I soldados e nos modelos tubulares são constituídas de perfis tubulares retangulares. A título de comparação, foram escolhidos somente os modelos constituídos de contraventamento em X uma vez que estes apresentam um menor consumo de aço.

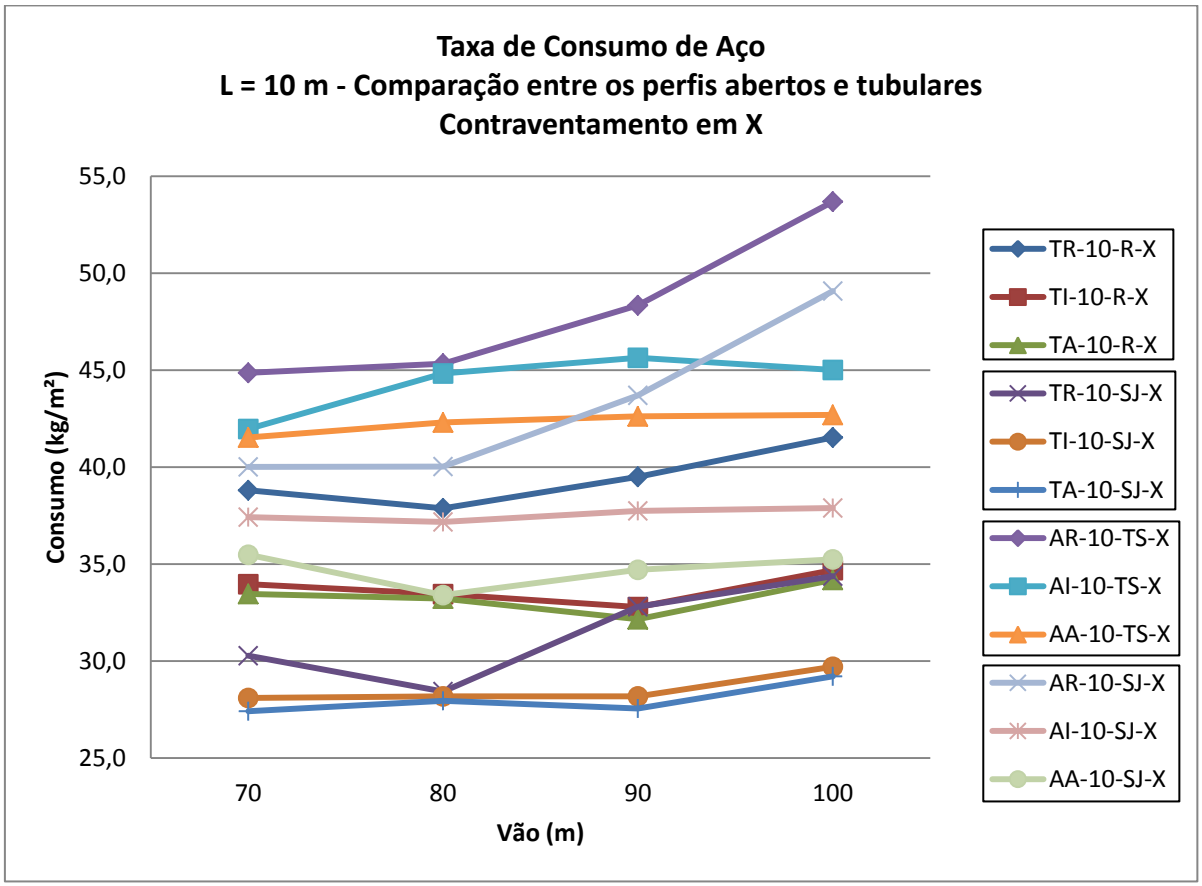

Figura 91 – Taxa de consumo de aço comparativa entre os modelos constituídos de tubulares com distância entre pórticos de 10 metros

Para o vão de 70 metros, vê-se que a diferença entre os modelos de maior consumo (AR-10-TS-X) e o de menor consumo (TA-10-SJ-X) é de 38%. Os modelos

com menor consumo de perfis abertos é o AA-10-SJ-X e o menor consumo para perfis tubulares é o TA-10-SJ-X e a diferença entre ambos é de 22%, o que evidencia a vantagem dos modelos com perfis tubulares para os perfis abertos. Contudo, vê-se para o vão de 70 metros que o modelo TR-10-R-X tem consumo maior que os modelos de perfis abertos AI-10-SJ-X e AA-10-SJ-X, evidenciando a desvantagem da cobertura constituída de treliça reta.

Para o vão de 80 metros, os modelos com maior e menor consumo mantém-se os mesmos em relação ao vão de 70 metros. A diferença entre o consumo de ambos mantém em 38% e a diferença entre o perfil de menor consumo para os tubulares (TA-10-SJ-X) e o de menor consumo para os perfis abertos (AA-10-SJ-X) reduz-se para 16%. Neste vão é possível observar que o consumo para o modelo AA-10-SJ-X diminui, fazendo com que a diferença de consumo deste modelo para o de menor consumo entre os modelos tubulares constituído de terça em perfil tubular, seja de apenas 1%, evidenciando que os modelos tubulares com terças em perfis fechados não levam vantagem em relação aos modelos tubulares com terças em *Steel Joist*.

No vão de 90 metros, os modelos com maior e menor consumo mantém-se os mesmos em relação aos vãos anteriores, sendo a diferença entre esses consumos estando em 42%, um aumento de 4% em relação aos vãos estudados anteriormente. Neste vão, todos os modelos constituídos de perfis tubulares levam vantagem em relação aos modelos constituídos de perfis abertos, exceto o modelo TR-10-R-X que tem o consumo maior que os modelos AI-10-SJ-X e AA-10-SJ-X, ambos constituídos de perfis abertos.

Visualizando o vão de 100 metros, vê-se que os modelos com maior e menor consumo ainda mantém-se os mesmos em relação aos vãos de 70, 80 e 90 metros, sendo que a diferença de consumo entre ambos aumentou para 45%. Evidencia-se, como em outros vãos, que os modelos abertos de menor consumo (AI-10-SJ-X e AA-10-SJ-X) somente levam vantagem em relação ao modelo TR-10-R-X levando em consideração uma comparação com os modelos tubulares, verificando então que, de uma forma geral, os modelos tubulares com distância entre pórticos de 10 metros levam vantagem frente aos modelos abertos com a mesma distância entre pórticos.

Na Figura 92 pode ser vista uma média de consumo entre os modelos de seção aberta e tubulares.

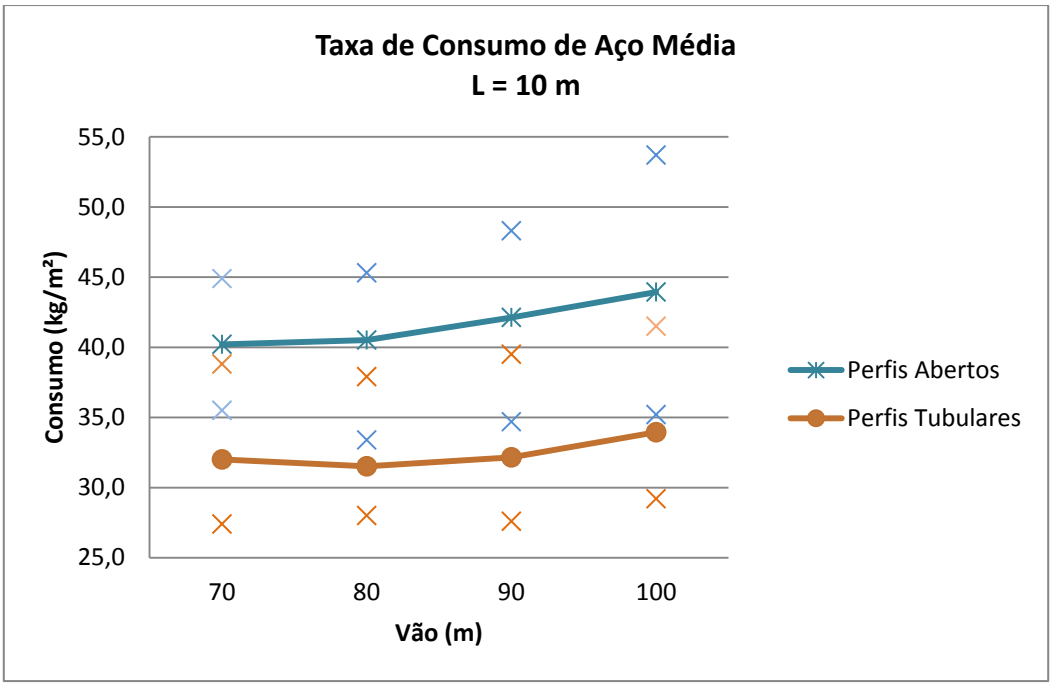

Figura 92 – Taxa de consumo de aço média entre modelos constituídos de perfis abertos e tubulares com distância entre pórticos de 10 metros

Pode ser observado, de uma maneira global, que os perfis tubulares são em média 22% mais econômicos que os perfis abertos, levando em consideração o consumo de aço para a distância entre pórticos de 10 metros.

5.4.2. Comparação entre os modelos com distância entre pórticos de 5 e 10 metros

Na Figura 93 pode ser visualizada uma comparação entre os modelos abertos e tubulares com distância entre pórticos de 5 e 10 metros.

Leva-se em consideração que os modelos com distância entre pórticos de 5 metros são compostos com contraventamento em "X" e com terças em perfis soldados, para os modelos abertos, e perfis tubulares, para os modelos tubulares. Os modelos com distância entre pórtico de 10 metros são compostos com contraventamento em "X", uma vez que este tipo foi o que apresentou o menor consumo de aço entre todos os modelos estudados e com terças em perfis soldados e *Steel Joist* para os modelos abertos e terças com perfis tubulares e *Steel Joist* para os modelos tubulares.

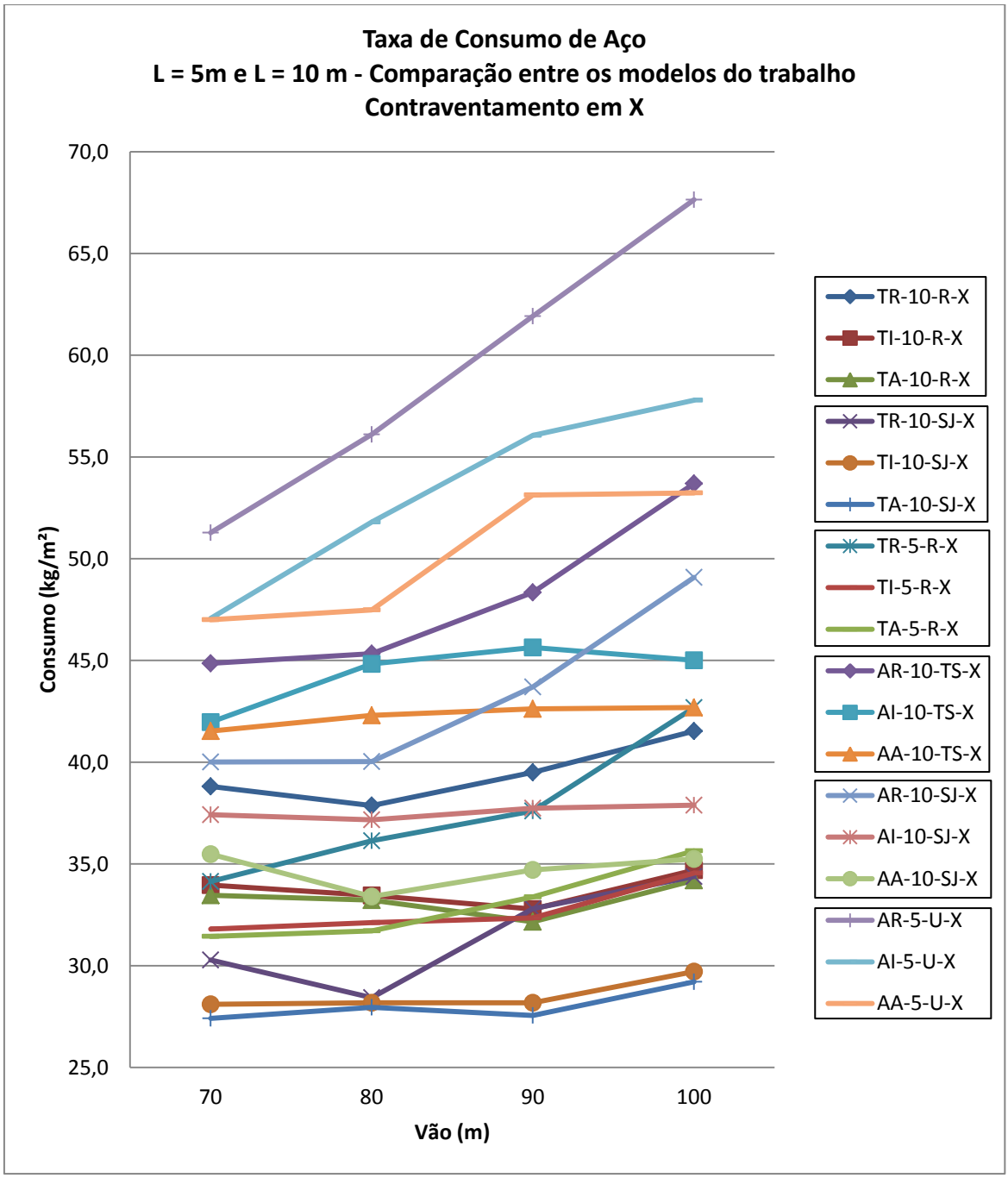

Figura 93 – Taxa de consumo de aço comparativa entre os modelos abertos e tubulares com distância entre pórticos de 5 e 10 metros

Vê-se que para o vão de 70 metros, o modelo que possui menor consumo é o modelo TA-10-SJ-X (cobertura em arco com terça em perfil *Steel Joist* e espaçamento entre pórticos de 10 metros) e o modelo com maior consumo é o AR-5-U-X, padrão que se segue em todos os vãos estudados (80, 90 e 100 metros). Vê-se que há uma tendência dos modelos constituídos de perfis tubulares terem consumo menor que os modelos com perfis abertos. Contudo, o modelo TR-10-R-X possui um consumo de aço tão grande

que para o vão de 100 metros, o mesmo tem um consumo maior que o modelo de menor consumo entre os modelos abertos com espaçamento entre pórticos de 5 metros, o que mostra que a construção deste modelo em perfis tubulares não é viável. Para os vãos de 70, 80, 90 e 100 metros, seis modelos constituídos de perfis tubulares (TA-10-SJ-X, TI-10-SJ-X, TR-10-SJ-X, TA-5-R-X, TI-5-R-X e TA-10-R-X) possuem consumo de aço menores do que o modelo de menor consumo entre os de perfis abertos (AA-10-SJ-X), evidenciando a vantagem da utilização dos perfis tubulares para a constituição de pórticos planos. Além disso, vê-se que, para a utilização de terças, sejam em perfis abertos ou perfis fechados, levam desvantagem frente a utilização dos perfis *Steel Joist*. Isso se deve ao grande vão (10 metros) que estes perfis devem vencer.

