

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E AÇO**

**ESTUDO DE VIGAS DE COBERTURA
TRELIÇA-VIERENDEEL CONSTITUÍDAS POR
PERFIS TUBULARES QUADRADOS E
PERFIS H LAMINADOS**

ANDRÉIA FAJARDO CAMPOS

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**"ESTUDO DE VIGAS DE COBERTURA TRELIÇA-VIERENDEEL
CONSTITUÍDAS POR PERFIS TUBULARES QUADRADOS E PERFIS H
LAMINADOS"**

ANDRÉIA FAJARDO CAMPOS

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Comissão Examinadora:

Prof. Ricardo Hallal Fakury, D.Sc.
DEES – UFMG (Orientador)

Lucas Figueiredo Grilo, Me.
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 13 de dezembro de 2016

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo entre os resultados apresentados para diferentes tipos de viga de cobertura. Serão analisadas vigas de cobertura em Treliça Warren, Viga Vierendeel e um Sistema Misto desenvolvido pela Vallourec, denominado PREON box, composto por Treliça Warren nas extremidades e Viga Vierendeel na região central com a utilização de perfil tubulares quadrados. Os três tipos de estruturas foram analisadas e dimensionadas com o uso do *software* SAP2000 com vãos que variam de quinze a noventa metros, utilizando perfis H tipo W da Gerdau e perfis tubulares quadrados da Vallourec. Segundo a Vallourec, o Sistema Misto PREON box é mais econômico para vãos maiores que trinta metros. Sendo assim, analisando o peso total das barras para as diferentes estruturas, obtidos com o *software* SAP2000, esperava-se encontrar resultados mais vantajosos economicamente para esse sistema. Porém, os resultados encontrados foram contrários a isso. As estruturas em Treliça Warren, com perfil tubular quadrado, apresentaram um peso total da estrutura menor do que aquele encontrado para o Sistema Misto. Tal fato não demonstra que a empresa Vallourec está enganada em suas afirmações, pois uma série de fatores foi condicionante para o resultado encontrado, como o fato de o estudo ter sido feito partindo de premissas iniciais que delimitavam a geometria da estrutura, ao passo que o *software* desenvolvido pela Vallourec para o cálculo da estrutura otimiza a geometria de forma a encontrar os resultados mais vantajosos.

Palavras chave: Estruturas de aço; Vigas de cobertura; Treliça Warren; Viga Vierendeel; Sistema misto; PREON box.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	VII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 HISTÓRICO DAS ESTRUTURAS METÁLICAS	4
3.2 O SISTEMA PREON BOX DA VALLOUREC	5
3.3 VANTAGENS DAS CONSTRUÇÕES METÁLICAS EM AÇO.....	7
3.4 PROPRIEDADES DO AÇO ESTRUTURAL	7
3.5 DIRETRIZES DE CÁLCULO PARA O SISTEMA DE COBERTURA	9
3.5.1 <i>Elementos constituintes</i>	9
3.5.2 <i>Ações e combinação de ações</i>	10
3.5.3 <i>Critérios de dimensionamento</i>	12
3.5.3.1 Tração axial.....	12
3.5.3.2 Compressão axial	13
3.5.3.3 Força cortante.....	16
3.5.3.4 Momento fletor	17
3.5.3.5 Combinação de força axial e momento fletor	20
3.5.3.6 Ligações.....	21
3.5.3.6.1 Dimensionamento de ligações soldadas Tipo K.....	24
3.5.3.6.2 Dimensionamento de ligações soldadas Tipo T.....	26
3.5.4 <i>Análise estrutural</i>	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 APRESENTAÇÃO DO PROJETO	29
4.2 ANÁLISE COM O USO DO SOFTWARE SAP2000.....	31
4.2.1 <i>Apresentação do software SAP2000</i>	31
4.2.2 <i>Carregamento a ser aplicado</i>	34
4.2.3 <i>Geometria</i>	35
4.2.4 <i>Análise para perfis H tipo W da Gerdau</i>	36
4.2.5 <i>Análise para perfis tubulares quadrados da Vallourec</i>	38
4.3 CÁLCULO DAS LIGAÇÕES.....	39
4.3.1 <i>Verificação da ligação Tipo K:</i>	40
4.3.2 <i>Verificação da Ligação Tipo T:</i>	42

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A - B	52
APÊNDICE A – RESULTADOS E SAÍDAS GRÁFICAS PARA ANÁLISE UTILIZANDO PERFIL W.....	52
APÊNDICE B – RESULTADOS E SAÍDAS GRÁFICAS PARA ANÁLISE UTILIZANDO PERFIL TQ.....	61
ANEXO A - C.....	75
ANEXO A – TABELAS PARA CÁLCULO DAS COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	75
ANEXO B – VALORES DOS COEFICIENTES DE FLAMBAGEM E COMPRIMENTOS DE FLAMBAGEM	77
ANEXO C – CONDIÇÕES DE VALIDADE DE LIGAÇÕES SOLDADAS.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Sistema misto proposto pela Vallourec	6
Figura 3.2: Usina da Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil.....	6
Figura 3.3: Representação gráfica do ensaio de tração	8
Figura 3.4: Elementos constituintes da Treliza Warren e da Viga Vierendeel	10
Figura 3.5: Ligações com afastamento e com sobreposição.....	22
Figura 3.6: Tipologia das ligações.....	23
Figura 3.7: Modos de falha	23
Figura 3.8: Simbologia da ligação tipo K com afastamento.....	25
Figura 3.9: Simbologia da ligação tipo K com afastamento.....	26
Figura 3.10: Simbologia da ligação Tipo T.....	28
Figura 4.1: Sistemas estruturais.....	29
Figura 4.2: Exemplo de <i>grid</i> gerado com a introdução das coordenadas.....	31
Figura 4.3: Exemplo da definição do material e da criação do grupo de seções.....	32
Figura 4.4: Geometria e carregamento (kN) para Treliza Warren com vão de 15 metros.....	33
Figura 4.5: Análise interativa do perfil a ser adotado	33
Figura 4.6: Coeficiente de aproveitamento das barras	33
Figura 4.7: Identificação dos pontos de aplicação das cargas nodais.....	35
Figura 4.8: Janela de verificação estrutural dos elementos	38
Figura 4.9: Regiões nodais 1 e 2 para o Sistema Misto com vão de 15m	40
Figura 5.1: Distribuição do momento fletor de acordo com o espaçamento entre os montantes	48
APÊNDICES	
Figura A.1: Saída gráfica Treliza Warren - vão de 15m	55
Figura A.2: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 15m	55
Figura A.3: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 15m.....	55
Figura A.4: Saída gráfica Treliza Warren - vão de 30m	56
Figura A.5: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 30m	56
Figura A.6: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 30m.....	56
Figura A.7: Saída gráfica Treliza Warren - vão de 45m	57
Figura A.8: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 45m	57

Figura A.9: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 45m.....	57
Figura A.10: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 60m	58
Figura A.11: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 60m	58
Figura A.12: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 60m.....	58
Figura A.13: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 75m	59
Figura A.14: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 75m	59
Figura A.15: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 75m.....	59
Figura A.16: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 90m	60
Figura A.17: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 90m	60
Figura A.18: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 90m.....	60
Figura B.1: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 15m	69
Figura B.2: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 15m.....	69
Figura B.3: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 15m.....	69
Figura B.4: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 30m	70
Figura B.5: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 30m.....	70
Figura B.6: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 30m.....	70
Figura B.7: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 45m	71
Figura B.8: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 45m.....	71
Figura B.9: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 45m.....	71
Figura B.10: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 60m.....	72
Figura B.11: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 60m.....	72
Figura B.12: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 60m.....	72
Figura B.13: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 75m.....	73
Figura B.14: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 75m.....	73
Figura B.15: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 75m	73
Figura B.16: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 90m.....	74
Figura B.17: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 90m.....	74
Figura B.18: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 90m.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do aço	8
Tabela 3.2: Valores de $(b/t)_{lim}$	15
Tabela 4.1: Estruturas a serem analisadas	30
Tabela 4.2: Carregamento aplicado nos nós superiores da estrutura.....	35
Tabela 4.3: Altura das vigas.....	36
Tabela 4.4: Coordenadas para o grid no eixo X	36
Tabela 4.5: Peso das estruturas utilizando perfis W	37
Tabela 4.6: Peso das estruturas utilizando perfis TQ.....	39
Tabela 5.1: Comparação dos resultados para o Perfil W.....	45
Tabela 5.2: Comparação dos resultados para o Perfil TQ	45
APÊNDICES	
Tabela A.1: Perfis utilizados na análise com perfil W	52
Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ.....	52
ANEXOS	
Tabela A.1: Valores dos coeficientes de ponderação das ações γ_g, γ_q	75
Tabela A.2: Valores dos fatores de combinação Ψ_0 e redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações variáveis	76
Tabela B.1: Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados	76
Tabela C.1: Condições de validade de ligações soldadas entre diagonais e montantes de perfis tubulares circulares ou retangulares e banzos de perfis tubulares retangulares.....	76
Tabela C.2: Condições adicionais para o uso da Tabela C1	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Apoiado-apoiado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
AL	Apoiado-livre
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Carga Permanente
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
FLA	Flambagem Local das Almas
FLM	Flambagem Local das Mesas
FLT	Flambagem Lateral com Torção
IBC	<i>International Building Code</i>
kN	Quilonewton
kN/m ²	Quilonewton por metro quadrado
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
SC	Sobrecarga
TQ	Tubular Quadrado
VMB	Vallourec & Mannesmann
VSF	Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil
b	Largura
b_0	Largura da seção transversal do banzo
b_f	Largura da mesa
b_i	Largura da seção transversal de diagonais ou montantes em perfil tubular retangular ($i= 1,2,3$)
c_a	Coefficiente

d	Altura total da seção transversal
e	Excentricidade
f_u	Resistência à ruptura do aço à tração
f_y	Resistência ao escoamento do aço
g	Comprimento do afastamento entre diagonais
h	Altura
k_v	Coefficiente de flambagem da alma por cisalhamento
n	Razão de tensão no banzo
p	Comprimento da área de contato projetada da diagonal sobreposta na face do banzo
q	Comprimento da sobreposição, medido na face do banzo, entre as diagonais
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento
r_x	Raio de giração em relação ao eixo central x
r_y	Raio de giração em relação ao eixo central y
t	Espessura
t_w	Espessura da alma
x_0	Coordenada do centro de cisalhamento na direção dos eixo central x
y_0	Coordenada do centro de cisalhamento na direção dos eixo central y
A	Área
A_0	Área da seção transversal do banzo
A_e	Área líquida efetiva da seção transversal
A_{ef}	Área efetiva da seção transversal
A_g	Área bruta da seção transversal
A_w	Área efetiva de cisalhamento
C_b	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do aço
$F_{Gi,k}$	Valor característico das ações permanentes
$F_{QI,k}$	Valor característico da ação variável considerada principal
$F_{Qi,k}$	Valor característico das ações variáveis secundárias