A tabela 13 faz um resumo dos modelos estudados neste trabalho com o contraventamento em X. A legenda "melhor" refere-se ao modelo que possui o menor consumo no vão estudado. A legenda "pior" refere-se ao modelo que o possui o maior consumo no vão estudado. Os modelos com a legenda "favorável" foram os escolhidos com o menor consumo de aço. Caso algum modelo constituído de perfis tubulares possuir um consumo de aço maior que um modelo com perfis abertos, esses serão marcados como desfavoráveis, assim como os demais modelos com consumo subsequente.

Tabela 13 – Quadro resumo dos modelos estudados com contraventamento em X

	70	80	90	100
AR-5-U-X	51,3	56,1	61,9	67,6
AI-5-U-X	47,1	51,8	56,1	57,8
AA-5-U-X	47	47,5	53,1	53,2
AR-10-SJ-X	40,0	40,0	43,7	49,1
AI-10-SJ-X	37,4	37,2	37,7	37,9
AA-10-SJ-X	35,5	33,4	34,7	35,2
AR-10-TS-X	44,9	45,3	48,3	53,7
AI-10-TS-X	42,0	44,8	45,6	45,0
AA-10-TS-X	41,5	42,3	42,6	42,7
TR-5-R-X	34,1	36,1	37,6	42,7
TI-5-R-X	31,8	32,1	32,4	34,6
TA-5-R-X	31,4	31,7	33,4	35,6
TR-10-R-X	38,8	37,9	39,5	41,5
TI-10-R-X	34,0	33,5	32,8	34,7
TA-10-R-X	33,5	33,2	32,2	34,2
TR-10-SJ-X	30,3	28,4	32,8	34,4
TI-10-SJ-X	28,1	28,2	28,2	29,7
TA-10-SJ-X	27,4	28	27,6	29,2

Legenda:

- Favorável
- Desfavorável
- Melhor
- Pior

6. Fabricação, transporte e montagem

6.1. Fabricação de estruturas metálicas

De acordo com Bellei (2010), para se compreender de forma mais clara os processos para fabricação de estruturas metálicas, é imprescindível que se conheça algumas noções sobre a execução das etapas que compõe o processo de fabricação das peças.

Ao passo que é de vital importância definir, da melhor forma possível, os modelos estruturais, escolhendo as tipologias que funcionam para cada tipo de uso de uma estrutura, é também importante que o projetista explicite no projeto estrutural os detalhes do projeto e croquis para fabricação. Segundo ESDEP (2016), é importante que o engenheiro projetista esteja consciente dos processos de fabricação que serão empregados na fabricação e na montagem, a fim de reduzir custos desnecessários. Um projeto faz uso eficiente do material (o material é mais barato quando encomendado em grande quantidade e materiais de pequenas quantidades com diferentes tamanhos devem ser evitados) e um bom desenho faz previsões adequadas para tolerâncias na fabricação e na montagem das peças.

Após este processo de elaboração do projeto, inicia-se a fabricação propriamente dita. Essa preparação é executada pela fábrica de estrutura metálica. De acordo o MD/SDI (1989), o aço estrutural passa por diversas operações ao longo da fabricação das peças estruturais. Essas operações podem variar de acordo com o tipo de fabricação. Em geral, as operações executadas na fábrica são: manuseio e corte do material, execução de gabaritos, traçagem, furação, desempenho, dobramento e calandragem, ajuste e alargamento de furos, parafusagem e soldagem, acabamento, controle de qualidade e limpeza e pintura.

6.2. Desenhos de fabricação dos modelos AR70-5 e TR70-5

A fim de exemplificar e consolidar o que foi mencionado nos capítulos anteriores sobre a fabricação de estruturas metálicas, serão apresentados alguns desenhos de fabricação dos modelos estruturais AR70-5 (Modelo com perfis abertos, treliça de cobertura reta, vão de 70 metros e distância entre pórticos de 5 metros) e

TR70-5 (Modelo com perfis tubulares, treliça de cobertura reta, vão de 70 metros e distância entre pórticos de 5 metros) estudados neste trabalho.

Na figura 94, pode-se observar como as peças serão denominadas neste trabalho. Os pilares (peça 1) de cada modelo tem a altura de 12 metros. O mesmo foi divido então em duas partes de 6 metros para facilitar no transporte nos modelos abertos. Para os modelos com perfis tubulares, uma parte possui 7 metros e a outra 5 metros (Figura 95). A treliça de cobertura (peça 2) de cada um desses modelos tem 70 metros. Para os modelos constituídos de perfis abertos, a mesma foi divida em oito partes iguais, o que dá um comprimento de 8,75 metros. Para os modelos constituídos de perfis tubulares, leva-se em consideração que a ligação será flangeada. Com isso, foi definida uma peça com o tamanho de 9,63 m, outra de 7,88 m e seis peças iguais com um comprimento de 8,75 m (Figura 96). Além disso, a peça que faz a ligação entre a coluna e a treliça de cobertura, chamada neste trabalho por "nó de pórtico" (peça 3), pode ser vista na Figura 97.

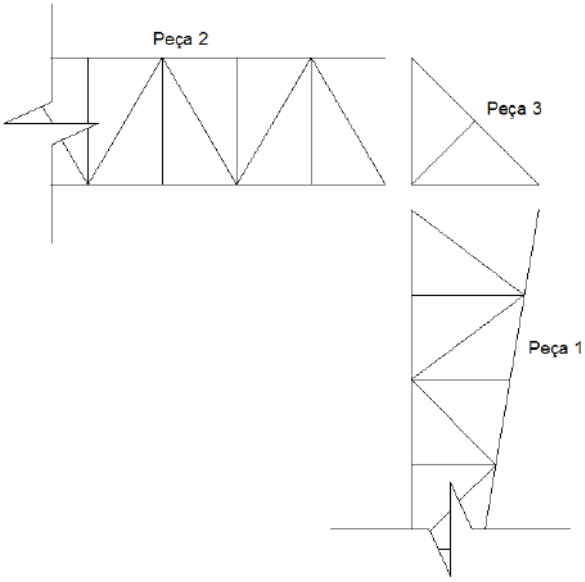

Figura 94 – Representação esquemática das peças adotadas na fabricação

Serão exemplificados neste trabalho, os detalhes típicos das ligações das peças 1, 2 e 3 e das ligações entre as peças 1-3 e 2-3, respectivamente. Lembra-se que os desenhos estão sem escala e são apenas representativos, demonstrando possíveis soluções para viabilizar a escolha dos modelos estruturais estudados neste trabalho. A memória de cálculo das ligações pode ser observada no ANEXO C desta dissertação.

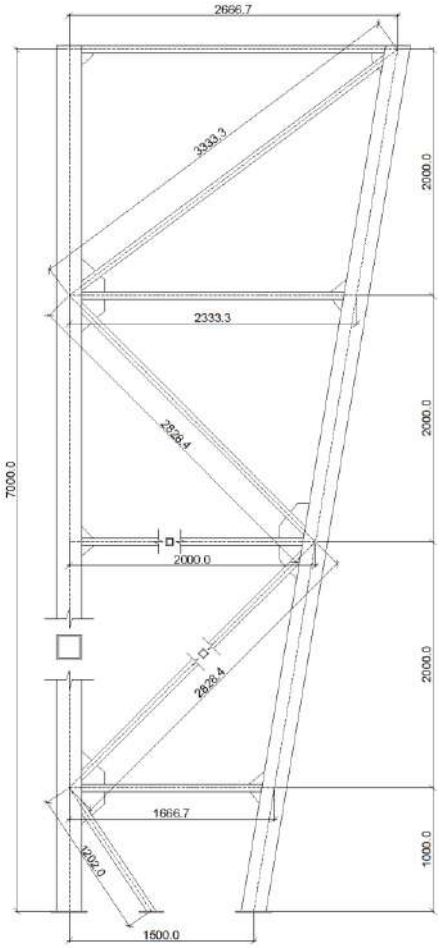

Figura 95 – Peça 1 (Coluna)

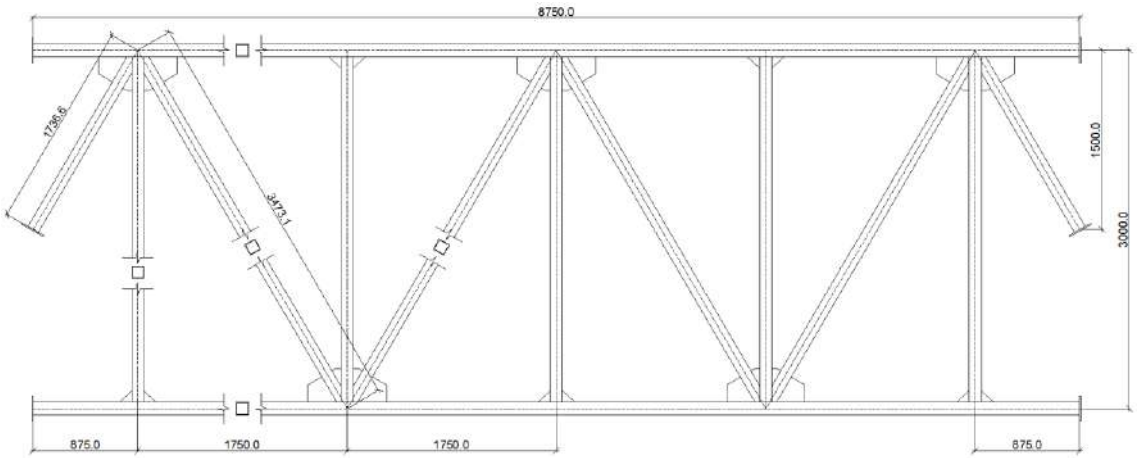

Figura 96 – Peça 2 (Treliça da cobertura)

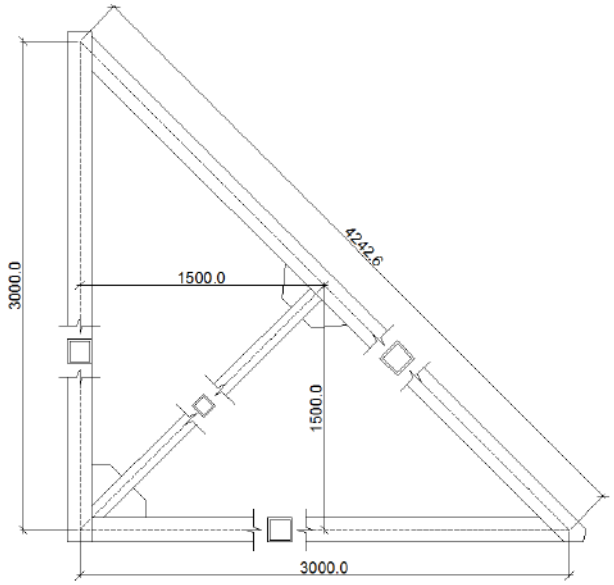

Figura 97 – Peça 3 (Nó de Pórtico)

6.2.1. Detalhes típicos das ligações

A seguir serão apresentados os detalhes típicos das ligações consideradas neste trabalho.

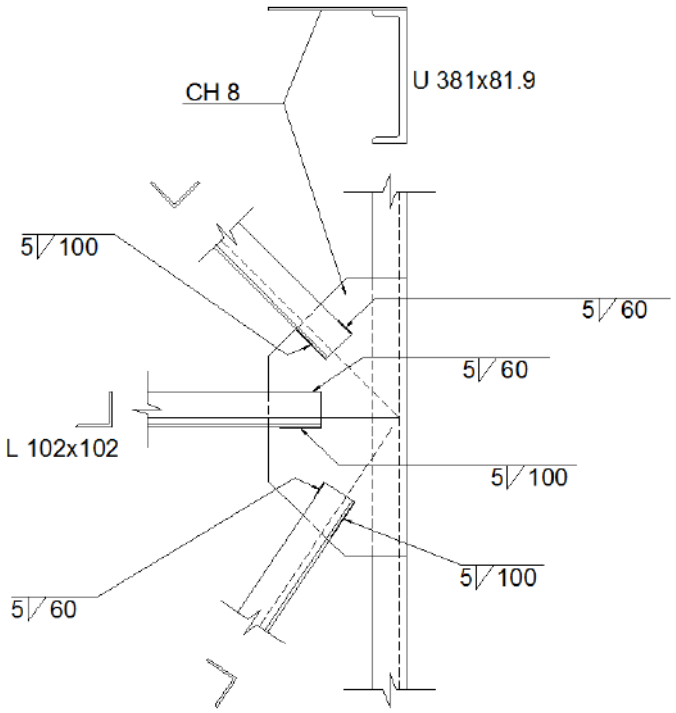

Figura 98 – Detalhe típico de ligação da peça 1 (Modelo AR70-5)

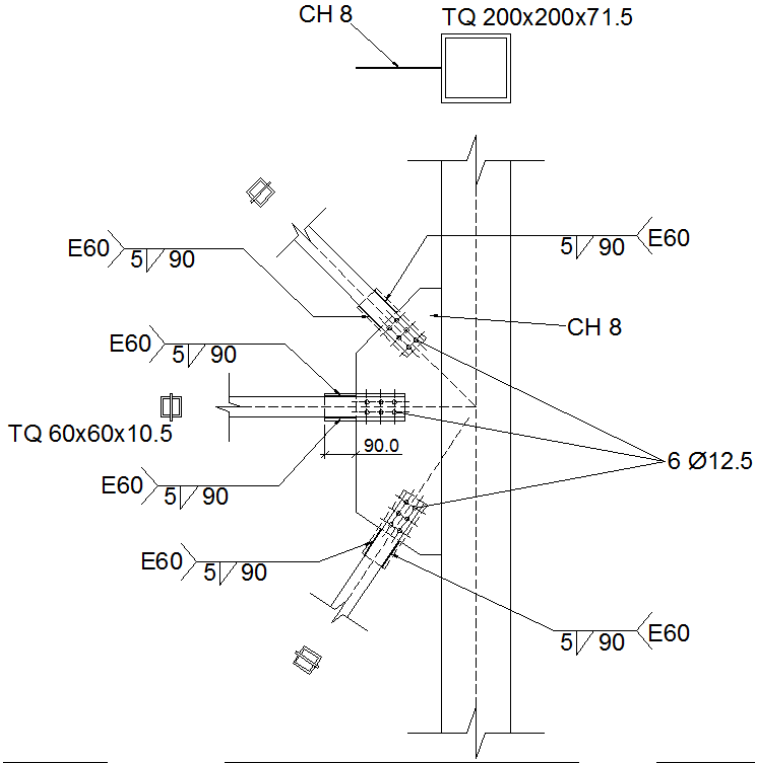

Figura 99 – Detalhe típico de ligação da peça 1 (Modelo TR70-5)

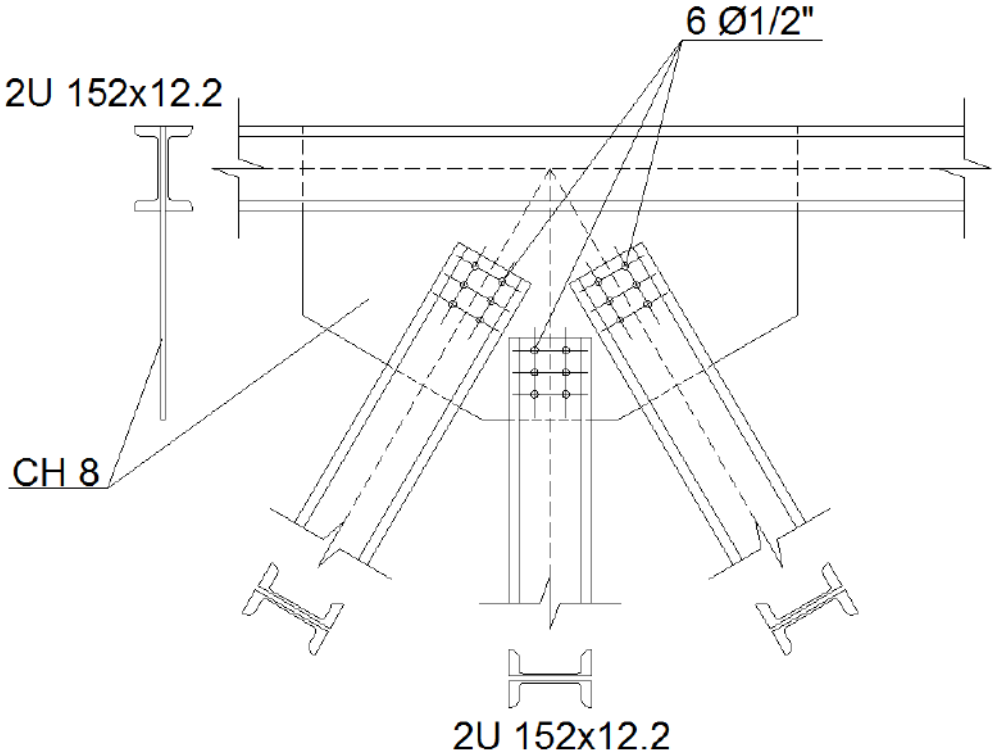

Figura 100 – Detalhe típico de ligação da peça 2 (Modelo AR70-5)

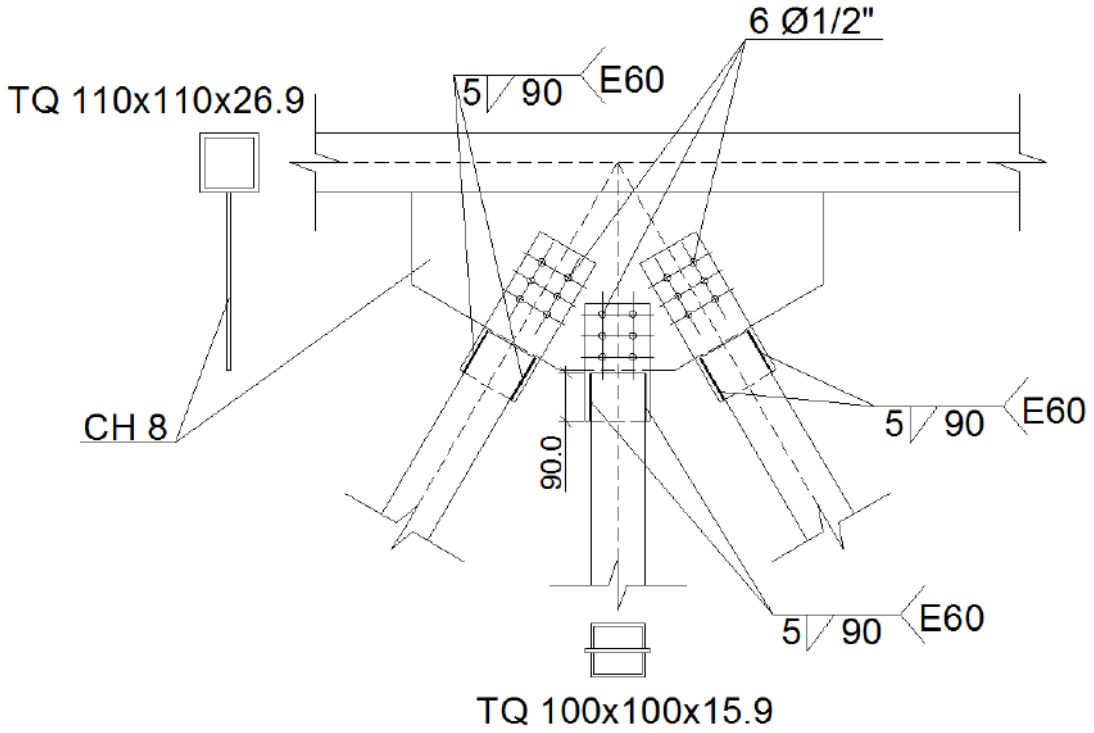

Figura 101 – Detalhe típico de ligação da peça 2 (Modelo TR70-5)

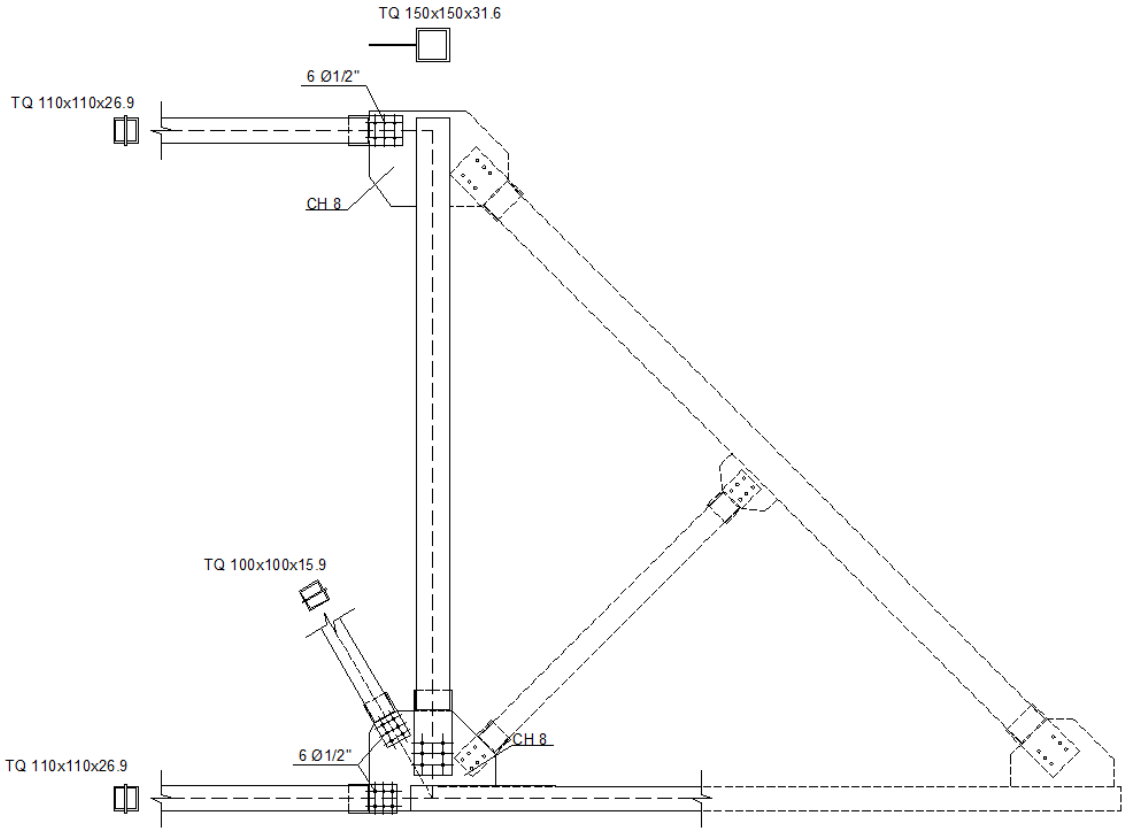

Figura 102 – Detalhe típico de ligação da peça 3 (Modelo AR70-5)

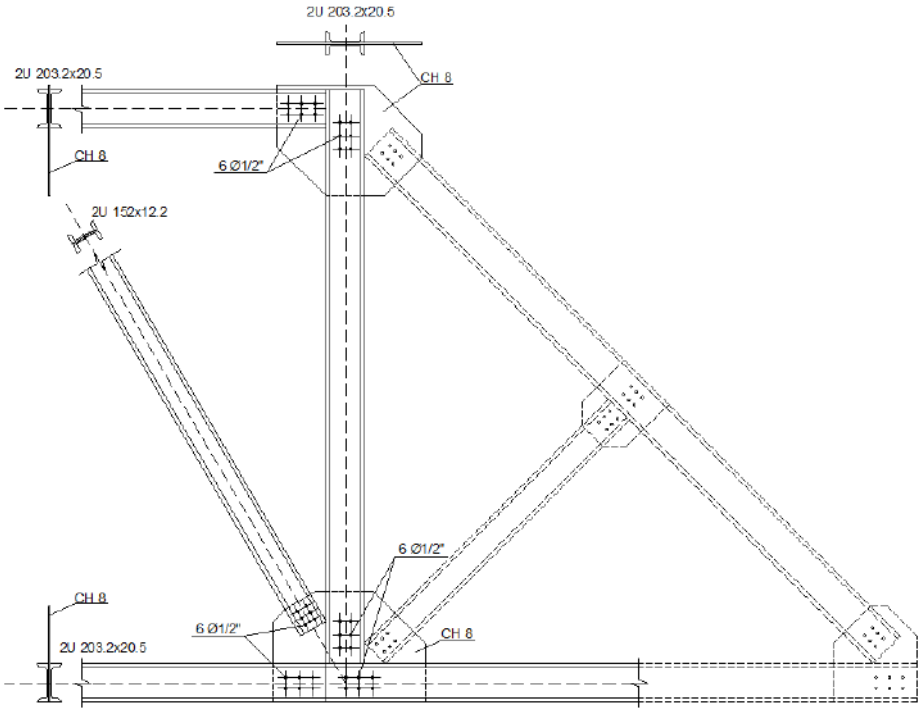

Figura 103 – Detalhe típico de ligação da peça 3 (Modelo TR70-5)

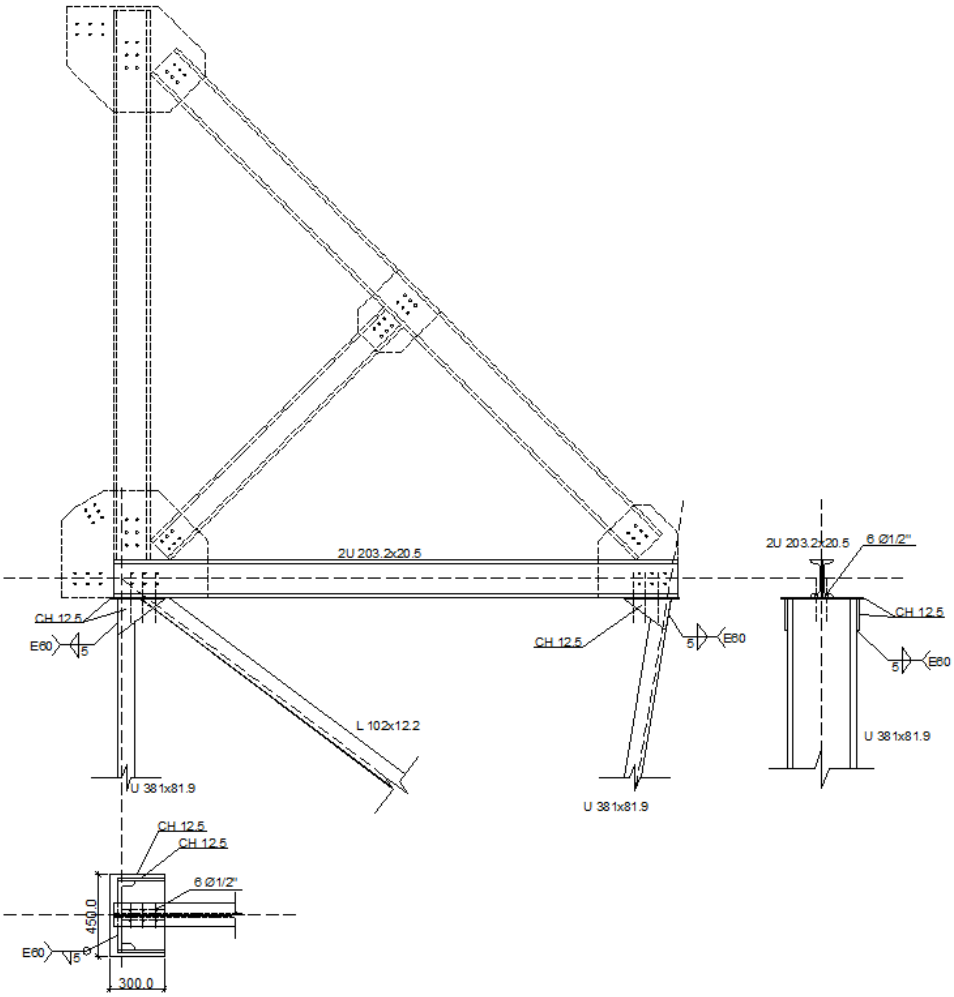

Figura 104 – Detalhe típico da ligação entre as peças 1-3 (Modelo AR70-5)