G	Módulo de elasticidade transversal do aço
I	Momento de inércia
J	Constante de torção
K	Coefficiente de flambagem de barras comprimidas
L	Comprimento
M	Momento fletor
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica
M_{pl}	Momento fletor de plastificação
M_r	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo
M_{Rk}	Momento fletor resistente nominal
M_{Sd}	Momento fletor solicitante de cálculo
N_e	Força axial de flambagem elástica
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
Q	Fator de redução total associado à flambagem local
$Q_a; Q_s$	Fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA e AL, respectivamente
V_{pl}	Força cortante de plastificação
V_{Rd}	Força cortante resistente de cálculo
V_{Rk}	Força cortante resistente nominal
V_{Sd}	Força cortante solicitante de cálculo
W	Módulo de resistência elástico
W_{ef}	Módulo de resistência elástico mínimo
Z	Módulo de resistência plástico
β	Coefficiente de dilatação térmica; coeficiente em geral
ε	Deformação
γ	Coefficiente de ponderação da resistência ou das ações

λ	Índice de esbeltez
λ_0	Índice de esbeltez reduzido
λ_p	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
λ_r	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
ν	Coefficiente de Poisson
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão
ψ	Fator de redução de ações; fator de combinação de ações
θ_i	Ângulo entre diagonal e banzo
ρ	Massa específica
σ	Tensão normal
$\sigma_{o,sd}$	Máxima tensão de compressão de cálculo do banzo na superfície de contato com diagonais ou montantes

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dominaram a sociedade por facilitarem, otimizarem e agilizarem as atividades cotidianas. As mudanças causadas por tais avanços invadiram diversos setores, como a comunicação, o armazenamento e o processamento de dados, a produção, dentre outros, e também a engenharia civil. A necessidade de evolução técnica, eficiência, sofisticação e customização fizeram com que dispositivos eletrônicos e supercomputadores virassem exemplos de objetos de necessidade permanente e em constante evolução.

Os avanços possibilitaram o estudo de novos métodos construtivos que buscam atingir maior eficiência estrutural juntamente com uma racionalização de material, bem como redução do tempo de fabricação e montagem. É o que a Vallourec propõe com sua nova solução para vigas de cobertura denominada PREON box.

A solução PREON box é uma estrutura para vigas de cobertura que utiliza a combinação de Treliça Warren sem montantes e de Viga Vierendeel, aproveitando o que cada uma tem de melhor. Emprega-se a Treliça Warren na região próxima aos apoios, visto que essas regiões são submetidas às maiores forças cortantes e a treliça é muito eficiente para absorver esses esforços. Já na região central, em que são maiores os momentos fletores, emprega-se a Viga Vierendeel que é muito eficiente para suportar esse tipo de esforço solicitante.

A Vallourec tem empregado essa solução internacionalmente em diversas obras nos últimos anos em estruturas que necessitam vencer grandes vãos para sua utilização, como armazéns, hangares, shoppings, complexos industriais, dentre outros. No Brasil essa solução foi largamente empregada na obra da usina da Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB), em Jeceaba, Minas Gerais, em 2011.

Diante disso, este trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo entre as soluções: Treliça Warren sem montantes, Viga Vierendeel e Sistema Misto de Treliça Warren sem montante e Viga Vierendeel (semelhante ao proposto pela Vallourec no sistema PRON box). O estudo será feito para vários vãos e utilizando dois tipos de perfis, perfis tubulares quadrados da Vallourec e perfis H do tipo W da Gerdau. Buscar-se-á com isso fazer uma comparação, com base no peso de cada estrutura, para chegar nas soluções mais econômicas e adequadas de acordo com o comprimento dos vãos.

O dimensionamento será feito utilizando o *software* SAP2000 que se baseia no Método dos Elementos Finitos. Dessa forma, o SAP2000 faz uma análise global, proporcionando a interação mais precisa entre os elementos, o que torna o cálculo mais preciso e próximo da situação real.

Cabe salientar que, apesar de todas as vantagens proporcionadas pelo uso dos *softwares*, eles são apenas ferramentas, que não possuem nenhuma utilização sem os conhecimentos teóricos do usuário - o engenheiro projetista. É de inteira responsabilidade do engenheiro ter conhecimento de como manipular, introduzir os dados e principalmente entender como é o processamento e os métodos de cálculo realizados pelo *software*. Também cabe ao engenheiro fazer uma análise crítica dos resultados encontrados e ter discernimento para tomar decisões e fazer escolhas, inclusive no refinamento de seus cálculos e no conhecimento da aproximação obtida.

Com as respostas obtidas por meio do *software* computacional, será possível comparar os resultados e observar semelhanças, diferenças e dificuldades encontradas.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo promover uma análise comparativa entre os resultados apresentados para diferentes tipos de viga de cobertura. Serão analisados três modelos: Treliça Warren sem montantes, Viga Vierendeel e um Sistema Misto empregando esses dois tipos. Espera-se encontrar como resultado que o Sistema Misto se mostre mais vantajoso para vãos maiores do que 30 metros, conforme é indicado em catálogos fornecidos pela empresa Vallourec que se utiliza desse sistema.

O comparativo será feito, simplificadaamente, apenas com base no peso da estrutura, calculado a partir do dimensionamento dos perfis que suportem os esforços decorrentes do carregamento estipulado. Tal dimensionamento será feito para perfis tubulares quadrados da Vallourec e perfis H tipo W da Gerdau.

As estruturas serão processadas e dimensionadas com o uso do *software* SAP2000. Porém, cabe salientar que não é objetivo do trabalho discutir a confiabilidade do processamento de dados realizados pelo *software* SAP2000, uma vez que sua correta utilização depende dos conhecimentos prévios do usuário, além da sua capacidade de análise e discernimento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Histórico das Estruturas Metálicas*

A história das estruturas metálicas não se iniciou há pouco tempo, seu surgimento data do século XII, quando era empregada inicialmente como tirantes e pendurais de ferro fundido. Com a evolução passou a ser utilizada em estruturas de telhado e no final do século XVIII tem-se registros da utilização de ferro fundido em cúpulas de igrejas e pontes. No início do século XIX começou-se a produção industrializada de componentes de ferro laminado, o que possibilitou a construção de edifícios industriais em estrutura metálica (FAKURY, 2009).

Segundo Bellei (2003) apesar de em 1750 ter-se descoberto como produzir industrialmente o aço, sua grande utilização em edifícios se deu somente em 1880 nos Estados Unidos, principalmente em Chicago.

Desde 1900, o uso do aço em estruturas metálicas tem percorrido um caminho de constantes evoluções até chegar no material e técnicas conhecidos nos dias atuais. Mas sua evolução é dinâmica, não se estagna, os princípios podem não mudar, mas novos estudos e pesquisas vêm para acrescentar e aperfeiçoar as características do aço e as bases teóricas que sustentam os projetos estruturais. Essa evolução tornou possível a disseminação e adequação da estrutura metálica em diversos tipos de edificações, tais como: complexos industriais, shoppings, pontes e edifícios comerciais.

No Brasil, as primeiras obras em estrutura metálica eram realizadas com material importado. Somente em 1946 foi construída a primeira indústria siderúrgica moderna, a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Nela as laminações entraram em atividade em 1948 e marcaram o início da autonomia brasileira na produção de ferro e aço.

Apesar de Chaves (2007) afirmar que o processo de construções em aço se destaca, pois o aço possui maior resistência mecânica se comparado a outros materiais e leva ao processo construtivo mais veloz e que suporta os maiores vãos, seu uso em edificações de múltiplos pavimentos ainda é tímido no Brasil em face a cultura da utilização do concreto armado. Sua utilização ainda ocorre predominantemente em edificações horizontais, sejam elas galpões industriais, comerciais, ginásios e espaços para eventos.

A normatização do uso de estruturas metálicas no Brasil fica a cargo da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que foi fundada em 1940. Para este estudo serão utilizadas as seguintes normas: ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, e ABNT NBR 16239:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares.

3.2 O Sistema PREON box da Vallourec

Neste tópico será apresentado o que é o sistema PREON box da Vallourec, uma vez que tal sistema motivou a realização deste trabalho.

PREON box trata-se de um sistema que engloba toda a cadeia produtiva para a construção de coberturas para galpões, hangares, etc., desde o projeto, até a fabricação, transporte e montagem da estrutura. Com a colaboração de especialistas em estruturas, a Vallourec criou um programa interativo para um rápido, seguro e flexível planejamento da estrutura. Nesse programa computacional são adotadas soluções modulares que otimizam a utilização de material.

A solução apresentada pela Vallourec é a utilização de um sistema misto para as vigas de cobertura, conforme mostrado na Figura 3.1. Nesse sistema, as partes mais próximas dos apoios são projetadas como Treliça Warren sem montantes, pois essa treliça é eficiente para resistir à força cortante. Já a região central é projetada como Viga Vierendeel que é eficiente para resistir aos momentos fletores presentes no meio dos vãos. Além disso, toda a estrutura é feita com perfil tubular laminado a quente.

Em seu catálogo PREON box *High Quality, Flexibility and Speed in Industrial Hall Construction*, a Vallourec afirma que para vãos de até 30 metros estruturas convencionais são mais vantajosas, porém, acima de 30 metros o sistema PREON box se torna mais econômico e permite a obtenção de grandes vãos até a ordem de 100 metros ou mais.

O sistema PREON box, ainda segundo seu catálogo, também traz os seguintes benefícios:

- Processo rápido: a produção industrial é rápida e a montagem é simples, possibilitando a utilização do sistema *just-in-time*. O *software* de planejamento economiza até 20% em materiais e reduz o tempo do processo em até 30% em comparação com a execução de projetos convencionais.

- Alta qualidade: os perfis tubulares laminados a quente possuem alta capacidade de carga, longa durabilidade e uma estética agradável.

- Redução de custos: menor custo com material devido à redução do peso, além da redução de cortes e soldagens.

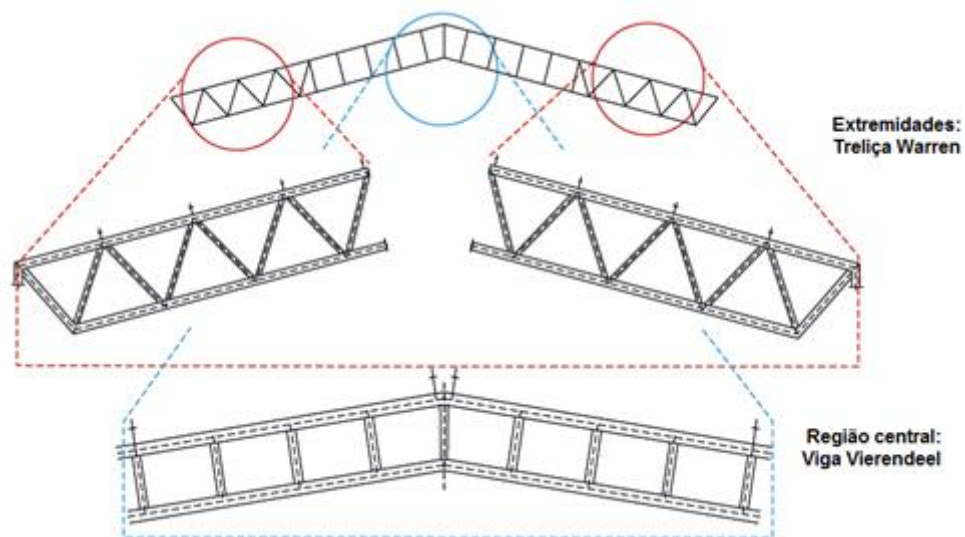


Figura 3.1: Sistema misto proposto pela Vallourec

Fonte: Catálogo PREON box, 2016

A Figura 3.2 mostra a usina da Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil, em Jeceaba, Minas Gerais, onde foi largamente utilizado o sistema PREON box.