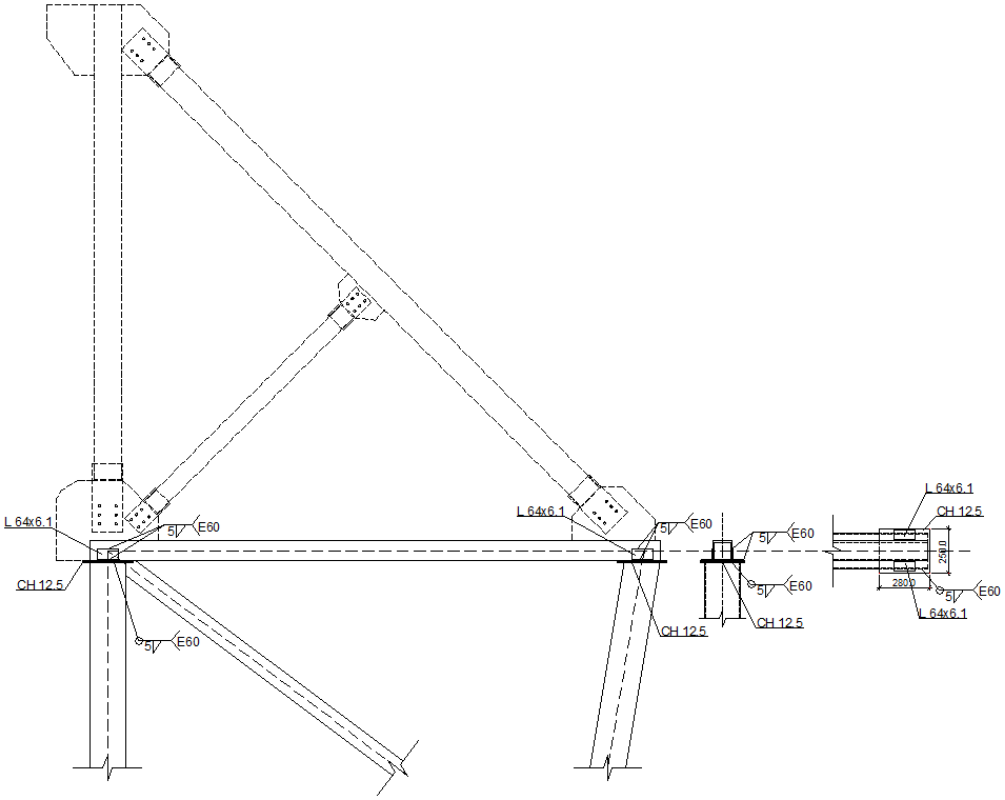

Figura 105 – Detalhe típico da ligação entre as peças 1-3 (Modelo TR70-5)

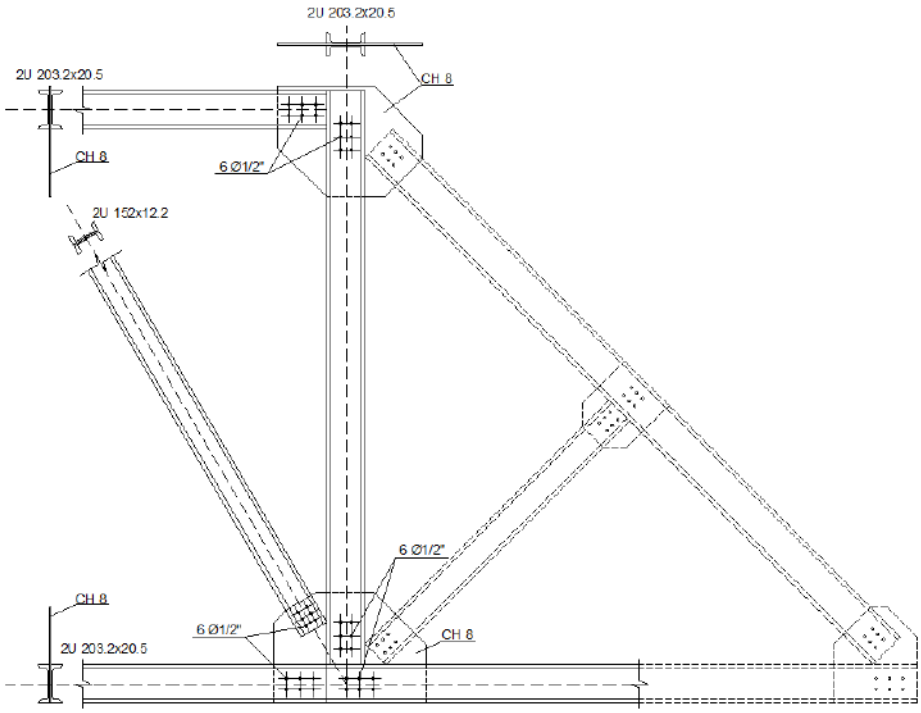

Figura 106 – Detalhe típico da ligação entre as peças 2-3 (Modelo AR70-5)

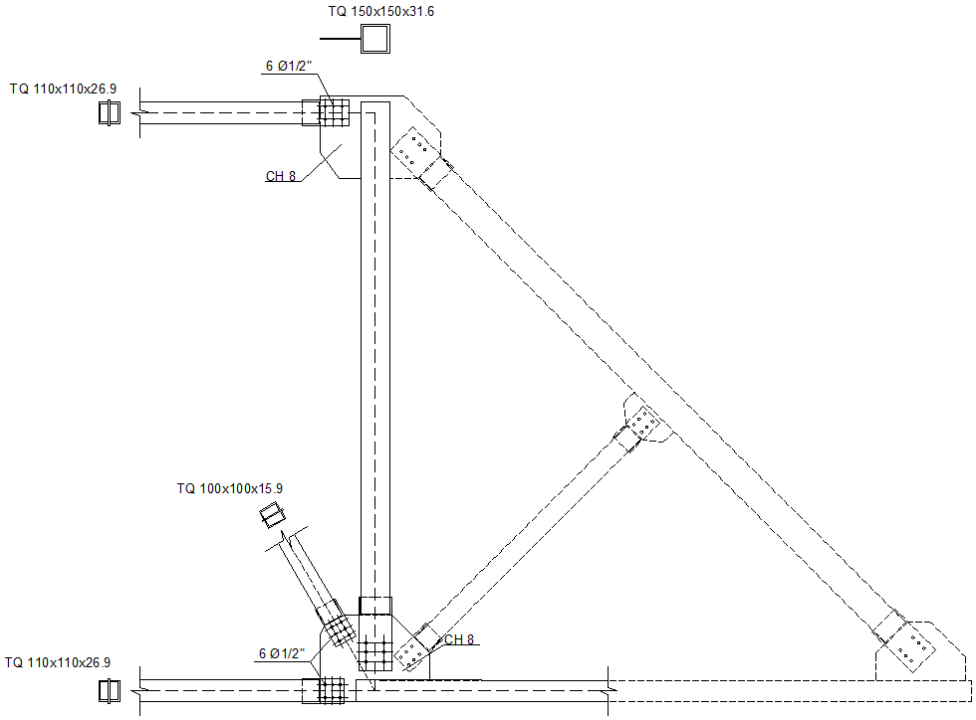

Figura 107 – Detalhe típico da ligação entre as peças 2-3 (Modelo TR70-5)

6.3. Transporte de estruturas metálicas

Segundo o MD/SDI (1989), a estrutura metálica pode ser transportada por meio rodoviário, ferroviário, marítimo, fluvial e aéreo, com a predominância para o primeiro citado. A vantagem da utilização do meio de transporte rodoviário é que a entrega pode ser porta a porta, ou seja, a entrega pode ser feita na própria obra. Outra vantagem é a redução no manuseio da carga, reduzindo a avaria causada por manuseio

Apesar das vantagens apresentadas no transporte rodoviário, é necessário que se observem alguns gabaritos para esse tipo de transporte. São então consideradas as seguintes dimensões, de acordo com Bellei (2010):

- Largura máxima: 2,60 m
- Altura máxima: 4,40 m (a partir do solo)
- Comprimento da carga: 12 metros + 10%
- Peso máximo: 270 kN

Na Figura 108 pode ser vista uma Tabela para dimensionamento e qualificação de escolta para transporte rodoviário.

Características do veículo		Características das rodovias							
		de pista simples				de pistas duplas			
dimensões em metro peso em ton.		nº de veículos de escolta			veloci-dade	nº de veículos de escolta			velo-cidade
		Creden-ciada	Polícia Rod. Federal	Total	km/h	Creden-ciada	Polícia Rod. Federal	Total	km/h
largura	Até 2,60 2,61 a 3,20	Normal Licença	especial		60	Normal Licença	especial		60
	3,21 a 3,80	1	_	1	40	1	_	1	50
	3,81 a 5,00	2	_	2	20	1	_	1	30
	> 5,00	1	1	2	*	1	1	2	*
comprimento	Até 18,15 18,16 a 25,00	Normal Licença	especial		60	Normal Licença	especial		60
	25,01 a 30,00	1	_	1	50	1	_	1	60
	30,01 a 35,00	2	_	2	50	1	_	1	50
	> 35,00	1	1	2	*	_	1	1	*
altura	Até 4,40 4,41 a 5,00	Normal Licença	especial		60	Normal Licença	especial		60
	5,01 a 5,50	1	_	1	40	1	_	1	40
	> 5,50	_	1	1	30	_	1	1	30
peso	Até 60 t	_	_	_	50	_	_	_	60
	61 a 80 t	1	_	1	40	1	_	1	50
	> 80 t	1	1	2	*	1	1	2	*

Figura 108 – Tabela para dimensionamento e qualificação da escolta para transporte rodoviário (Bellei, 2010)

6.3.1. Exemplos de transporte dos modelos AR70-5 e TR70-5

As peças apresentadas no item 6.2 foram dimensionadas levando em consideração o gabarito dos caminhões. A peça 1 (coluna) tem um comprimento total de 6 metros, contudo a largura máxima da mesma é 3,00 metros, o que não é suficiente para a largura máxima do gabarito. Com isso, a peça deve, obrigatoriamente, ser transportada “em pé”, devendo-se observar os aspectos em relação a amarração e travamente, utilizando-se proteções nas quinas para evitar o rompimento dos cabos de amarração ou danos nas estruturas e utilizando calços de madeira como suporte para uma distribuição uniforme do peso sobre a superfície do veículo (Bellei, 2010).

A peça 2 (treliça da cobertura) tem uma largura total de 3 metros, o que também não é suficiente para transporta-la deitada, de acordo com o gabarito para transportes. Com isso, deve ser transportada “em pé”, nas mesmas condições da peça 1.

A peça 3 (nó de pórtico) possui largura e altura de 3 metros. Com isso, a mesma também não pode ser transportada deitada, devendo também ser transportada em pé. Cabe ressaltar que as três peças citadas possuem uma largura máxima de 50 cm (levando em consideração a largura dos perfis). Com isso, as mesmas poderiam ser transportadas no mesmo caminhão, uma vez que a largura máxima do gabarito é 2,60 m.

Esses são alguns exemplos de características do transporte das estruturas projetadas, os quais incidirão nos custos do empreendimento.

6.4. Montagem de estruturas metálicas – recomendações gerais

Segundo Bellei (2010) entende-se como montagem o ato de unir peças metálicas que irão compor a estrutura final conforme o que foi especificado em projeto. É na fase da montagem que a estrutura ou uma parte da mesma podem sofrer algum tipo de dano por conta de execução com planejamento mal realizado ou por um projeto que não esteja com uma boa concepção ou com detalhamentos inadequados.

De acordo com ESDEP (2016), é importante que a montagem da obra seja considerada desde as primeiras etapas do projeto estrutural. A concepção da estrutura deve estar diretamente relacionada à forma como a mesma será executada. Algumas considerações devem ser observadas no projeto, como por exemplo:

- Devem ser evitadas ligações soldadas no local da montagem. Dar preferência a ligações parafusadas.
- O tamanho e o peso do conjunto devem ser limitados à capacidade do transporte disponível até o local da obra.
- A sequência de montagem deve ser considerada como parte integrante do projeto.

A logística de montagem é uma parte importante de todo o processo e deve ser sempre observada. Segundo o ESDEP (2016), os fabricantes em geral fornecem os elementos de construção na sequência da fabricação. É uma estratégia interessante, desde que a sequência de fabricação seja igual à sequência de montagem. Para isso, acontecer, deve-se considerar um bom planejamento de todos os processos de fabricação e montagem.

Finalmente, deve-se preparar um cronograma de entregas. Caso as entregas não sejam coordenadas de acordo com a sequência de montagem, deve ser observado um local para a estocagem do material. Caso seja possível, os elementos mais pesados devem ser entregues apenas no momento em que os mesmos serão montados, para evitar manuseios excessivo das peças pesadas.

6.4.1. Exemplo de montagem dos modelos AR70-5 e TR70-5

Após a execução das fundações, as quais não foram levadas em consideração no presente estudo, deve-se iniciar o processo de montagem da estrutura. O principal objetivo durante a montagem é que seja garantida a estabilidade da estrutura em todas as etapas da construção. De acordo com ESDEP (2016), o colapso das estruturas metálicas durante a fase de montagem por muitas vezes se dá pela falta de observação aos requisitos de estabilidade.

O processo de montagem é iniciado pelas colunas, observando o descrito em Bellei (2010). Antes de posicioná-la no local, será necessário fazer a união entre as "Peças 1", descritas no item 6.1, conforme a Figura 109. Ressalta-se que a união da "Peça 1" para os modelos abertos é feita através de chapas de ligação entre os perfis e para os modelos tubulares é realizada através de ligações flangeadas. Em seguida, deve-se realizar a ligação entre as peças 1 e a peça 3, conforme visto em 6.2.4.

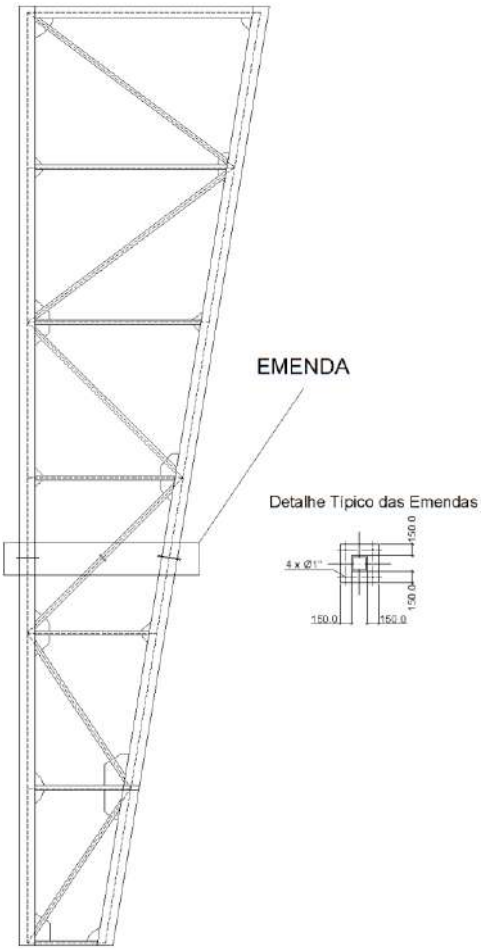

Figura 109 – União entre as "Peças 1"

A seguir, deve ser realizado o içamento da coluna e a consequente montagem sobre as fundações. De acordo com Bellei (2010), para a montagem de colunas com grande altura, caso deste exemplo, deve-se utilizar estais provisórios até que seja instalada a estrutura de forma definitiva, conforme indicado na Figura 110. As primeiras colunas que serão montadas serão as do núcleo do contraventamento da estrutura, conforme recomendado em Pinho (2005).

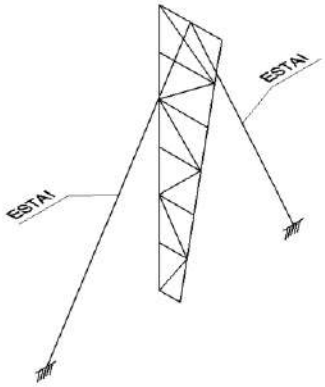

Figura 110 – Estais provisórios na coluna do hangar

Após a montagem de uma dupla de colunas, deve ser executado o contraventamento do núcleo descrito anteriormente, que no caso destes modelos é em forma de “X”. Em seguida, devem ser montadas as vigas de beiral. O detalhamento de ambos não está contemplado neste trabalho.

Após esse processo, a treliça de cobertura deverá ser preparada para ser içada. Como a “Peça 2” tem um comprimento de 8,75 metros, a montagem total da cobertura deve ser realizada no solo, uma vez que de acordo com ESDEP (2016), deve ser evitado o trabalho de montagem em alturas elevadas. A montagem entre as peças pode ser vista na Figura 111.

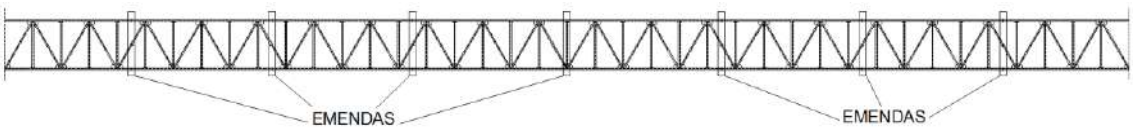

Figura 111 – União entre as “Peças 2”

Em seguida, deve ser realizado o içamento da treliça de cobertura e consequente montagem com as colunas. Após o içamento, é importante que haja o estaiamento do

pórtico montado, conforme apresentado na Figura 112, para evitar que o ocorra instabilidade lateral desta viga treliçada.

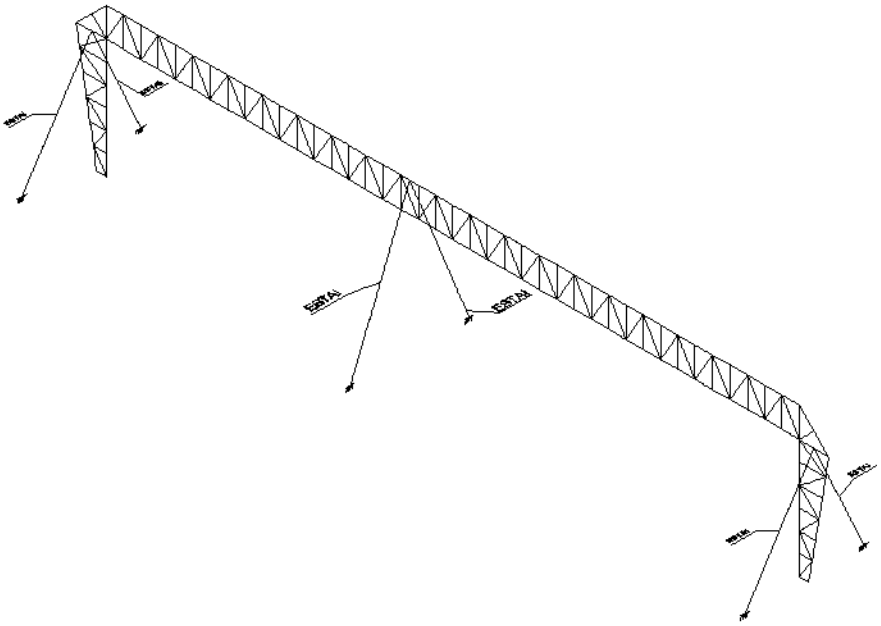

Figura 112 – Estaiamento do pórtico montado

Em seguida, é montada a viga de cobertura do pórtico seguinte, conforme a Figura 113.

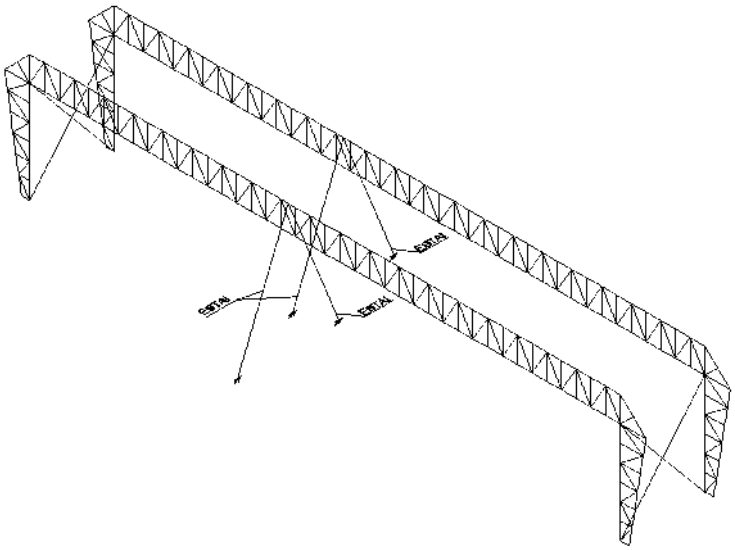

Figura 113 – Montagem da viga de cobertura do pórtico seguinte

Após a montagem de dois pórticos consecutivos, realiza-se então a montagem das terças da cobertura, conforme a Figura 114. Os detalhes construtivos entre as terças da cobertura e a treliça de cobertura não estão contemplados neste trabalho.

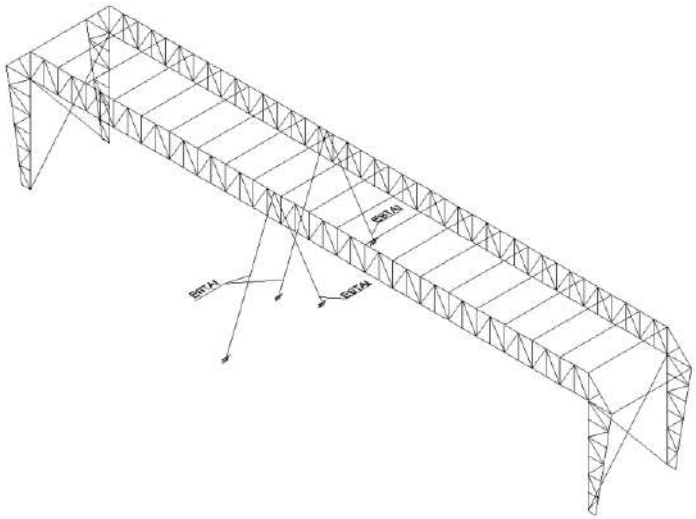

Figura 114 – Montagem das terças de cobertura

Após a montagem das terças, começam as montagens do contraventamento no plano da cobertura. Em seguinda, removem-se os estais. Esse processo pode ser visto na Figura 115.

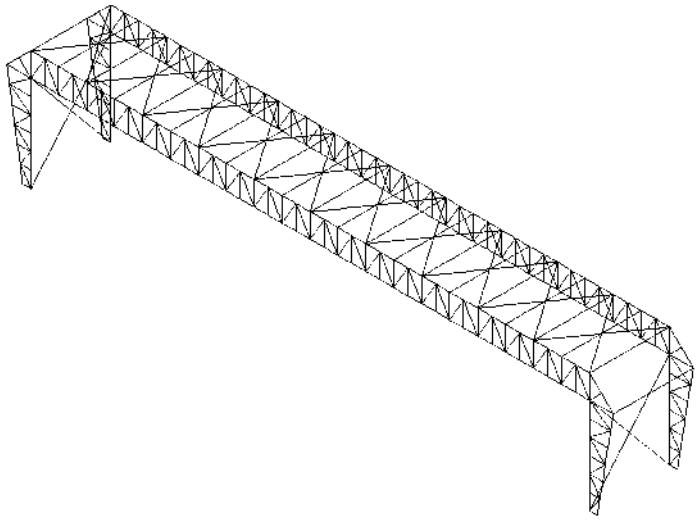

Figura 115 – Montagem do contraventamento no plano da cobertura e remoção dos estais

Com a montagem do núcleo contraventado, repete-se o processo descrito anteriormente, seguindo a sequência vista na Figura 116.

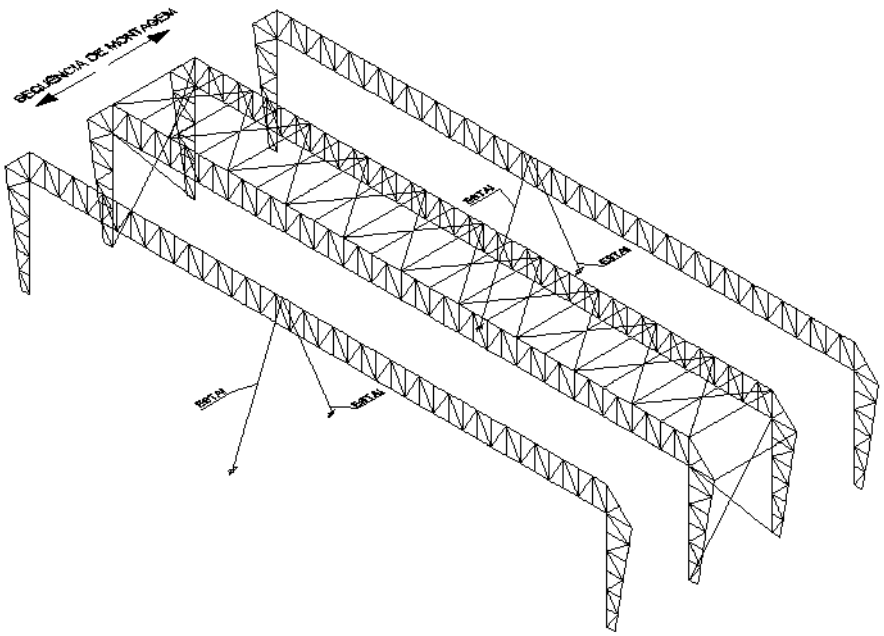

Figura 116 – Sequência de montagem dos pórticos do hangar

Conclui-se esse capítulo observando que fabricação, transporte e montagem são aspectos muito importantes na definição do custo final do empreendimento e na concepção inicial do projeto. Tais custos não estão contemplados neste trabalho.

7. Considerações finais

7.1. Conclusões

Em relação ao estudo das variáveis e consequente parametrização dos modelos, ressalta-se que o presente estudo são aplicáveis somente a grandes vãos (de 70 a 100 metros) e tais resultados podem não ser aplicáveis a vão menores que 70 metros.

Após as análises realizadas, conclui-se que para os modelos estruturais constituídos de perfis abertos e com distância entre pórticos de 5 metros, os modelos com a cobertura em arco mantêm o melhor desempenho em todos os vãos apresentados. Os modelos com maior consumo são os com a cobertura reta, não sendo então recomendada a utilização desse tipo de cobertura levando-se em consideração somente o consumo de aço.

Para os modelos constituídos de perfis abertos e com distância entre pórticos de 10 metros, verificou-se que as soluções de terças em perfis "I" soldados não são recomendadas, uma vez que o consumo de aço em relação aos perfis do tipo *Steel Joist* são bem superiores. Verificou-se também que o desempenho dos modelos de contraventamento indicam uma diferença significativa, levando o modelo em "X" vantagem frente aos demais. Contudo, para hangares, onde é necessária a utilização dos espaços laterais para a construção de oficinas, por exemplo, esse modelo tem uma perda significativa, uma vez que inviabiliza a abertura lateral. Os contraventamentos em "K" e em "Y", por sua vez, tem esse espaço de abertura garantido, contudo resultam em maior consumo de aço. Em relação ao consumo de aço do pórtico, viu-se que os modelos com a cobertura em arco levam vantagem frente aos demais, assim como na distância entre pórticos de 5 metros, os modelos com a cobertura reta tem o maior consumo de aço.

Verificando-se uma comparação entre os modelos abertos com distância entre pórticos de 5 e 10 metros, conclui-se que os modelos com distância entre pórticos maiores levam vantagem em relação ao consumo, uma vez que além do ganho em relação a taxa de consumo de aço, o número de fundações a serem executadas é reduzido, além, obviamente, do número de pórticos, consequentemente diminuindo a mão de obra em relação à montagem da estrutura.

Em relação aos pórticos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 5 metros, observa-se que o modelo de cobertura em arco possui o menor

consumo de aço para vãos menores (70 e 80 metros) e para os vãos maiores, o modelo de cobertura com banzos inclinados levam vantagem em relação ao consumo de aço. Assim como nos modelos abertos, os modelos com a treliça reta indicam desvantagem e apresentam o consumo de aço muito maior em relação aos dois modelos citados anteriormente.

Para os pórticos constituídos de perfis tubulares com distância entre pórticos de 10 metros, vê-se que a solução de terça em *Steel Joist* leva vantagem em relação às terças em perfis tubulares retangulares, assim como na comparação dos perfis abertos. Conclui-se então que a melhor solução de terças para espaçamento entre pórticos de 10 metros são as soluções em *Steel Joist*. Em relação ao contraventamento, os resultados são os mesmos dos apresentados nos modelos abertos, sendo o contraventamento em X com menor consumo de aço entre os demais. Em relação ao consumo de aço dos pórticos, assim como nos modelos abertos, o modelo com a cobertura em arco leva vantagem no consumo, contudo com uma pequena diferença no consumo em relação ao modelo com a cobertura em banzos inclinados.

Em uma comparação entre os resultados apresentados todos os modelos tubulares, levando em consideração as distâncias entre pórticos de 5 e 10 metros, para os vão de 70 e 80 metros, os modelos com distância entre pórticos de 5 metros levam vantagem em relação ao consumo de aço com os modelos com distância entre 10 metros com terças em perfis tubulares. Deve-se atentar, entretanto, ao fato dos modelos com distância entre pórticos de 5 metros resultarem em mais ligações e fundações a serem realizadas, o que pode, encarecer o projeto, uma vez que não somente o consumo de aço é levado em consideração na totalidade da obra. Dentre todos os modelos, conclui-se que o de menor consumo é o modelo de cobertura em arco, com a distância entre pórticos de 10 metros e solução de terças em *Steel Joist* e com o contraventamento em forma de "X".

Comparando os modelos abertos com os modelos tubulares, para distância entre pórticos de 5 metros, verificou-se que os modelos tubulares levam vantagem em relação ao consumo, em todos os vãos. Isso se dá pelo fato dos perfis tubulares possuirem inércia igual nas duas direções, fazendo com que se reduza o comprimento de flambagem do perfil, levando então a uma economia de aço.