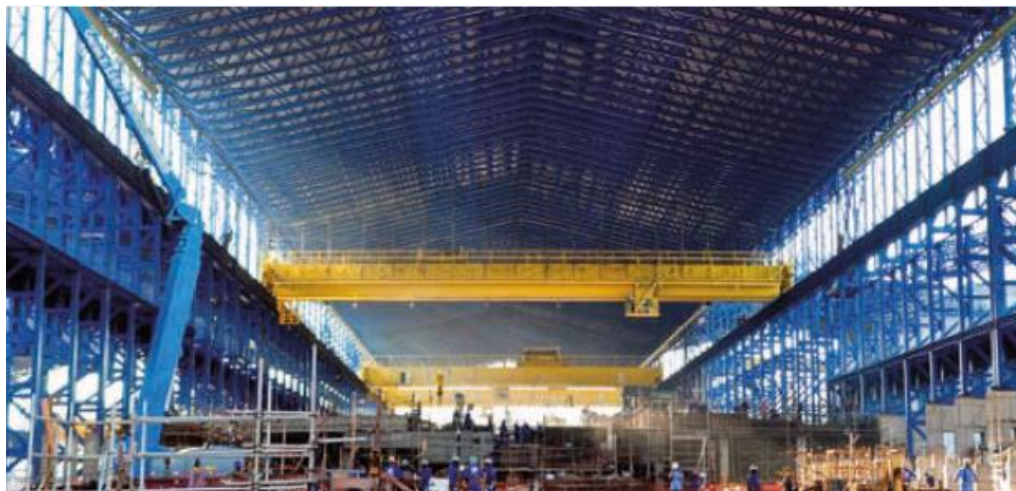


Figura 3.2: Usina da Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil

Fonte: Catálogo PREON box, 2016

3.3 Vantagens das Construções Metálicas em Aço

O aço como material estrutural proporciona diversas vantagens tanto na fase de projeto, quanto na fase de construção e utilização. A seguir são apresentadas algumas delas:

- Possibilidade de vencer grandes vãos. O aço é um material que possui grande relação entre resistência e peso específico, o que proporciona seções de menor área e peso reduzido quando comparado, por exemplo, com o concreto armado.

- Racionalização de material e mão de obra, além de uma obra limpa e organizada. As edificações em aço partem do princípio da industrialização da construção, com isso as peças são entregues no canteiro de obras já com as dimensões de projeto e a entrega pode ser feita de acordo com a evolução da obra. Tudo isso também contribui para que o tempo de execução do serviço seja cada vez mais curto, o que é muitas vezes uma demanda do mercado.

- Flexibilidade de reformas, reforço e ampliação. É possível incorporar novos elementos na edificação para sua reforma ou ampliação ou, quando necessário, utilizar a estrutura em aço como reforço de estruturas já existentes.

- Possibilidade de reciclagem e reaproveitamento. O aço possui alto valor de revenda, a estrutura pode ser desmontada e suas peças reaproveitadas ou derretidas para a confecção de novas peças.

3.4 Propriedades do Aço Estrutural

O aço é definido como sendo uma liga a base de ferro e que possui até 2% de carbono, além de outros elementos que são adicionados para a otimização de suas propriedades, tais como o manganês, silício, fósforo, enxofre, dentre outros (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Os aços estruturais são aqueles que possuem teor de carbono normalmente inferior a 0,3%. Esse teor de carbono, combinado com pequenas quantidades de outros elementos, garantem ao aço uma boa ductibilidade, boa soldabilidade e uma elevada relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento, que são características que proporcionam uma adequada aplicação do aço como material estrutural.

A ABNT NBR 8800:2008 adota para as propriedades mecânicas dos aços estruturais os valores listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do aço

Propriedades	Simbologia	Valores
Módulo de elasticidade	E	200000 MPa
Módulo de elasticidade transversal	G	77000 MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,3
Massa específica	ρ_a	7850 kg/m ³
Coefficiente de dilatação térmica	β_a	1,2x10 ⁻⁵ °C ⁻¹

Fonte: ABNT NBR 8800:2008, p.13

Além disso, a norma determina que, para que suas prescrições possam ser utilizadas, o aço estrutural deve possuir resistência ao escoamento (f_y) limitada ao valor de 450 MPa e relação entre a resistência à ruptura (f_u) e ao escoamento igual ou superior a 1,18.

O aço estrutural possui algumas propriedades cujo conhecimento é de fundamental importância. Muitas delas são obtidas por meio do ensaio de tração, que consiste em submeter um corpo de prova a um esforço uniaxial que tende a alongá-lo até a ruptura. As deformações correspondentes a cada estágio de tensão são registradas e assim é gerado o diagrama tensão x deformação semelhante ao apresentado na Figura 3.3.

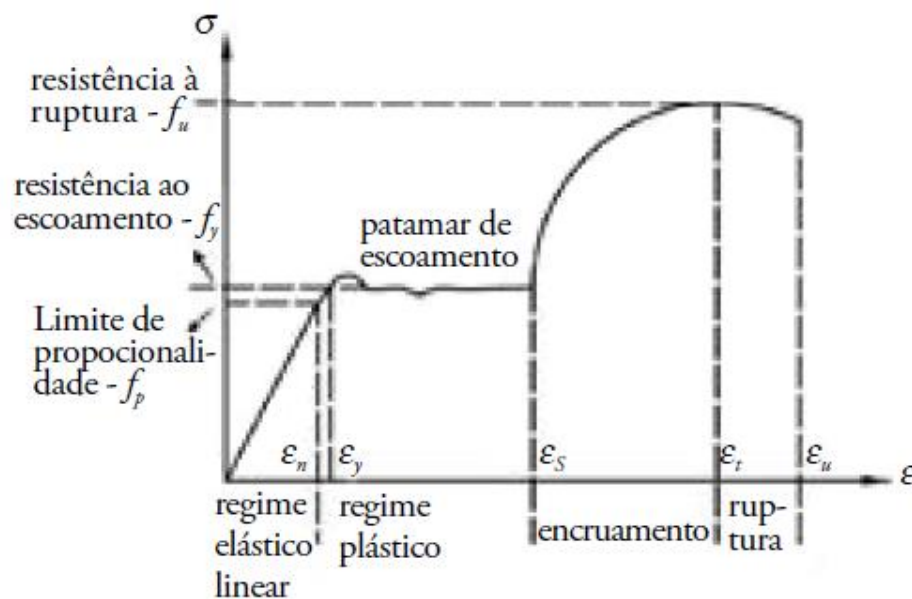


Figura 3.3: Representação gráfica do ensaio de tração

Fonte: ARAÚJO et al., 2016, p.43

A partir do gráfico é possível perceber três fases distintas. A Fase Elástica corresponde ao trecho reto em que o material segue a Lei de Hooke, nela as tensões (σ) e deformações (ε) obedecem à relação $\sigma=E\varepsilon$. A Fase Plástica se inicia quando se atinge a tensão de escoamento (f_y). Nessa fase a tensão fica constante, igual à f_y , enquanto a deformação aumenta consideravelmente. A terceira fase, denominada Fase de Encruamento, ocorre quando após o escoamento a tensão volta a crescer com o aumento da deformação, até que o material atinge a tensão mais elevada que é denominada resistência à ruptura (f_u). Após atingida essa tensão, a seção transversal do corpo de prova se reduz rapidamente até ocorrer a ruptura.

A seguir são apresentadas as definições de importantes propriedades que podem ser determinadas por meio do ensaio, segundo Araújo *et al.* (2016):

- Elasticidade: é a capacidade de o material voltar à forma original após sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento. Essa propriedade ocorre durante a fase elástica que se encerra quando o material atinge a resistência ao escoamento, f_y .

- Plasticidade: é uma propriedade inversa à elasticidade. A deformação plástica é permanente e provocada por uma tensão igual ou superior à resistência ao escoamento.

- Ductilidade: é a capacidade do material se deformar antes que ocorra a ruptura do mesmo.

- Fragilidade: propriedade contrária à ductilidade. Agentes externos podem ser capazes de transformar o aço em um material frágil e, com isso, eles se quebram com valores relativamente baixos de deformações.

- Tenacidade: é a energia total, plástica ou elástica, que o material é capaz de absorver até a sua ruptura.

3.5 Diretrizes de Cálculo para o Sistema de Cobertura

3.5.1 Elementos constituintes

O sistema de cobertura será reduzido a um sistema plano e, portanto, será feita uma análise bidimensional. O presente trabalho se baseia nos dois modelos apresentados na Figura 3.4, Treliça Warren e Viga Vierendeel. A Treliça Warren é formada pelo banzo inferior, banzo

superior e diagonais. Já na Viga Vierendeel não existem diagonais e a ligação entre os banzos é feita pelos elementos verticais denominados montantes.

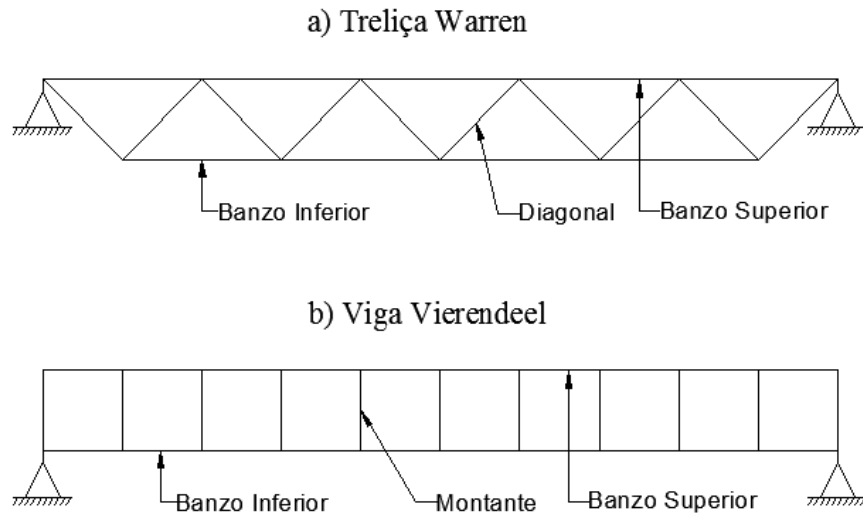


Figura 3.4: Elementos constituintes da Treliça Warren e da Viga Vierendeel

3.5.2 Ações e combinação de ações

Um dos pontos cruciais na elaboração de um projeto é a correta determinação das ações atuantes. No caso de treliças de cobertura em estruturas metálicas, por exemplo, as principais ações atuantes são o peso próprio da estrutura e dos elementos de fechamento, a sobrecarga e a ação do vento. A ABNT NBR 8800:2008 classifica as ações como sendo de três tipos: permanentes, variáveis e excepcionais.