Para a distância entre pórticos de 10 metros, verificou-se que existem modelos constituídos de perfis abertos que possuem maior consumo de aço frente ao modelo constituído de perfis tubulares com a cobertura reta e as terças em perfis tubulares,

concluindo a desvantagem da construção de coberturas retas para grandes vãos. Contudo, visto que todos os outros modelos constituídos de perfis tubulares levam vantagem em relação aos modelos de perfis abertos, conclui-se da mesma forma que os modelos com distância entre pórticos de 5 metros que a escolha da construção utilizando perfis tubulares seja uma opção viável em relação ao consumo de aço para o projeto de hangares de grandes vãos.

Na comparação entre todos os modelos estudados neste trabalho, sejam eles de perfis abertos ou tubulares e distância entre pórticos de 5 ou 10 metros, os modelos com contraventamento em "X" e terças com perfil *Steel Joist* levam clara vantagem em relação ao consumo de aço. Comparando somente os modelos com contraventamento em "X", vê-se que existem modelos com espaçamento entre pórticos de 5 metros que levam vantagem em relação ao de 10 metros, para terças constituídas em perfis tubulares. Para todos os vãos, existem ao todo seis modelos (nove ao total) em perfis tubulares que possuem consumo de aço menor que o modelo com menor consumo de aço entre os perfis abertos, concluindo assim a vantagem na utilização dos perfis tubulares em relação aos perfis abertos, levando em consideração o consumo de aço.

Salienta-se, após a explanação acima, que a taxa de consumo de aço de todos os modelos, sejam abertos ou tubulares, poderia ser melhorada caso se adotar variação dos perfis numa mesma seção de cobertura, seja nos banzos ou nas diagonais. Contudo, esse procedimento não é usual, uma vez que não é viável uma grande variação de seções transversais em uma mesma treliça o que pode levar inclusive a agravar os custos do empreendimento.

Em relação à fabricação, transporte e montagem, vê-se a importância da concepção da estrutura, os quais devem ser pensados para se obter a racionalização dos itens descritos acima, principalmente em relação ao transporte, uma vez que as peças não são fabricadas no local da obra. Em relação à montagem, devem ser observadas as recomendações descritas nos manuais para que a mesma seja realizada da melhor forma possível, de modo a evitar problemas estruturais que possam a levar um colapso na estrutura, levando a prejuízos financeiros e de segurança para a mão de obra de montagem.

Nota-se, nos desenhos de ligações entre as peças, que as ligações entre perfis abertos são de execução mais fácil que as de perfis tubulares, fazendo com que, além de todo o estudo de consumo de aço aqui apresentado, devam também ser observadas considerações relativas à montagem e fabricação. Conclui-se assim que as soluções

apresentadas podem ser favorecidas em aspectos como consumo de aço, contudo, podem ser desfavoráveis em outros aspectos, como montagem e fabricação, fazendo com que mais de um fator influencie no valor total da obra.

7.2. Sugestões para pesquisas futuras

São apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo o estudo comparativo de hangares de grandes vãos:

- Avaliação de soluções estruturais para grandes vãos levando em consideração outras tipologias diferentes das analisadas, utilizando automatização da forma;
- Avaliação de soluções estruturais para grandes vãos levando em consideração a minimização das superfícies externas;
- Avaliação de soluções estruturais para grandes vãos levando em consideração a automatização da escolha do perfil e consequente dimensionamento ótimo das peças;
- Estudar as mesmas tipologias apresentadas neste trabalho levando em consideração vinculações distintas entre os perfis, usando ligações semi-rigidas;
- Analisar as mesmas tipologias apresentadas neste trabalho levando em consideração a análise plástica.

Referências Bibliográficas

ARAUJO, A F. M., SARMANHO, A. M., BATISTA, E. M., REQUENA, J. A. V., FAKURY, R. H., PIMENTA, R. J. *Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares em Aço*. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Forças Devidas ao Vento em Edificações – NBR 6123*. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT**.** *Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – NBR 8800.* Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT**.** *Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações em Estruturas Tubulares – NBR 16239*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BELLEI, I. H. *Edifícios Industriais em Aço: Projeto e cálculo.* São Paulo: PINI, 2010.

CBCA. *Galpões para Uso Gerais.* Rio de Janeiro: CBCA, 2003.

CBCA. *Curso de Dimensionamento de Estruturas de Aço.* Módulo 3. Rio de Janeiro: CBCA, 2013.

CHAVES, M. R. *Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturais para Galpões Industriais Leves* – Dissertação de Mestrado, 2007. UFOP;

COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. *SAP 2000 advanced – Structural Analysis Program – Version 14.* Berkley: COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. 2010.

CONSTRUÇÃO METÁLICA. *Revista Construção Metálica.* São Paulo: ABCEM, ed. 94, 2009.

DAGNESE. *Digex Aero Maitenance.* Disponível em: <http://www.dagnese.com.br/site/content/cliente_ver.php?cliente_id=117> - Acesso em 21 de outubro de 2016.

D´LAMBERT, F. C., PINHEIRO, M. B. *Treliças Tipo Steel Joist.* Rio de Janeiro: CBCA, 2007.

D´LAMBERT, F. C. *Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados.* Rio de Janeiro: Gerdau Açominas, 2005.

ENGEL, H. *Sistemas Estruturais.* Barcelona: Gustavo Gilli, 2001.

ESDEP. *ESDEP Course.* <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~/pmoze/ESDEP/master/toc.htm> - Acesso em 12 de dezembro de 2016.

HANGAR 33. *Conheça 7 Locais que Retratam a História dos Dirigíveis, Jan. 2015.* Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/conheca-7-locais-que-retratam-a-historia-dos-dirigiveis/> - Acesso em 20 de outubro de 2016.

GONÇALVES, B. R., MACHADO, G. C. P., BENATTI, F., BARBOSA, M. H. *Ciclone 4.0 – Ação do Vento nas Edificações.* Univerisade de São Paulo, 2013.

MARKO. *Sistema Roll-on*. Disponível em: <http://www.marko.com.br/sistema-roll-on/> - Acesso em 08 de março de 2017.

MENDANHA, F. O. *Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT.* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

METFORM. *Telhas de Aço.* Metform, Betim, 2015.

MD/SDI, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO. *Manual Brasileiro Para Cálculo de Estruturas Metálica. V.1.* Brasília: 1989.

NOGUEIRA, G. S. *Avaliação de Soluções Estruturais para Galpões Compostos de Perfis de Aço Formados a Frio* – Dissertação de Mestrado, 2009. UFOP

PEDREIRA, F. L. A. B. *Análise comparativa de soluções de coberturas metálicas de grandes vãos em perfis tubulares.* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

PFEIL, W. PFEIL, M. *Estruturas de Aço: dimensionamento prático.* 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

PINHEIRO, A. C. F. B. *Estruturas Metálicas: Cálculos, Detalhes, Exercícios e Projetos*. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2005.

PINHO, M. O. *Transporte e Montagem.* Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2005.

PRAVIA, Z. M. C., DREHMER, G. A., JÚNIOR, E. M. *Galpões para Usos Gerais*. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

PRAVIA, Z. M. C. *Visualmetal Versão 1.5m.* Passo Fundo: UFPF, 2006.

REIDSTEEL. *Reidsteel Airport Buildings.* Disponível em: <http://www.reidsteel.aero/aircraft-hangar-types> - Acesso em 25 de abril de 2017.

SÁLES, J. J; NETO, J. M; MALITE, M; DIAS, A. A; GONÇALVES, R. M. *Sistemas Estruturais: Teoria e Exemplos.* São Carlos: SET/EESC/USP, 2013.

SANTOS, A. L. E. F.. *Ligações de barras tubulares para estruturas metálicas planas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.

VIEIRA, R. C. *Estudo Comparativo Entre Terças de Aço, Convencionais em Vigas, em Treliças Planas e em Treliças Multiplanares* – Dissertação (Mestrado), 2009. UNICAMP.

Anexo A – Roteiro de cálculo dos perfis solicitados à esforços axiais

A.1. Roteiro de cálculo da resistência à tração da barra mais solicitada do modelo AR70-5

Perfil utilizado: 2U 152,4 x 12,2 kg/m

Propriedades Geométricas (U 152,4 x 12,2):

d = 15,2 cm

h_w = 13,46 cm

t_w = 0,508 cm

b_f = 4,88 cm

t_f = 0,87 cm

Ag = 15,5 cm²

I_x = 546 cm^4

W_x = 72 cm³

r_x = 5,94 cm

Z_x = 83,85 cm³

I_y = 29 cm^4

W_y = 8,2 cm³

r_y = 1,37 cm

E = 20500 kN/cm²

f_y = 34,5 kN/cm²

f_u = 45 kN/cm²

C_w = 1488,78 cm^6

Utilizado seis parafusos sem necessidade de "zigue-zague".

Cálculo da Resistência da Seção Bruta:

$$N_{t,RD} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{t,RD} = \frac{2.30,3.34,5}{1,1} = 1900,2kN\,(Ok)$$

Cálculo da Resistência da Seção Líquida:

$$N_{t,RD} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$A_e = C_t . A_n$$

$$A_n = A_g - n.(d + 3{,}5mm).t$$

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{L}$$

$$A_n = 30{,}3 - 2.(2{,}54 + 0{,}35).0{,}508 = 28{,}24cm^2$$

$$C_t = 1 - \frac{1{,}41}{9} = 0{,}843$$

$$A_{n,ef} = 0{,}843.28{,}24 = 23{,}8cm^2$$

$$R_d = \frac{2.23{,}8.45}{1{,}35} = 1586{,}6kN(Ok)$$

- Verificação da esbeltez mínima:

$$\left(l/r \right)_{\max} \leq 300$$

$$\left(424/2{,}34 \right) = 181 \leq 300(Ok)$$

A.2. Roteiro de cálculo da resistência à compressão da barra mais solicitada do modelo AR70-5

Perfil utilizado: 2U 152,4 x 12,2 kg/m

Propriedades Geométricas (U 152,4 x 12,2):

d = 15,2 cm

h_w = 13,46 cm

t_w = 0,508 cm

b_f = 4,88 cm

t_f = 0,87 cm

Ag = 15,5 cm²

I_x = 546 cm^4

W_x = 72 cm³

r_x = 5,94 cm

Z_x = 83,85 cm³

I_y = 29 cm^4

W_y = 8,2 cm³

r_y = 1,37 cm

E = 20500 kN/cm²

f_y = 34,5 kN/cm²

f_u = 45 kN/cm²

C_w = 1488,78 cm^6

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi.Q.A_g.f_y}{\gamma_{a1}}$$

De acordo com o anexo F da NBR 8800/2008, as barras submetidas à compressão axial, nos quais todos os elementos componentes da seção possuem relações entre largura e espessura que não superem os valores limites, o fator Q pode ser tomado como 1,00. Então, para elementos AA:

$$b/t \leq 1{,}49\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

E para elementos AL:

$$b/t \leq 0{,}56\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$15{,}2/0{,}87 \leq 1{,}49\sqrt{\frac{20000}{34{,}5}} \rightarrow 17{,}47 \leq 35{,}87(Ok)$$

$$4{,}88/0{,}87 \leq 0{,}56\sqrt{\frac{20000}{34{,}5}} \rightarrow 5{,}6 \leq 13{,}48(Ok)$$

Atendendo esses valores, pode-se tomar Q como 1,00. Para o cálculo do fator de redução χ é necessário que se calcule o índice de esbeltez reduzido, λ_0, que é dado por:

$$\lambda_0 = 0{,}0133\left(\mathrm{k.l}/\mathrm{i}\right)$$

$$\lambda_0 = 0{,}0133\left(1{,}00.175/2{,}34\right) = 0{,}99$$

$$\chi = 0{,}658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi = 0{,}658^{0{,}99^2} = 0{,}66$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0{,}66.1{,}00.2.28{,}24..34{,}5}{1{,}1} = 1169{,}14kN(Ok)$$

- Verificação da Esbeltez:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 200$$

$$\lambda = k.L/i = 1{,}00.175/2{,}34 = 74{,}8$$

A.3. Roteiro de cálculo da resistência à tração do contraventamento vertical do Modelo AR70-5.

Perfil utilizado: 2L 127 x 18,3 kg/m

Propriedades Geométricas (L 127 x 18,3 kg/m):

b_f = 12,7 cm

t_f = 0,95 cm

A_g = 23,3 cm²

I_x = 362 cm^4

I_y = 362 cm^4

x = 3,53 cm

E = 20500 kN/cm²

f_y = 34,5 kN/cm²

f_u = 45 kN/cm²

Dados do conjunto:

I_x = 724 cm^4

I_y = 1304,68 cm^4

A_g = 46,6 cm²

r_x = 3,94 cm

r_y = 5,29 cm

Para o cálculo da resistência à tração, será realizado um pré-dimensionamento dos parafusos para definição do número de furos na seção, para o cálculo da área líquida. Considerando-se um parafuso ASTM A325 de 25,4 mm de diâmetro, tem-se de acordo com a NBR 8800/2008:

$$F_{t,RD} = \frac{0{,}5.A_b.f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{t,RD} = \frac{0{,}5.0{,}25.\pi.(2{,}54)^2.82{,}5}{1{,}35}$$

$F_{t,RD}$ = 154,83 kN por parafuso

Leva-se em consideração então: 662,7/154,83 tem-se então 4,28 parafusos. Utilizar-se-á então 6 parafusos, sem necessidade de zigue-zague.

Cálculo da Resistência da Seção Bruta:

$$N_{t,RD} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{t,RD} = \frac{46,6.34,5}{1,1} = 1440,4kN\,(Ok)$$

$$S_d \leq R_d$$

662,7 kN ≤ 1440,4 kN (Ok!)

Cálculo da Resistência da Seção Líquida:

$$N_{t,RD} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$A_e = C_t . A_n$$

$$A_n = A_g - n.(d + 3,5mm).t$$

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{L}$$

$$A_n = 30,3 - 2.(2,54 + 0,35).0,508 = 28,24cm^2$$

$$C_t = 1 - \frac{3,53}{9} = 0,607$$

$$A_{n,ef} = 0,607.46,6 = 28,28cm^2$$

$$R_d = \frac{28,28.45}{1,35} = 942,7kN$$

$$S_d \leq R_d$$

662,7 kN ≤ 942,7 kN (Ok!)