As ações permanentes são aquelas que apresentam valores praticamente invariáveis durante a vida útil da estrutura e são classificadas como diretas ou indiretas. As diretas são decorrentes do peso próprio da estrutura, peso dos componentes da construção e empuxos de terras não removíveis. As indiretas são devidas a recalques, retração dos materiais e imperfeições geométricas.

Ações variáveis se caracterizam pela variação significativa de seus valores durante a vida útil da estrutura. As mais comuns são as sobrecargas decorrentes do uso e ocupação da edificação.

As ações excepcionais são as que possuem probabilidade muito baixa de ocorrência e, quando ocorrem, possuem duração extremamente curta. Exemplos dessas ações são: sismos, incêndios, explosões, dentre outras.

Para a determinação do carregamento que solicita a estrutura, deve-se trabalhar com a combinação de ações, que deve ser feita de modo a se determinar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

No caso da verificação dos estados-limites últimos, que é o que será abordado neste trabalho, os cálculos devem ser realizados em função da combinação última de ações. As combinações últimas normais são aquelas que decorrem do uso previsto para a edificação. Devem ser feitas as combinações necessárias e cada uma delas deve conter as ações permanentes e a ação variável principal em valores característicos e as ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos. As combinações devem seguir a seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k})$$

sendo:

$F_{Gi,k}$ o valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ valor característico da ação variável considerada principal;

$F_{Qj,k}$ valor característico das ações variáveis secundárias;

γ_{gi} , γ_{q1} e γ_{qj} os coeficientes de ponderação das ações permanentes, da ação variável principal e das demais ações variáveis respectivamente. Seus valores são apresentados na Tabela A.1 do Anexo A.

Ψ_{0j} são os fatores de combinação das ações. Seus valores são apresentados na Tabela A.2 do Anexo A.

3.5.3 Critérios de dimensionamento

3.5.3.1 Tração axial

Nas barras tracionadas podem ocorrer dois estados-limites últimos, o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida, ambos com critérios de dimensionamento estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008 e apresentados a seguir:

- Escoamento da seção bruta:

Para que o escoamento da seção bruta não ocorra deve ser atendida a relação:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

onde $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo, $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo, A_g é a área bruta da seção transversal, f_y a resistência ao escoamento do aço e γ_{a1} o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10 para estados-limites últimos relacionados ao escoamento.

- Ruptura da seção líquida:

Para que não ocorra a ruptura da seção líquida deve-se ter:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$$

onde $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo, $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo, A_e é a área líquida efetiva da seção transversal, f_u a resistência à ruptura do aço e γ_{a2} o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,35 para estados-limites últimos relacionados à ruptura.

- Limitação do índice de esbeltez:

Para as barras tracionadas têm-se a limitação do índice de esbeltez (λ) dada pela seguinte condição, sendo L o comprimento destravado e r o raio de giração.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300$$

3.5.3.2 Compressão axial

Para as barras comprimidas os estados-limites últimos aplicáveis são: instabilidade global e flambagem local. Os critérios de dimensionamento são estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008, porém para seções tubulares a ABNT NBR 16239:2013 apresenta algumas particularidades que serão aqui expostas. Para o dimensionamento deve ser atendida a condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

sendo $N_{c,Sd}$ a força axial de compressão solicitante de cálculo e $N_{c,Rd}$ a força axial de compressão resistente de cálculo, dada por:

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

onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão

Q é o fator de redução total associado à flambagem local

A_g é a área bruta da seção transversal da barra

O fator de redução associado à resistência à compressão, χ , segundo a ABNT NBR 8800:2008, é dado por:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \text{ (para } \lambda_0 \leq 1,5) \text{ e } \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \text{ (para } \lambda_0 \geq 1,5)$$

A ABNT NBR 16239:2013 propõe que para perfis tubulares laminados a quente (sem costura) ou tratados termicamente para alívios de tensões (com ou sem costura), χ seja dado por:

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

Em ambas as formulações, o índice de esbeltez reduzido, λ_0 , é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$$

- Instabilidade global por flexão ou torção

O valor da força axial de flambagem elástica, N_e , para seções com dupla simetria é dado pelo menor valor das três expressões a seguir. A primeira e a segunda são referentes à flambagem por flexão em relação aos eixos centrais de inércia x e y, respectivamente. Já a terceira expressão se refere à flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

onde:

$K_x L_x$ e $K_y L_y$ são os comprimentos de flambagem em relação aos eixos x e y, respectivamente (os coeficientes de flambagem K_x e K_y são apresentados no Anexo B);

I_x e I_y são os momentos de inércia da seção transversal em relação aos eixos x e y, respectivamente;

$K_z L_z$ é o comprimento de flambagem por torção (o valor do coeficiente de flambagem por torção, K_z , é apresentado no Anexo B);

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

J é a constante de torção da seção transversal;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)}$$

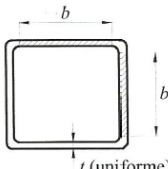
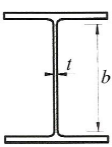
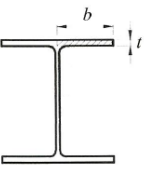
sendo r_x e r_y os raios de giração em relação aos eixos centrais x e y, respectivamente, e x_0 e y_0 as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

- Flambagem local

Na expressão para obtenção da força axial de compressão resistente de cálculo, a consideração da flambagem local é feita pelo parâmetro Q , que é um fator de redução.

Para os casos em que a relação largura/espessura (b/t) for inferior ao valor de $(b/t)_{lim}$, apresentado na Tabela 3.2, a flambagem local não ocorre e $Q = 1$.

Tabela 3.2: Valores de $(b/t)_{lim}$

Elemento	Descrição do elemento	Indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	Mesas ou almas de seções tubulares retangulares		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AA	Almas de seções H		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	Mesas de seções H		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado de FAKURY, 2009, p.182

Caso contrário, $Q = Q_s \cdot Q_a$, que são fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL (apenas uma borda longitudinal vinculada) e AA (duas bordas longitudinais vinculadas), respectivamente.

Para os elementos AA, se $b/t > (b/t)_{\text{lim}}$, Q_a é dado pela divisão da área efetiva (A_{ef}) pela área bruta (A_g), de acordo com as formulações abaixo:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}, \text{ sendo } A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t$$

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b$$

A grandeza b_{ef} é decorrente da substituição da tensão não uniforme que atua no elemento, por uma tensão uniforme e igual à tensão máxima nas bordas, atuando em uma largura efetiva (b_{ef}). c_a é um coeficiente, igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos, já σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado e é, de forma conservadora, tomada igual a f_y .

Já para os elementos AL, que no presente trabalho serão as mesas dos perfis W, a determinação de Q_s segue o exposto abaixo:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- Índice de esbeltez

A limitação do índice de esbeltez (λ) das barras comprimidas é dada pela formulação abaixo, sendo L o comprimento destravado, K o coeficiente de flambagem e r o raio de giração.

$$\lambda = \frac{KL}{r} \leq 200$$

3.5.3.3 Força cortante

No dimensionamento de uma barra à força cortante, a força cortante solicitante de cálculo, V_{Sd} , deve ser menor que a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} :

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \text{ sendo } V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (\gamma_{a1} = 1,10)$$

V_{Rk} é a força cortante resistente nominal e pode ser obtida seguindo as relações abaixo:

- para $\lambda < \lambda_p$: $V_{Rk} = V_{pl} = 0,60A_w f_y$
- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: $V_{Rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} V_{pl}$
- para $\lambda > \lambda_r$: $V_{Rk} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 V_{pl}$

sendo:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad , \quad \lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad e \quad \lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$$

Nas expressões acima, k_v é um coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento e é tomado igual a 5,0 para almas sem enrijecedores transversais e V_{pl} é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento.

Para perfis W, a área efetiva de cisalhamento (A_w) é dada pela multiplicação da altura da seção transversal (d) pela largura da alma (t_w), sendo assim: $A_w = dt_w$. Já para as seções tubulares quadradas $A_w = 2ht_w$, sendo h igual à altura da parte plana das almas.

3.5.3.4 Momento fletor

Na presença de momento fletor, podem ocorrer três estados-limite últimos: flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da(s) alma(s) (FLA).

No dimensionamento de uma barra à flexão simples, o momento fletor solicitante de cálculo, M_{Sd} , deve ser menor que o momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} :

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \text{ sendo } M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (\gamma_{a1} = 1,10)$$

M_{Rk} é o momento fletor resistente nominal e deve ser tomado como o menor valor encontrado para FLT, FLM e FLA.

- Flambagem lateral com torção

Os perfis tubulares quadrados não estão sujeitos a esse modo de colapso. Já para os perfis W, o momento fletor resistente nominal é dado por:

- para $\lambda \leq \lambda_p$: $M_{Rk} = M_{pl} = Z f_y$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: $M_{Rk} = C_b \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq M_{pl}$

- para $\lambda > \lambda_r$: $M_{Rk} = M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \leq M_{pl}$

sendo:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}, \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad e \quad \lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\beta_1 = \frac{M_r}{EJ} = \frac{0,7 f_y W}{EJ}$$

A grandeza C_b apresentada é um fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme e é dado, no caso de as duas mesas estarem livres para se deslocar lateralmente ao longo do comprimento destravado, por:

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \leq 3$$

onde:

$M_{máx}$ é o valor do momento fletor máximo, em módulo, no comprimento destravado;

M_A é o valor do momento fletor, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

M_B é o valor do momento fletor, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

M_C é o valor do momento fletor, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda.

- Flambagem local da mesa comprimida

Os perfis tubulares quadrados e os perfis W estão sujeitos a esse modo de colapso. O momento fletor resistente nominal é dado por:

- para $\lambda \leq \lambda_p$: $M_{Rk} = M_{pl} = Z f_y$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: $M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$

- para $\lambda > \lambda_r$: $M_{Rk} = M_{cr}$

Para os perfis W, tem-se:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad , \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad e \quad \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(0,7f_y)}}$$

$$M_r = 0,7f_y W \quad e \quad M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c$$

Para seções tubulares quadradas, tem-se:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad , \quad \lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad e \quad \lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$M_r = f_y W_{ef} \quad e \quad M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} f_y$$

Nessas últimas expressões, W_{ef} é o módulo de resistência elástico mínimo, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida de largura igual à b_{ef} (dado no item de resistência a compressão).

- Flambagem local da(s) alma(s)

Os perfis tubulares quadrados e os perfis W estão sujeitos a esse modo de colapso. O momento fletor resistente nominal é dado por:

- para $\lambda \leq \lambda_p$: $M_{Rk} = M_{pl} = Z f_y$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: $M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$

Para os perfis W tem-se:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad , \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad e \quad \lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$M_r = f_y W$$

Para seções tubulares quadradas não é necessário verificar a flambagem local das almas, basta apenas verificar que $\lambda < \lambda_r$, sendo λ e λ_r iguais dados pelas fórmulas acima. Isso porque a mesa comprimida e as almas têm iguais valores de largura plana e espessura, porém a mesa encontra-se submetida a uma sollicitação mais rigorosa, uma vez que ela está inteiramente comprimida, ao passo que as almas estão com parte comprimida e parte tracionada.

3.5.3.5 Combinação de força axial e momento fletor

Quando atuam em uma barra de aço força axial e momento fletor, simultaneamente, podem ocorrer todos os estados-limites últimos decorrentes de cada um dos esforços sollicitantes isolados, sendo os efeitos potencializados ou aliviados pelos outros esforços sollicitantes.

Todos os estados-limites possíveis de ocorrer ficam atendidos se a limitação apresentada nas expressões de interação a seguir for atendida:

$$\bullet \text{ se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2: \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

$$\bullet \text{ se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2: \frac{N_{Sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

onde:

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ou compressão;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de tração ou compressão;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal.

3.5.3.6 Ligações

As ligações exercem um importante papel no comportamento da estrutura. Elas podem ser de diversos tipos, soldadas, parafusadas, com chapas de ligação, e, deve-se buscar aquela que atenda aos critérios de resistência necessários, mas que, aliado a isso, seja a solução mais econômica e de simples execução.

Nas ligações entre perfis W, a ligação é calculada de forma a resistir aos esforços existentes na região nodal. Já nas ligações com perfis tubulares, devem ser atendidos requisitos que podem influenciar no dimensionamento desses perfis, podendo ser necessário utilizar um perfil maior do que aquele calculado apenas para resistir as solicitações apresentadas nos itens anteriores. Por esse motivo, as ligações dos perfis tubulares serão tratadas no presente trabalho.

Por simplificação não serão calculadas as soldas tanto para as ligações entre perfis W quanto para as ligações entre os perfis tubulares quadrados. Considerar-se-á que elas possuem um

correto dimensionamento seguindo as prescrições da ABNT NBR 8800:2008 e da ABNT NBR 16239:2013.

As diretrizes para o cálculo das ligações tubulares em perfis quadrados (perfis a serem utilizados neste trabalho) são apresentadas na ABNT NBR 16239:2013.

Serão consideradas ligações soldadas entre as barras da treliça e elas podem ser de dois tipos, com afastamento ou com sobreposição, conforme mostrado na Figura 3.5.

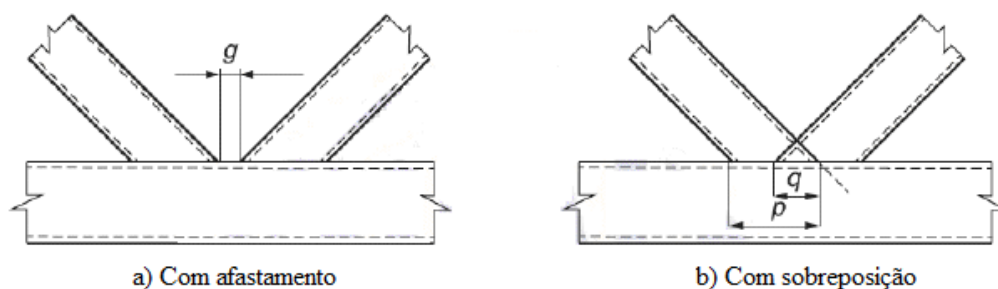


Figura 3.5: Ligações com afastamento e com sobreposição

Fonte: ABNT NBR 16239:2013, p.16

A ABNT NBR 16239:2013 cita alguns requisitos para a validação dos procedimentos de cálculo. Os requisitos pertinentes a este trabalho são apresentados abaixo:

- O ângulo formado entre o banzo e as diagonais e entre montantes e diagonais adjacentes (θ_i) não podem ser inferiores a 30° ;
- Nas ligações com afastamento, a dimensão g deve ser igual ou superior à soma das espessuras das diagonais ou montantes ligados, para garantir uma soldagem adequada;
- Nas ligações com sobreposição, a razão entre a sobreposição q e a dimensão p deve ser maior ou igual a 0,25. Essa restrição garante uma adequada transferência dos esforços de uma barra para outra;
- A espessura nominal da parede dos perfis tubulares não pode ser inferior a 2,5mm.

As ligações existente entre as diagonais e os banzos das Treliças Warren são do tipo K, podendo ser com afastamento ou sobreposição. Já as ligações entre montantes e banzos na Viga Vierendeel são do tipo T. Essas tipologias são apresentadas na Figura 3.6.

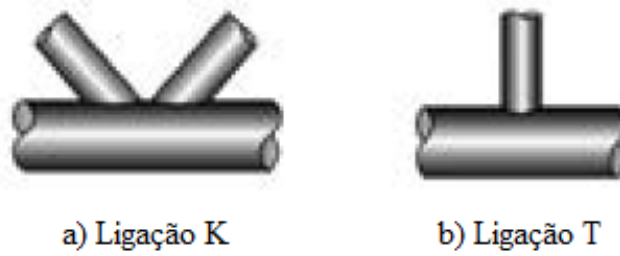


Figura 3.6: Tipologia das ligações

Fonte: Adaptado de ARAÚJO *et al.*, 2016, p.408

A capacidade resistente das ligações soldadas em sistemas treliçados com perfis tubulares é determinada com base nos modos de falha que a ligação pode apresentar. A ABNT NBR 16239:2013 cita seis modos de falha: A, B, C, D, E e F. Serão apresentados aqui apenas os modos A, B e E, que são os possíveis de ocorrer nas ligações que serão abordadas neste trabalho. A Figura 3.7 retrata os modos de falha.

Modo	Força Axial	Momento Fletor
A		
B		
E		

Figura 3.7: Modos de falha

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16239:2013, p.22

- Modo A: Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes;

- Modo B: Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes sob compressão;

- Modo E: Ruptura ou plastificação de diagonais ou montantes na região da solda oriunda da distribuição não uniforme de tensão.

3.5.3.6.1 Dimensionamento de ligações soldadas Tipo K

Para o dimensionamento das ligações soldadas com perfis tubulares quadrados devem ser atendidas as condições de validade apresentadas nas Tabelas C.1 e C.2 presentes no Anexo C. Obedecidas as condições, deve-se determinar se a ligação para a região nodal é com afastamento ou sobreposição. ARAÚJO *et al.* (2016) sugerem a formulação apresentada a seguir. Nela, deve-se impor o valor da excentricidade igual à zero, se o resultado para o afastamento g for positivo, então a ligação é com afastamento, se for negativo, com sobreposição.

$$g = \left(e + \frac{b_0}{2} \right) \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\text{sen}\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2} - \frac{b_1}{2\text{sen}\theta_1} - \frac{b_2}{2\text{sen}\theta_2}$$

Os valores de b_0 , b_1 , b_2 , θ_1 e θ_2 são apresentados na Figura 3.8.

Após a análise acima, a força axial resistente de cálculo $N_{i,Rd}$ é dada por:

- Modo de Falha A: Ligações K com afastamento

$$N_{1,Rd} = N_{2,Rd} = \frac{8,9\gamma^{0,5}k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right)}{\gamma_{a1}} \quad \text{para } \theta_1 = \theta_2$$

Determinação do parâmetro k_n :

$$\text{para } n < 0 \quad k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta} \quad \text{e para } n \geq 0 \quad k_n = 0,1$$

$$\text{onde: } \beta = \frac{2b_1 + 2b_2}{4b_0} \quad \text{e} \quad n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_{y0}}$$

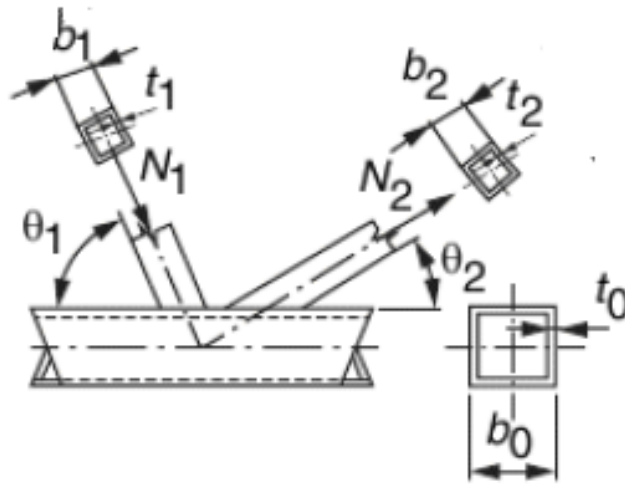


Figura 3.8: Simbologia da ligação tipo K com afastamento

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16239:2013, p.34

$\sigma_{0,Sd}$ é a máxima tensão de compressão solicitante de cálculo no banzo em um determinado nó causada pela força axial no banzo $N_{0,Sd}$ e pelo momento fletor no banzo $M_{0,Sd}$. Seu valor é considerado com sinal negativo para compressão e é dado pela fórmula abaixo:

$$\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0}$$

- Modo de falha E: Ligação com sobreposição

$$\bullet \text{ para } 25\% \leq \lambda_{ov} < 50\% \quad N_{1,Rd} = \frac{1,1f_{y1}t_1 \left(b_{ef} + b_{e,ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} (2h_1 - 4t_1) \right)}{\gamma_{a1}}$$

$$\bullet \text{ para } 50\% \leq \lambda_{ov} < 80\% \quad N_{1,Rd} = \frac{1,1f_{y1}t_1 (b_{ef} + b_{e,ov} + 2h_1 - 4t_1)}{\gamma_{a1}}$$

$$\bullet \text{ para } \lambda_{ov} \geq 80\% \quad N_{1,Rd} = \frac{1,1f_{y1}t_1 (b_1 + b_{e,ov} + 2h_1 - 4t_1)}{\gamma_{a1}}$$

O valor $N_{2,Rd}$ é dado por:

$$N_{2,Rd} = \left(\frac{A_2 f_{y2}}{A_1 f_{y1}} \right)$$

Determinação dos parâmetros λ_{0v} , b_{ef} e $b_{e,0v}$:

$$\lambda_{0v} = 100 \left(\frac{q}{p} \right)$$

$$b_{ef} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} b_1 \quad , \text{ mas } b_{ef} \leq b_1$$

$$b_{e,0v} = \frac{10}{b_2/t_2} \frac{f_{y2} t_2}{f_{y1} t_1} b_1 \quad , \text{ mas } b_{e,0v} \leq b_1$$

Os parâmetros geométricos são ilustrados na Figura 3.9.