- Verificação da esbeltez mínima:

$$\left(l/r \right)_{\max} \leq 300$$

$$\left(1300/5,29 \right) = 245,7 \leq 300(Ok)$$

A.4. Roteiro de cálculo da resistência à tração da barra mais solicitada do modelo TR70-5

Perfil utilizado: TQ 110x26,9 kg/m

Propriedades Geométricas (TQ 110x26,9 kg/m):

d = 11,0 cm

t = 0,88 cm

A = 34,3 cm²

$I_x = I_y = 536\ cm^4$

$r_x = r_y = 3,95$ cm

$W_x = W_y = 97,4\ cm^3$

$Z_x = Z_y = 121\ cm^3$

$J = 944\ cm^6$

$W_t = 152\ cm^3$

E = 20500 kN/cm²

$f_y = 35$ kN/cm²

$f_u = 48,5$ kN/cm²

Cálculo da Resistência da Seção Bruta:

$$N_{t,RD} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{t,RD} = \frac{34,3.35}{1,1} = 1091,4kN(Ok)$$

Cálculo da Resistência da Seção Líquida:

$$N_{t,RD} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$A_e = C_t . A_g$$

$$C_t = \left[1 + \left(\frac{e_c}{l_c}\right)^{3,2}\right]^{-10}$$

Cálculo do e_c em estruturas tubulares, de acordo com a NBR 16239/2013:

$$e_c = \frac{h^2 + 2hb}{4(h+b)} - \frac{t_c}{2} = \frac{11^2 + 2.11.11}{4(11+11)} - \frac{0,8}{2} = 3,72$$

$$C_t = \left[1 + \left(\frac{3,72}{10}\right)^{3,2}\right]^{-10} = 0,66$$

$$A_e = 0,66.34,3 = 22,6cm^2$$

$$R_d = \frac{22,6.48,5}{1,35} = 813,3kN\,(Ok)$$

- Verificação da esbeltez mínima:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 300$$

$$\left(424/3,95\right) = 107,3 \leq 300(Ok)$$

A.5. Roteiro de cálculo da resistência à compressão da barra mais solicitada do modelo TR70-5

Perfil utilizado: TQ 110x26,9 kg/m

Propriedades Geométricas (TQ 110x26,9 kg/m):

d = 11,0 cm

t = 0,88 cm

A = 34,3 cm²

$I_x = I_y = 536$ cm^4

$r_x = r_y = 3,95$ cm

$W_x = W_y = 97,4$ cm³

$Z_x = Z_y = 121$ cm³

J = 944 cm^6

$W_t = 152$ cm³

E = 20500 kN/cm²

$f_y = 35$ kN/cm²

$f_u = 48,5$ kN/cm²

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi.Q.A_g.f_y}{\gamma_{a1}}$$

De acordo com o anexo F da NBR 8800/2008, as barras submetidas à compressão axial, nos quais todos os elementos componentes da seção possuem

relações entre largura e espessura que não superem os valores limites, o fator Q pode ser tomado como 1,00. Então, para elementos AA:

$$b/t \leq 1{,}40\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$11/0{,}88 \leq 1{,}49\sqrt{\frac{20000}{35}} \rightarrow 12{,}5 \leq 33{,}4(Ok)$$

Atendendo esses valores, pode-se tomar Q como 1,00. Para o cálculo do fator de redução χ (NBR 16239/2013) é necessário que se calcule o índice de esbeltez reduzido, λ_0, que é dado por:

$$\lambda_0 = 0{,}0133(\left(k.l/i\right)$$

$$\lambda_0 = 0{,}0133(\left(1{,}00.175/3{,}95\right) = 0{,}58$$

$$\chi = \frac{1}{(1+\lambda_0{}^{4,48})^{1/2,24}}$$

$$\chi = \frac{1}{(1+0{,}58^{4,48})^{1/2,24}} = 0{,}96$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0{,}96.1{,}00.34{,}3.35}{1{,}1} = 1047{,}7kN(Ok)$$

- Verificação da Esbeltez:

$$\left(l/r\right)_{\max} \leq 200$$

$$\lambda = k.L/i = 1{,}00.175/3{,}95 = 44{,}3$$

Anexo B – Roteiro de cálculo dos perfis solicitados à flexão

B.1. Roteiro de cálculo da resistência da terça da cobertura do modelo AR70-5

Perfil utilizado: U 152,6 x 15,6 kg/m

Propriedades Geométricas:

d = 15,2 cm

h_w = 13,46 cm

t_w = 0,798 cm

b_f = 5,17 cm

t_f = 0,798 cm

Ag = 14,5 cm²

I_x = 632 cm^4

W_x = 83 cm³

r_x = 5,64 cm

Z_x = 100,6 cm³

I_y = 36 cm^4

W_y = 9,2 cm³

r_y = 1,35 cm

E = 20500 kN/cm²

f_y = 34,5 kN/cm²

f_u = 45 kN/cm²

C_w = 1866,75 cm^6

- Verificação da Flambagem Local da Alma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{13,46}{0,798} = 16,87$$

$$\lambda_p = 3,76\sqrt{E/f_y} = 3,76\sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,65$$

$$\lambda_r = 5,70\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 5,70\sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 138,9$$

Alma Compacta

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z.f_y}{1,1} = \frac{100,6.34,5}{1,1} = 3155,18kN$$

- Verificação da Flambagem Local da Mesa:

$$\lambda = \frac{b}{2t} = \frac{5,17}{2.0,798} = 3,24$$

$$\lambda_p = 0,38\sqrt{E/f_y} = 0,38\sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,19$$

$$\lambda_r = 0,83\sqrt{E/(f_y - \sigma_r)} = 0,83\sqrt{\frac{20500}{35-10,5}} = 24$$

Mesa Compacta:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z.f_y}{1,1} = \frac{100,6.34,5}{1,1} = 3155,18kN$$

- Verificação da Flambagem Lateral com Torção:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{500}{1,35} = 370,37$$

$$\lambda_p = 1,76\sqrt{E/f_y} = 1,76\sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,59$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J\beta_1}\sqrt{1+\sqrt{1+\frac{27C_w\beta_1^2}{I_y}}} = \frac{1,38\sqrt{36.5,45}}{1,35.5,45.0,018}\sqrt{1+\sqrt{1+\frac{27.1866,75.0,018}{36}}} = 214,56$$

Para o estado limite FLT, quando $\lambda > \lambda_r$, então:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2}\sqrt{\frac{C_w}{I_y}(1+0,039\frac{JL_b^2}{C_w})}$$

$$M_{cr} = \frac{1,00.\pi^2 20500.36,5}{500^2}\sqrt{\frac{1866,75}{36,5}(1+0,039\frac{5,45.500^2}{1866,75})} = 1138,77kNcm$$

$$M_{pl} = Z.f_y = 100,6.35,5 = 3470,7kNcm$$

$$M_{Rd} = \frac{1138,77}{1,1} \leq \frac{3470,7kNcm}{1,1} = 1035,25kNcm$$

Logo, o momento resistente do perfil é 1035,25 kN.cm

- Verificação da Força Cortante Resistente de Cálculo:

Para o cálculo da força cortante resistente, são necessárias as seguintes verificações, de acordo com a NBR 8800/2008.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{13,46}{0,798} = 16,87$$

$$\lambda_p = 1,10\sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10\sqrt{\frac{5.20500}{34,5}} = 59,95$$

$$\lambda_r = 1,37\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,37\sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 74,67$$

Como $\lambda \leq \lambda_p$, então:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y = 0,6.15,2.0,798.34,5 = 251,08kN$$

$$V_{Rd} = \frac{251,08}{1,1} = 228,25kN$$

B.2. Roteiro de cálculo para estimativa do carregamento e verificação das terças Modelo AR70-5

- Carregamentos Considerados:

Área de influência utilizada (distância entre terças): 3,5 m

Cargas Permanentes: 0,6335 kN/m

Cargas Acidentais: 0,875 kN/m

Carga de Vento de Sucção: -2,555 kN/m

Peso próprio do Perfil: 0,156 kN/m

- Combinações Utilizadas:

COMB1 = 1,25 x (CP + PP) + 1,5 x CA

COMB2 = 1,00 x (CP + PP) + 1,4 x V1

- Determinação dos carregamentos:

Sd1 = 1,25 x (0,6335 + 0,156) + 1,5 x 0,875 = 2,3 kN/m

Sd2 = 1,00 x (0,6335 + 0,156) – 1,4 x 2,555 = -2,78 kN/m

- Determinação dos Esforços:

Momento máximo calculado: 870 kN.cm

Esforço Cortante Máximo: 8,7 kN

- Verificação de resistência:

De acordo com a NBR 8800/2008, no dimensionamento das barras submetidas a momento fletor e força cortante, devem ser atendidas as seguintes considerações:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Com isso, tem-se que:

870 kN.cm ≤ 1035,25 kN.cm (Ok)

8,7 kN ≤ 228,25 kN (Ok)

Logo, o perfil escolhido para compor a terça da cobertura atende às solicitações.

B.3. Roteiro de cálculo da resistência da terça da cobertura do modelo TR70-5

Perfil utilizado: TR 120x80x12,9 kg/m

Propriedades Geométricas (TR 120x80x12,9 kg/m):

d = 12 cm

t = 0,45 cm

A = 16,5 cm²

I_x = 325 cm^4

I_y = 1,73 cm^4

r_x = 4,44 cm

r_y = 3,24 cm

W_x = 54,1 cm³

W_y = 43,2 cm³

Z_x = 72,4 cm³

Z_y = 54,7 cm³

J = 402 cm^6

W_t = 77,8 cm^3

E = 20500 kN/cm²

f_y = 35 kN/cm²

f_u = 48,5 kN/cm²

Verificação da Flambagem Local da Alma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{12}{0,45} = 26,6$$

$$\lambda_p = 2,42\sqrt{E/f_y} = 2,72\sqrt{\frac{20500}{35}} = 65,8$$

$$\lambda_r = 5,70\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 5,70\sqrt{\frac{20500}{35}} = 138,9$$

Alma Compacta

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z.f_y}{1,1} = \frac{72,4.35}{1,1} = 2303,6kN.cm$$

- Verificação da Flambagem Local da Mesa:

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{12}{0,45} = 26,6$$

$$\lambda_p = 1,12\sqrt{E/f_y} = 1,12\sqrt{\frac{20500}{35}} = 27,1$$

$$\lambda_r = 1,40\sqrt{E/f_y} = 1,4\sqrt{\frac{20500}{35}} = 33,9$$

Mesa Compacta:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z.f_y}{1,1} = \frac{72,4.35}{1,1} = 2303,6kN.cm$$

- Verificação da Flambagem Lateral com Torção:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{500}{3,24} = 154,3$$

$$\lambda_p = \frac{0,13E}{M_{pl}}\sqrt{J.A} = \frac{0,13.20500}{14210}\sqrt{3514.71,2} = 93,8$$

$$\lambda_r = \frac{2,00E}{M_r}\sqrt{J.A}$$

$$M_r = (f_y - \sigma_t)W = (35 - 0{,}3.35).54{,}1 = 1325{,}45 kN.cm$$

$$\lambda_r = \frac{2{,}00.20500}{1325{,}45}\sqrt{402.16{,}5} = 2519{,}3$$

Para o estado limite FLT, quando $\lambda_p > \lambda > \lambda_r$, então:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}}\left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r)\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right] = \frac{1{,}00}{1{,}1}\left[2534 - (2534 - 1325{,}4)\frac{154{,}3 - 93{,}8}{2519{,}3 - 93{,}8}\right] = 2276{,}2 kN.cm$$

$$M_{Rd} = 2276{,}2 \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{72{,}4.35}{1{,}1} = 2303{,}6 kN.cm (OK!)$$

Logo, o momento resistente do perfil é 2276,2 kN.cm

- Verificação da Força Cortante Resistente de Cálculo:

Para o cálculo da força cortante resistente, são necessárias as seguintes verificações, de acordo com a NBR 8800/2008.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{12}{0{,}45} = 26{,}6$$

$$\lambda_p = 1{,}10\sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1{,}10\sqrt{\frac{5.20500}{35}} = 59{,}95$$

$$\lambda_r = 1{,}37\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1{,}37\sqrt{\frac{20500}{35}} = 33{,}16$$

Como $\lambda \leq \lambda_p$, então:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{pl} = 0{,}60 A_w f_y = 0{,}6.2.20.1{,}25.35 = 1050 kN$$

$$V_{Rd} = \frac{1050}{1{,}1} = 954{,}5 kN$$

B.4. Roteiro de cálculo para estimativa do carregamento e verificação das terças Modelo TR70-5

- Carregamentos Considerados:

Área de influência utilizada (distância entre terças): 3,5 m

Cargas Permanentes: 0,6335 kN/m

Cargas Acidentais: 0,875 kN/m

Carga de Vento de Sucção: -2,555 kN/m

Peso próprio do Perfil: 0,129 kN/m

- Combinações Utilizadas:

COMB1 = 1,25 x (CP + PP) + 1,5 x CA

COMB2 = 1,00 x (CP + PP) + 1,4 x V1

- Determinação dos carregamentos:

Sd1 = 1,25 x (0,6335 + 0,129) + 1,5 x 0,875 = 2,26 kN/m

Sd2 = 1,00 x (0,6335 + 0,129) – 1,4 x 2,555 = -2,81 kN/m

- Determinação dos Esforços:

Momento máximo calculado: 880 kN.cm

Esforço Cortante Máximo: 8,8 kN

- Verificação de resistência:

De acordo com a NBR 8800/2008, no dimensionamento das barras submetidas a momento fletor e força cortante, devem ser atendidas as seguintes considerações:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Com isso, tem-se que:

880 kN.cm ≤ 2276,2 kN.cm (Ok)

8,8 kN ≤ 954,5 kN (Ok)

Logo, o perfil escolhido para compor a terça da cobertura atende às solicitações.

Anexo C – Roteiro de cálculo das ligações

C.1. Roteiro de cálculo da ligação mais solicitada da treliça de cobertura do modelo TR70-5

Diagonal tracionada: 189 kN

Diagonal comprimida: -171 kN

- Cálculo da solda:

Eletrodo: E60 – f_w = 415 MPa

Dimensionamento do filete:

$$R_d = \frac{A_w.(0,6.f_w)}{\gamma_{a2}}$$

$$A_w = t.L$$

Para soldas de filete:

$$t = 0,7.b$$

A perna do filete "b" depende da espessura do perfil. Como a chapa possui 5,6 mm, será adotado um filete com espessura de 5 mm. Com isso, tem-se que:

$$t = 0,7.0,5 = 0,35mm$$

Para determinar o valor de L, iguala-se o valor da resistência ao maior esforço apresentado (189 kN de tração). Como o tubo encontra a chapa com quatro pontos de solda, multiplica-se a área de solda por quatro. Então, isola-se o valor de L:

$$189 = \frac{4.0,35.L.(0,6.41,5)}{1,35}$$

$$L = 7,31cm$$

Será adotado o valor de L = 9 cm. Com isso, serão adotado 4 pontos de solda de filete com a espessura do filete de 5 mm e comprimento de 90 mm.

- Cálculo da chapa longitudinal:

As diagonais e montantes se encontrarão em uma chapa longitudinal. O comprimento da chapa adotado é de 30 cm e a espessura 8 cm. Será utilizado o critério descrito na Tabela 22 da NBR 16239/2013.

$$N_{ch,Rd} = \frac{1{,}1k_m f_y t^2}{sen\theta(1-t_{ch}/b)}(2b_{ch}/b + 4\sqrt{1-t_{ch}/b})/\gamma_{a1}$$

$$N_{ch,Rd} = \frac{1{,}1.1.35.(0{,}54)^2}{sen60(1-0{,}8/10)}(2.30/10 + 4\sqrt{1-0{,}8/10})/1{,}1 = 981{,}8kN$$

Como o maior esforço na diagonal é 189 kN, a ligação atende aos requisitos da norma.