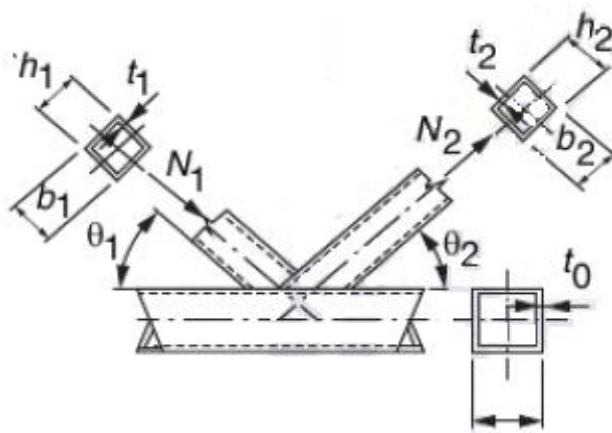


Figura 3.9: Simbologia da ligação tipo K com afastamento

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16239:2013, p.34

3.5.3.6.2 Dimensionamento de ligações soldadas Tipo T

Assim como para as ligações soldadas Tipo K, devem ser atendidas as condições de validade apresentadas nas Tabelas C.1 e C.2 presentes no Anexo C. Obedecidas as condições, a força axial resistente de cálculo $N_{1,Rd}$ e o momento fletor resistente de cálculo $M_{ip,1,Rd}$ podem ser calculados pelas formulações que serão apresentadas a seguir. Além disso, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{N_{1,Sd}}{N_{1,Rd}} + \frac{M_{ip,1,Sd}}{M_{ip,1,Rd}} \leq 1,0$$

O cálculo da força axial resistente de cálculo é feito segundo o modo de falha A.

- Modo de falha A: para $\beta \leq 0,85$

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{2\beta}{\text{sen}\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right)}{\gamma_{a1}}$$

Já o momento fletor resistente de cálculo deve ser tomado como o menor valor obtido entre os modos de falha A, B e E.

- Modo de falha A: para $\beta \leq 0,85$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{1,1 k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \left(\frac{1}{2n} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{n}{1-\beta} \right)}{\gamma_{a1}}$$

- Modo de falha B: para $0,85 \leq \beta \leq 1,0$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 f_{y0} t_0 (1,1 h_1 + 5,5 t_0)^2}{\gamma_{a1}}$$

- Modo de falha E: para $0,85 \leq \beta \leq 1,0$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{1,1 f_{y1} [z_1 - (1 - b_{ef}/b_1) b_1 h_1 t_1]}{\gamma_{a1}}$$

O cálculo de n , k_n e b_{ef} é feito de forma igual ao apresentado no item de dimensionamento de ligações Tipo K. Os parâmetros geométricos são apresentados na Figura 3.10. O valor de β é dado por:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}$$

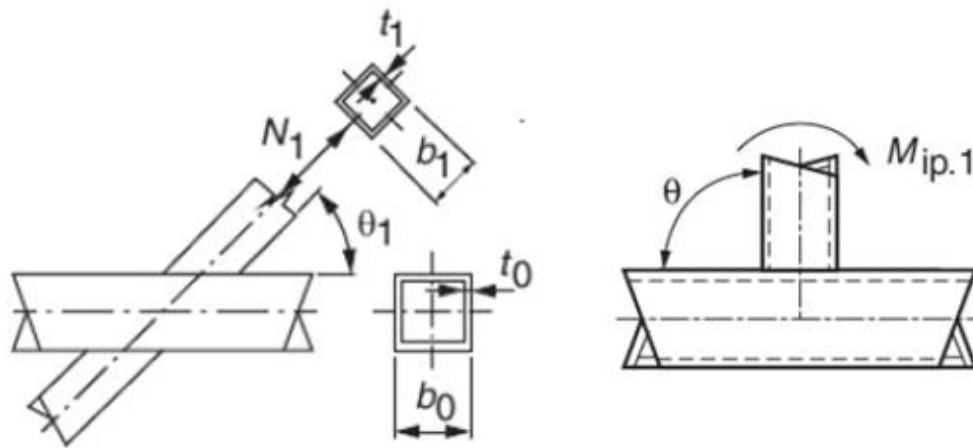


Figura 3.10: Simbologia da ligação Tipo T

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16239:2013, p.33

3.5.4 Análise estrutural

Análise estrutural é a obtenção das respostas da estrutura a uma combinação de ações por meio do estabelecimento de relações de equilíbrio (ARAÚJO *et al.*, 2016).

De modo geral, para a realização da análise estrutural, são empregados programas computacionais baseados em soluções numéricas. Por meio de uma interface gráfica é feito o lançamento estrutural e a visualização dos resultados. É o caso do *software* SAP2000 que será utilizado nesse trabalho para a realização da análise estrutural.

As estruturas, em geral, estão dispostas em três dimensões. Porém, para a realização da análise, é possível isolar partes da estrutura e estas podem ser analisadas separadamente adotando-se modelos planos. Sendo assim, a estrutura em três dimensões que corresponde a todo o sistema de cobertura (treliças, terças, telhas, etc.) será reduzida a um sistema bidimensional para a análise da viga de cobertura.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Apresentação do Projeto

Conforme apresentado, o objetivo do presente trabalho é fazer uma análise econômica de forma a verificar se o sistema misto de vigas de cobertura, proposto pela Vallourec, é realmente mais econômico que os sistemas tradicionais para vãos maiores que 30 metros.

Para tal, serão analisados três tipos de arranjos de vigas para cobertura. Um formado exclusivamente por Treliça Warren, outro formado puramente por Viga Vierendeel e o terceiro será um Sistema Misto em que os trechos extremos são formados por Treliça Warren e a região central por Viga Vierendeel. Além disso, para cada tipo de viga, a análise será feita com perfis tubulares quadrados da Vallourec e com perfis H tipo W da Gerdau. As três estruturas são apresentadas na Figura 4.1 e as relações com os vãos a serem analisados são mostrados na Tabela 4.1.

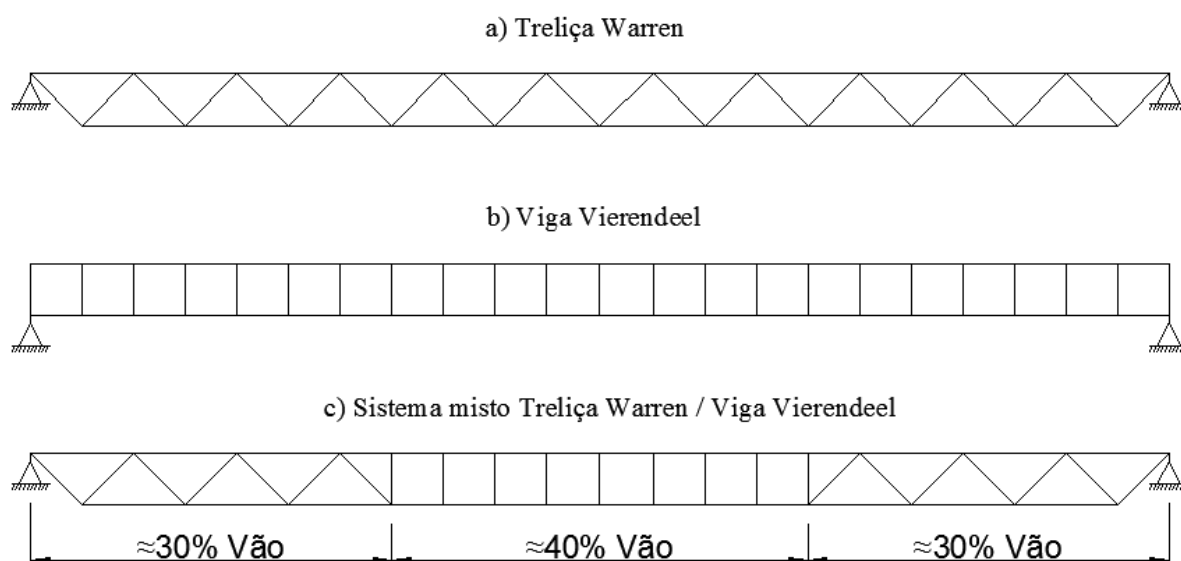


Figura 4.1: Sistemas estruturais

Na prática, os projetos possuem certa padronização, evita-se utilizar um grande número de seções, optando-se por utilizar a mesma seção em um certo trecho. Essas padronizações objetivam uma maior eficiência e rapidez de fabricação da estrutura, além de se obter uma simplificação das ligações. Porém, nesse trabalho, não serão feitas as padronizações. Cada barra será dimensionada para resistir aos seus esforços solicitantes.

Tabela 4.1: Estruturas a serem analisadas

Tipo de Estrutura	Perfil	Vãos (m)						
Treliça Warren	Perfil Tubular Quadrado da Vallourec	15	30	45	60	75	90	
	Perfil W da Gerdau	15	30	45	60	75	90	
Viga Vierendeel	Perfil Tubular Quadrado da Vallourec	15	30	45	60	75	90	
	Perfil W da Gerdau	15	30	45	60	75	90	
Sistema Misto	Perfil Tubular Quadrado da Vallourec	15	30	45	60	75	90	
	Perfil W da Gerdau	15	30	45	60	75	90	

Para as definições das geometrias do projeto serão adotadas as seguintes premissas:

- Simplificadamente será considerada inclinação nula;
- A altura da viga será sempre igual ao vão sobre 22;
- Na parte da Treliça Warren serão adotados ângulos de 45°;
- Na parte Vierendeel os painéis serão adotados como quadrados perfeitos;
- No sistema misto os trechos extremos, formados pela Treliça Warren, terão aproximadamente 30% do vão e a região central, composta por Viga Vierendeel, 40% do vão;
- Por suposição todos os nós superiores da viga se encontram travados contra deslocamento lateral;
- Será adotado um espaçamento de 8 metros entre tesouras paralelas.

Em relação ao carregamento aplicado na estrutura será considerado uma carga permanente (CP) de 0,40 kN/m² correspondente ao peso próprio da estrutura metálica (terças, telhas, etc.). Será considerada uma sobrecarga (SC) com valor de 0,25 kN/m². Os valores apresentados para carga permanente e sobrecarga são valores característicos e estão uniformemente distribuídos na cobertura. Por simplificação, supõe-se que não há predominância de sucção do vento.

Sabe-se que em treliças as articulações são tratadas como rotuladas, sendo as barras submetidas a esforços de tração ou compressão. Porém, por simplificação, neste trabalho todos os nós serão considerados engastados. Tal consideração é possível visto que o momento fletor e força cortante nas barras da treliça serão pequenos e, portanto, desprezíveis.

Cabe salientar que, para a análise das estruturas, este trabalho se dedica a apenas às verificações aos estados-limites últimos. Não serão feitas análises para o estado-limite de serviço.

4.2 Análise com o Uso do Software SAP2000

4.2.1 Apresentação do software SAP2000

Conforme já foi explicitado neste trabalho, o uso dos *softwares* e ferramentas computacionais são cada vez mais necessários para o desenvolvimento de um projeto estrutural. Para suprir essa necessidade, é oferecido pelo mercado de programação um amplo leque de programas, cada um com suas especificidades e usos mais adequados.

O *software* SAP2000, que será utilizado no desenvolvimento deste trabalho, atua na fase de análise estrutural e dimensionamento, oferecendo a partir do modelamento e carregamento da estrutura os resultados referentes aos esforços, deformações e adequação das seções utilizadas. Criado há mais de 30 anos pela empresa Computers and Structures, Inc. (CSI), o SAP2000, sofreu modificações e incrementos, não deixando de lado a tradição e a análise feita pelo método dos elementos finitos.

Para se analisar e processar uma estrutura utilizando o SAP2000, primeiramente deve ser selecionado o sistema de unidades que será adotado e qual será o modelo do elemento estrutural. Como opção, pode-se criar um modelo ou selecionar uma das opções já disponíveis como vigas, pórticos, tubos e placas, dentre outros. Em seguida é necessário editar a geometria do modelo inserindo as coordenadas relevantes do sistema nos eixos X, Y e Z, chamado de *grid*. Como resultado, para este trabalho, é gerada uma geometria semelhante à da Figura 4.2.



Figura 4.2: Exemplo de *grid* gerado com a introdução das coordenadas

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

Para o caso em estudo, após a definição da geometria deve ser definido o material que irá compor o elemento estrutural e as propriedades das seções. Para a definição do material

devem ser informados alguns dados como o seu peso específico, módulo de elasticidade, resistência ao escoamento, à ruptura e alguns outros parâmetros que são gerados por *default* do programa. Já como propriedades das seções devem ser informados o tipo da seção, o material constituinte e as características geométricas que as definem. Para isso foram criadas planilhas no *software* Excel contendo todos os dados necessários relativos às seções Tubulares Quadradas (TQ), disponíveis no catálogo da Vallourec, e os dados relativos às seções H tipo W, disponíveis no catálogo da Gerdau. Essa planilha foi exportada para o *software* SAP2000 e nele foram criados grupos para seleção automática dos perfis, o grupo TQ, contendo todos os perfis tubulares quadrados e o grupo W, contendo as seções H. A Figura 4.3 exemplifica como são feitas essas definições.

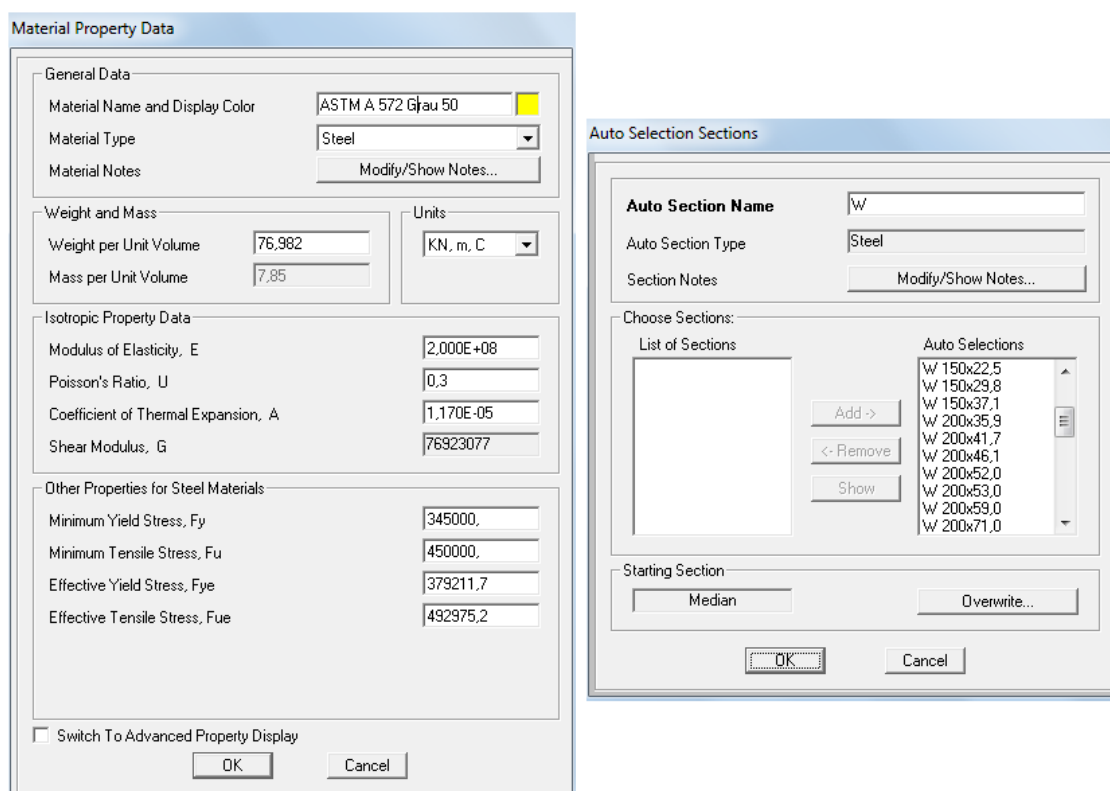


Figura 4.3: Exemplo da definição do material e da criação do grupo de seções

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

A próxima etapa consiste em traçar a geometria da estrutura e inserir o carregamento aplicado nos nós. A Figura 4.4 mostra, como exemplo, o traçado para a estrutura em Treliça Warren com vão de 15m.

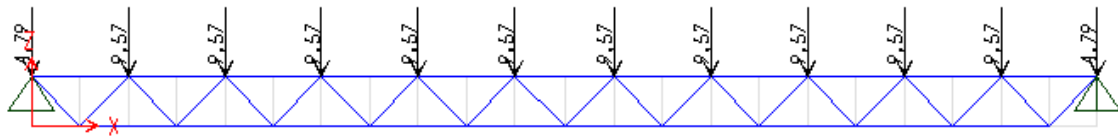


Figura 4.4: Geometria e carregamento (kN) para Treliça Warren com vão de 15 metros

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

As normas da ABNT não estão incluídas no software SAP2000, sendo assim, para a utilização do recurso *Steel Checking*, que permite a verificação automática da segurança estrutural, foram adotadas normas equivalentes. Para o estudo das estruturas em perfil tubular quadrado foi adotada a norma canadense CAN/CSA-S16-01, que é equivalente à ABNT NBR 16239:2013, tomando o cuidado de especificar o valor do coeficiente de flambagem. Já para o estudo das estruturas em perfil W utilizou-se a norma norte americana AISC360-05/IBC2006 cuja curva de flambagem na compressão é a mesma da ABNT NBR 8800:2008.

Por meio de um processo iterativo utilizou-se o recurso *Steel Checking*, de forma a se chegar ao ponto em que o perfil calculado, apresentado na parte superior da barra na Figura 4.5, coincidissem com o perfil necessário, apresentado na parte inferior. Além disso, o recurso possibilita ver o coeficiente de aproveitamento das barras, resultante da análise estrutural, valor que pode ser visto na parte inferior das barras, conforme apresentado na Figura 4.6. Para as barras em conformidade com as verificações impostas pelas normas o coeficiente varia de 0 a 1, valores superiores a 1 indicam que alguma das exigências da norma não foi atendida.

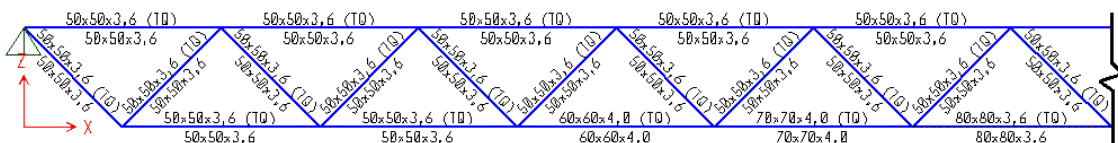


Figura 4.5: Análise iterativa do perfil a ser adotado

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

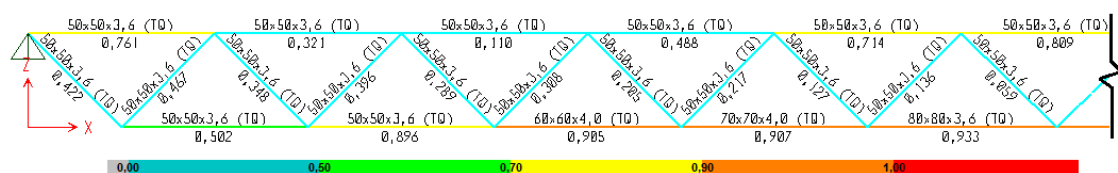


Figura 4.6: Coeficiente de aproveitamento das barras

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

Uma vez obtido o dimensionamento final da estrutura é possível gerar tabelas que mostram o consumo total de aço da estrutura e também a quantidade de peças, peso e comprimento de cada perfil utilizado.

4.2.2 Carregamento a ser aplicado

Para o dimensionamento serão feitas as verificações aos estados-limites últimos, assim, os cálculos devem ser realizados em função da combinação última de ações, seguindo a equação abaixo:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k})$$

Para a carga permanente e sobrecarga serão adotados os valores anteriormente apresentados de 0,40 kN/m² e 0,25 kN/m², respectivamente. Os coeficientes de ponderação das ações (γ_g e γ_q) são retirados da Tabela A.1 do Anexo A e corresponde a 1,25 para a carga permanente e 1,5 para a sobrecarga. O peso próprio da estrutura é calculado automaticamente pelo *software* SAP2000 e será, também, majorado por 1,25 por se tratar de carga permanente. A carga de cálculo atuante na estrutura, excetuando-se o peso próprio, será:

$$F_d = 1,25 * 0,40 + 1,5 * 0,25 = 0,88 \text{ kN/m}^2$$

Uma vez que o espaçamento entre duas tesouras paralelas é de 8,00 metros irá atuar na viga de cobertura uma carga linear no valor de:

$$q_d = F_d * l = 0,88 * 8,00 = 7,04 \text{ kN/m}$$

No *software* SAP2000 serão inseridas cargas nodais, com seus os valores calculados por região de influência a partir da carga linear apresentada. Os valores calculados para as cargas nodais são apresentados na Tabela 4.2 e, a identificação dos pontos de aplicação das cargas, na Figura 4.7. Vale salientar que as cargas são aplicadas apenas nos nós superiores.