- Cálculo da solda da chapa longitudinal com o banzo:

O cálculo é análogo ao visto para a solda do perfil na chapa de ligação.

Eletrodo: E60 – f_w = 415 MPa

Dimensionamento do filete:

$$R_d = \frac{A_w.(0{,}6.f_w)}{\gamma_{a2}}$$

$$A_w = t.L$$

Para soldas de filete:

$$t = 0{,}7.b$$

A perna do filete "b" depende da espessura do perfil. Como a chapa possui 5,6 mm, será adotado um filete com espessura de 5 mm. Com isso, tem-se que:

$$t = 0{,}7.0{,}5 = 0{,}35mm$$

Para determinar o valor de L, iguala-se o valor da resistência ao maior esforço apresentado (189 kN de tração). Como a chapa encontra o tubo com dois pontos de solda, multiplica-se a área de solda por dois. Então, isola-se o valor de L:

$$189 = \frac{2.0{,}35.L.(0{,}6.41{,}5)}{1{,}35}$$

$$L = 14{,}6cm$$

Como a chapa será soldada em todo o contorno e a mesma possui um comprimento de 30 cm, então a solda atende com folga.

- Cálculo dos parafusos:

As diagonais serão ligadas as chapas longitudinais por intermédio de parafusos, conforme detalhes vistos no capítulo 6. Será determinado então o número de parafusos necessários:

Considerando-se um parafuso ASTM A325 de 12,7 mm de diâmetro, tem-se de acordo com a NBR 8800/2008:

$$F_{t,RD} = \frac{0,5.A_b.f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

A_b = área bruta da seção transversal do parafuso;

f_u = resistência à ruptura do material do parafuso à tração;

γ_{a2} = coeficiente de ponderação das resistências.

Para o caso em tela, tem-se que:

$$F_{t,RD} = \frac{0,5.1,22.82,5}{1,35}$$

$F_{t,RD}$ = 37,3 kN por parafuso

Com isso, para definir o número de parafusos, divide-se o esforço pela resistência:

n = 189 / 37,3 = 5,06

Será então utilizados 6 parafusos de 12,7 mm A325 de alta resistência.

C.2. Roteiro de cálculo da ligação flangeada da treliça de cobertura do modelo TR70-5

Como descrito no capítulo 6, é sugerido que a treliça de cobertura seja dividida em 8 partes iguais de 8,75 metros, para a mesma poder ser transportada por via terrestre.

- Resistência à tração do parafuso (25,4 mm – ASTM A325):

$$F_{t,RD} = \frac{0,75.A_b.f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{t,RD} = \frac{0,75.A_b.f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$F_{t,RD} = \frac{0,75.2,54.81,5}{1,35} = 115kN$$

O número de parafusos necessários n = 110/115 = 0,86. Serão utilizados então 4 parafusos.

- Força de tração de cálculo solicitante de um parafuso:

$F_{tsd} = N_d / n_p$ = 110 / 4 = 27,5 kN

Diâmetro do furo que será considerado:

$$d = d_b + 1{,}5 \text{ mm} = 25{,}4 + 1{,}5 = 26{,}9 \text{ mm}$$

A norma leva em consideração que caso a espessura de referência t_c seja menor ou igual a espessura do flange, pode-se desprezar o efeito alavanca. Com isso, calcula-se a espessura de referência t_c:

$$t_c = \sqrt{\frac{4bF_{t,Sd}}{p(f_y / \gamma_{a1})}}$$

$$t_c = \sqrt{\frac{4.32{,}30.27{,}5}{140{,}8(0{,}35/1{,}1)}} = 8{,}91mm$$

Será adotado então um valor de 10 mm de espessura para o flange.

Será calculado os elementos geométricos necessários de acordo com o item 7.3 da NBR 16239/2013:

- Cálculo e verificação da excentricidade e_2:

$$e_{2x} = (L_x - h - 2e_{1x}) / 2 = (300 - 110 - 2.45{,}0) = 50 \text{ mm}$$

$$e_{2y} = (L_y - h - 2e_{1y}) / 2 = (250 - 110 - 2.45{,}0) = 25 \text{ mm}$$

Será então verificada a resistência do parafuso:

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$$

$$27{,}50 \text{ kN} \leq 115 \text{ kN (Ok!)}$$

Anexo D – Representação dos Resultados Obtidos nos Dimensionamentos

Modelo AI-70-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Coluna	48,21	3946,18
2L 101,6x9,81	Coluna	50,47	990,20
2U 254x22,77	Nó de pórtico	17,75	808,52
2U 152,4x12,2	Banzos, diagonais e montantes	351,14	8567,91
2U 152,4x15,6	Banzos	10,55	329,2
		Peso total do pórtico principal (kg)	14642,04
		Área de influência (m²)	750
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	2,00
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	3,28
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	41,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**47,1**

Modelo AI-70-10-TS-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,47
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,6
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**42,0**

Modelo AI-70-10-TS-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,59
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,6
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**43,1**

Modelo AI-70-10-TS-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	8,11
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,6
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**43,6**

Modelo AI-70-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,47
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,05
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**37,4**

Modelo AI-70-10-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,59
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,05
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**38,5**

Modelo AI-70-10-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,21	3946,18
2L101,6x9,81	Colunas	40,98	804,05
2L101,6x12,2	Colunas	9,49	231,590
2U152,4x15,4	Montantes	101,40	3123,12
2U203,2x17,1	Banzos e Diagonais	253,56	8661,53
2U254x29,76	Banzos	17,75	1056,72
2U203,2x20,5	Banzos	7,03	288,43
		Peso total do pórtico principal (kg)	18111,54
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	8,11
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,05
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**39,1**

Modelo TBI-70-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,21	1812,79
TQ80x14,2	Colunas	50,47	716,66
TQ120x29,8	Nó de pórtico e banzos	35,34	1053,16
TQ120x17,3	Banzos	105,52	1825,53
TQ120x24,3	Banzos	17,59	427,36
TQ100x13	Diagonais e montantes	224,68	2920,8
		Peso total do pórtico principal (kg)	8756,30
		Área de influência (m²)	350
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,37
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,43
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**31,8**

Modelo TBI-70-10-TT-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,23
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,13
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**34,0**

Modelo TBI-70-10-TT-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,85
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,13
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**34,6**

Modelo TBI-70-10-TT-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	8,33
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,13
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**35,1**

Modelo TBI-70-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,23
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,27
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,1**

Modelo TBI-70-10-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,85
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,27
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,7**

Modelo TBI-70-10-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,22	1812,79
TQ80x19	Colunas	50,47	958,91
TQ140x42,7	Nó de pórtico	17,75	758,10
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	224,68	3549,90
TQ140x31,6	Banzos	35,17	1111,50
TQ140x20,2	Banzos	17,59	355,26
TQ140x28,3	Banzos	17,59	497,7
TQ140x22,5	Banzos	33,42	751,8
TQ140x25,6	Banzos	17,59	450,2
TQ140x39	Banzos	17,59	685,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	10932,12
		Área de influência (m²)	700
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,23
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,27
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	15,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,1**

Modelo AI-80-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x9,81	Colunas	56,54	1109,31
2U203,2x17,1	Nó de pórtico	12,36	422,71
2U152,4x15,6	Banzos, diagonais e montantes	385,96	12041,95
2U152,4x15,6 REF1	Banzos e diagonais	28,64	1039,35
		Peso total do pórtico principal (kg)	18564,09
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	2,11
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,49
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	45,2
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**51,8**

REF1 – Chapa 5,07cm x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-TS-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,96
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	12,1
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**44,8**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-TS-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,95
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	12,1
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**45,8**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-TS-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,92
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	12,1
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**46,8**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,96
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,41
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**37,2**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,95
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,41
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**38,2**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo AI-80-10-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,26	3950,77
2L101,6x12,2	Colunas	56,54	1379,58
2U203,2x20,5	Nó de pórtico e banzos	40,72	1669,52
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	21,76	1134,35
2U305x37 REF2	Nó de pórtico	12,00	1070,28
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	251,84	8612,9
2U152,4x15,6	Montantes	117	3650,4
		Peso total do pórtico principal (kg)	21467,82
		Área de influência (m²)	800
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,92
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,41
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	26,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**39,1**

REF1 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

REF2 – Chapa 5,07 x 1,27 cm

Modelo TBI-80-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ180x37,1	Colunas	48,27	1621,82
TQ80x15,6	Colunas	56,54	882,02
TQ120x33,5	Nó de pórtico	40,96	1372,16
TQ120x19,4	Banzos	20,00	388,00
TQ120x17,3	Banzos	120,00	2076,00
TQ120x27,2	Banzos	20,00	544,00
TQ100x13	Diagonais e montantes	258,84	3364,92
		Peso total do pórtico principal (kg)	10248,92
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,27
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	5,25
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	25,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**32,1**

Modelo TBI-80-TT-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,78
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,87
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**33,5**

Modelo TBI-80-TT-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,32
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,87
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**34,0**

Modelo TBI-80-TT-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,74
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	9,87
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**34,4**

Modelo TBI-80-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,78
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,60
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,2**

Modelo TBI-80-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,32
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,60
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,7**

Modelo TBI-80-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Coluna	48,26	2007,97
TQ100x22,3	Coluna	56,54	1260,84
TQ150x43,8	Nó de pórtico e Banzos	40,48	1773,02
TQ120x17,3	Diagonais e montantes	243,24	4208,05
TQ150x31,6	Banzos	20,00	632,00
TQ150x28,6	Banzos	100,00	2860,00
TQ150x35,4	Banzos	20,00	708,00
		Peso total do pórtico principal (kg)	13449,88
		Área de influência (m²)	400
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,74
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,60
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	16,8
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**29,1**

Modelo AI-90-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3951,54
2L101,6x12,2	Colunas	30,89	1507,27
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	346,51	11850,61
2U254x29,76	Nó de pórtico	7,00	416,64
2U203,2x20,5	Diagonais	7,94	325,54
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
		Peso total do pórtico principal (kg)	22320,41
		Área de influência (m²)	450
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,68
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,78
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	49,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**56,1**

Modelo AI-90-10-TS-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,04
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,9
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**45,6**

REF1, REF2 e REF3 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

Modelo AI-90-10-TS-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,91
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,9
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**46,5**

REF1, REF2 e REF3 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

Modelo AI-90-10-TS-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,3
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	11,9
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**47,9**

REF1, REF2 e REF3 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

Modelo AI-90-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,04
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,00
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**45,6**

REF1, REF2 e REF3 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

Modelo AI-90-10-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	5,91
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,00
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**46,5**

REF1, REF2 e REF3 – CHAPA 5,07 cm x 1,27 cm

Modelo AI-90-10-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
U381x81,85	Colunas	48,40	3961,54
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	266,19	9103,69
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos	32,33	1489,1
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	71,13	3707,3
2U305x37 REF3	Nó de pórtico	14,00	1248,66
		Peso total do pórtico principal (kg)	25844,67
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,3
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,00
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	28,7
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**47,9**

Modelo TBI-90-10-TT-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,11
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	8,77
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**32,8**

Modelo TBI-90-10-TT-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,12
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	8,77
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**33,5**

Modelo TBI-90-10-TT-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,12
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	8,77
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**33,8**

Modelo TBI-90-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,11
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,17
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,2**

Modelo TBI-90-10-SJ-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,12
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,17
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**28,9**

Modelo TBI-90-10-SJ-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x37,6	Colunas	48,40	1819,84
TQ90x17,7	Colunas	61,77	1093,99
TQ130x33,2	Nó de pórtico	23,90	793,46
TQ130x18,6	Banzos	110,74	2059,76
TQ130x20,8	Banzos	22,60	470,08
TQ130x23,6	Banzos	22,60	533,36
TQ130x31,9	Banzos	22,60	720,94
TQ100x15,9	Diagonais	48,40	1819,84
		Peso total do pórtico principal (kg)	11790,5
		Área de influência (m²)	900
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	8,77
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,17
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	17,9
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**29,2**

Modelo AI-100-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x12,2	Colunas	64,67	3156,02
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	362,51	12397,81
2U203,2x20,5 REF1	Diagonais	27,32	1619,03
2U152,4x15,6	Montantes	148,2	4623,8
2U305x37 REF2	Nós de pórtico	15,20	1550,40
		Peso total do pórtico principal (kg)	27318,09
		Área de influência (m²)	500
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,98
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,30
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	54,6
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**60,9**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

Modelo AI-100-10-TS-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	4,9
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	10,71
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**45,0**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo AI-100-10-TS-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,04
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	10,71
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**46,2**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo AI-100-10-TS-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,87
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	10,71
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**48,0**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo AI-100-10-SJ-X			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	4,9
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	3,59
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**37,9**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo AI-100-10-TS-K			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	6,04
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	3,59
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**39,0**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo AI-100-10-TS-Y			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
2U381X81,85	Colunas	48,52	3970,99
2L101,6x16,8	Colunas	61,77	2075,59
2U203,2x17,1	Banzos e diagonais	228,40	7811,45
2U152,4x15,6	Montantes	136,5	4258,8
2U203,2x20,5 REF1	Banzos e diagonais	72,84	4316,5
2U203,2x20,5 REF2	Banzos e diagonais	65,93	5110,9
2U305x37 REF3	Nós de pórtico	14,00	1820
		Peso total do pórtico principal (kg)	29354,73
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	7,87
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	3,59
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	29,4
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**40,9**

REF1 e REF2 – Chapa 5,08 x 1,27 cm

REF3 – Chapa 5,08 x 1,90 cm

Modelo TBI-100-5			
Perfil	**Elemento**	**Comp. Total (m)**	**Peso (kg)**
TQ200x41,6	Colunas	48,52	2018,24
TQ100x19,9	Colunas	64,67	1286,98
TQ140x34,6	Nó de pórtico	25,95	897,80
TQ140x20,2	Banzos	125,63	2537,30
TQ140x25,6	Banzos	25,13	643,20
TQ140x31,6	Banos	22,61	714,5
TQ140x39	Banzos	22,61	978,88
TQ110x17,6	Diagonais	43,18	759,9
TQ110x15,8	Diagonais e montantes	43,18	759,9
		Peso total do pórtico principal (kg)	14226,35
		Área de influência (m²)	1000
		Taxa de consumo de aço dos contraventamentos (kg/m²)	1,98
		Taxa de consumo de aço das terças (kg/m²)	4,30
		Taxa de consumo de aço do pórtico principal (kg/m²)	20,3
		Total de consumo de aço (kg/m²)	**34,6**