Tabela 4.2: Carregamento aplicado nos nós superiores da estrutura

Vão	Carregamento Aplicado (kN) - Pontos:			
	1	2	3	4
15 metros	2,39	4,79	7,18	9,57
30 metros	4,79	9,57	14,36	19,15
45 metros	7,22	14,43	21,65	28,86
60 metros	9,61	19,22	28,83	38,44
75 metros	12,00	24,01	36,01	48,01
90 metros	14,40	28,79	43,19	57,59

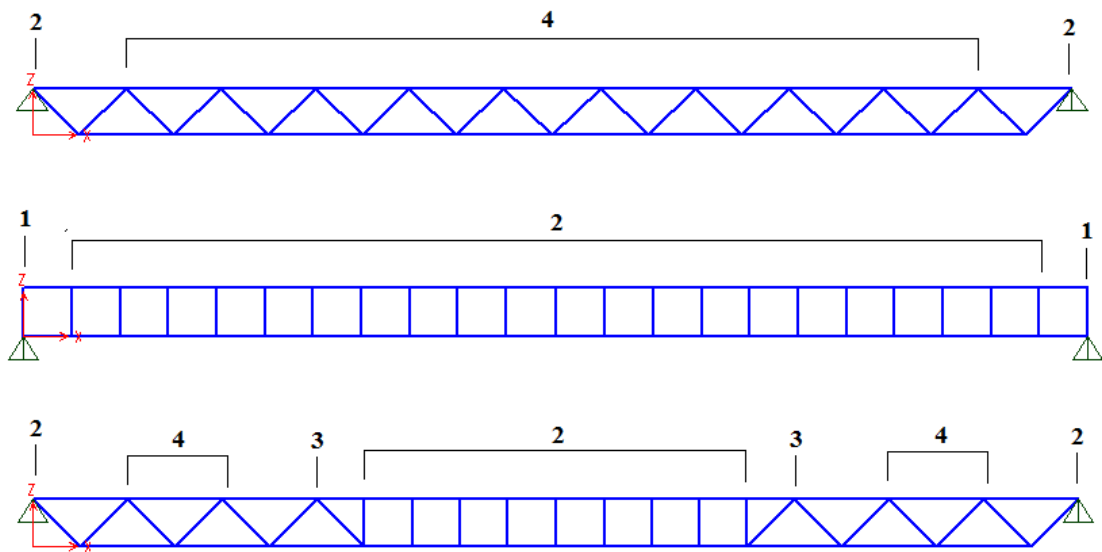


Figura 4.7: Identificação dos pontos de aplicação das cargas nodais

4.2.3 Geometria

No software SAP2000 a geometria da estrutura é inserida a partir da definição do *grid* que, como já foi dito, é uma malha que marca nos eixos X, Y e Z os pontos importantes da estrutura. Os três sistemas estruturais podem ser desenhados com base em um mesmo *grid* e terão a geometria que foi apresentada na Figura 4.1.

A estrutura é inserida no plano XZ. No eixo Z tem-se a coordenada 0 (zero) e o segundo ponto coordenado corresponde à altura da viga, dada pela expressão $vão/22$. As alturas adotadas estão na Tabela 4.3. Já para o eixo X tem-se as coordenadas apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.3: Altura das vigas

Vão	Altura (m)
15 metros	0,68
30 metros	1,36
45 metros	2,05
60 metros	2,73
75 metros	3,41
90 metros	4,09

Tabela 4.4: Coordenadas para o grid no eixo X

Coordenadas do Grid - Eixo X (m)					
Vão					
15 m	30 m	45 m	60 m	75 m	90 m
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,68	1,36	2,05	2,73	3,41	4,09
1,36	2,72	4,10	5,46	6,82	8,18
2,04	4,08	6,15	8,19	10,23	12,27
2,72	5,44	8,20	10,92	13,64	16,36
3,40	6,80	10,25	13,65	17,05	20,45
4,08	8,16	12,30	16,38	20,46	24,54
4,76	9,52	14,35	19,11	23,87	28,63
5,44	10,88	16,40	21,84	27,28	32,72
6,12	12,24	18,45	24,57	30,69	36,81
6,80	13,60	20,50	27,30	34,10	40,90
7,50	15,00	22,50	30,00	37,50	45,00
8,20	16,40	24,50	32,70	40,90	49,10
8,88	17,76	26,55	35,43	44,31	53,19
9,56	19,12	28,60	38,16	47,72	57,28
10,24	20,48	30,65	40,89	51,13	61,37
10,92	21,84	32,70	43,62	54,54	65,46
11,60	23,20	34,75	46,35	57,95	69,55
12,28	24,56	36,80	49,08	61,36	73,64
12,96	25,92	38,85	51,81	64,77	77,73
13,64	27,28	40,90	54,54	68,18	81,82
14,32	28,64	42,95	57,27	71,59	85,91
15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00

4.2.4 Análise para perfis H tipo W da Gerdau

Serão considerados perfis H tipo W fabricados em aço ASTM A 572 Grau 50, com resistência ao escoamento mínima de 345 MPa e resistência à ruptura mínima de 450 MPa.

Em relação ao coeficiente de flambagem será adotado, a favor da segurança, o valor de 1 ($k=1$) para todas as barras.

De posse das propriedades da seção transversal das barras, o *software* SAP2000, faz as verificações ao esforço axial, momento fletor e força cortante. Além disso, ele realiza a combinação dos esforços solicitantes, que nada mais é que o valor retornado por ele como o coeficiente de aproveitamento da barra. É possível ver a verificação de cada barra ao clicar nela, com um exemplo mostrado na Figura 4.8. A parte superior apresenta as características do elemento estrutural e as propriedades geométricas da seção adotada. Em seguida são apresentados os dados referentes à análise estrutural, apresentando os esforços solicitantes e os resistentes, bem como a combinação dos esforços. Apesar de não estar explícito, o programa também faz a verificação em relação a limitação do índice de esbeltez. Caso essa limitação não seja atendida, aparece um alerta em vermelho na janela de análise apresentada na Figura 4.8.

O peso obtido para as estruturas nos seis vãos e para os três modelos estruturais são apresentados na Tabela 4.5. O Apêndice A apresenta uma tabela contendo os perfis utilizados em cada um dos casos com o respectivo comprimento e peso. Além disso, o Apêndice A também apresenta a saída gráfica do SAP2000 com a convergência dos perfis e o coeficiente de aproveitamento.

Tabela 4.5: Peso das estruturas utilizando perfis W

Vão	Peso da Estrutura (kN) - Perfil W		
	Treliça Warren	Viga Vierendeel	Sistema Misto
15 metros	10,784	9,878	10,437
30 metros	21,567	22,289	20,874
45 metros	33,570	47,755	34,301
60 metros	54,536	93,838	52,975
75 metros	83,921	157,206	83,136
90 metros	118,674	231,659	123,923

Steel Stress Check Data AISC360-05/IBC2006							
AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)							
Units : KN, m, C							
Frame : 14	X Mid: 12,300	Combo: COMB CP+SC+PP	Design Type: Beam				
Length: 4,100	Y Mid: 0,000	Shape: W 150x22,5	Frame Type: Special Moment Frame				
Loc : 3,644	Z Mid: 0,000	Class: Non-Compact	Princpl Rot: 0,000 degrees				
Provision: LRFD	Analysis: Direct Analysis		Reduction: Tau-b Fixed				
D/C Limit=0,950	2nd Order: General 2nd Order		EA Factor=0,800 EI Factor=0,800				
AlphaPr/Py=0,808	AlphaPr/Pe=1,727	Tau_b=1,000					
PhiB=0,900	PhiC=0,900	PhiTY=0,900	PhiTF=0,750				
PhiS=0,900	PhiS-RI=1,000	PhiST=0,900					
A=0,003	I33=1,190E-05	r33=0,065	S33=1,566E-04	Av3=0,002			
J=0,000	I22=3,865E-06	r22=0,037	S22=5,086E-05	Av2=8,816E-04			
E=200000000,0	fy=345000,000	Ry=1,099	Z33=1,738E-04	Cw=0,000			
RLLF=1,000	Fu=450000,000		Z22=7,741E-05				
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo COMB CP+SC+PP)							
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu	
3,644	783,666	2,454	0,000	0,032	0,000	0,000	
PHM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1a)							
D/C Ratio: 0,941 = 0,898 + 0,043 + 0,000							
= (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)							
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1a)							
Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm	
Major Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Minor Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
LTB	Lltb	Kltb	Cb				
	1,000	1,000	1,869				
Axial	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity				
	783,666	356,891	872,952				
Major Moment	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB				
	2,454	50,755	50,755				
Minor Moment	0,000	21,944					
SHEAR CHECK							
Major Shear	Uu Force	phi*Un Capacity	Stress Ratio	Status Check			
	0,032	164,242	0,000	OK			
Minor Shear	0,000	373,792	0,000	OK			
CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS							
Major (U2)	UHajor Left	UHajor Right					
	0,954	0,155					

Figura 4.8: Janela de verificação estrutural dos elementos

Fonte: SAP2000 – Elaborada pela autora

4.2.5 Análise para perfis tubulares quadrados da Vallourec

Os perfis tubulares quadrados (TQ) da Vallourec são fabricados em aço VMB 350, com resistência ao escoamento mínima de 350 MPa e resistência à ruptura mínima de 485 MPa. Porém, para uma análise comparativa, e, estando a favor da segurança, serão considerados para as resistências os mesmos valores da análise com perfis W da Gerdau, ou seja: $f_y = 350$ MPa e $f_u = 450$ MPa.

Em relação ao coeficiente de flambagem, seguindo as orientações da ABNT NBR 16239:2013, o correto seria tomar $K = 0,9$ para $\beta > 0,60$ e $K = 0,75$ para $\beta \leq 0,60$, sendo β dado pela relação entre a dimensão externa da diagonal ou montante e o banzo. Porém, como

cada barra pode possuir um perfil e a determinação deste é feita por um processo iterativo, seria inviável modificar o coeficiente para cada barra. Sendo assim, adotou-se $K=0,9$ para todas as barras, valor este que se encontra a favor da segurança.

Da mesma forma que para a seção em perfil W, o SAP2000 faz as mesmas verificações e gera o coeficiente de aproveitamento e janelas para verificação barra a barra.

O peso obtido para as estruturas nos seis vãos e para os três modelos estruturais são apresentados na Tabela 4.6. O Apêndice B apresenta uma tabela contendo os perfis utilizados em cada um dos casos com o respectivo comprimento e peso. Além disso, o Apêndice B também apresenta a saída gráfica do SAP2000 com a convergência dos perfis e o coeficiente de aproveitamento.

Tabela 4.6: Peso das estruturas utilizando perfis TQ

Vão	Peso da Estrutura (kN) - Perfil TQ		
	Treliça Warren	Viga Vierendeel	Sistema Misto
15 metros	2,784	4,200	2,886
30 metros	8,089	19,092	9,647
45 metros	18,119	48,086	22,929
60 metros	34,023	93,673	42,919
75 metros	54,711	169,793	70,061
90 metros	81,608	286,343	108,223

* Em algumas barras da Viga Vierendeel, para o vão de 90m, o dimensionamento não passou, mesmo com o maior perfil tabelado.

4.3 Cálculo das Ligações

Conforme já foi dito, nas ligações de perfis tubulares, além da verificação e dimensionamento das soldas, devem ser feitas verificações adicionais e estas podem resultar em uma mudança do perfil calculado para as verificações aos estados-limites últimos.

Como neste trabalho não foi feita a padronização dos perfis seria inviável verificar todas as ligações, uma vez que cada elemento da estrutura pode possuir um perfil diferente, o que resultaria em um número muito alto de regiões nodais a serem analisadas. Sendo assim, apenas a título de exemplificação, serão feitas as verificações para algumas regiões nodais. A Figura 4.9 apresenta as regiões nodais 1 e 2 resultante da análise para o Sistema Misto com o vão de 15 metros. A região nodal 1 é uma ligação soldada Tipo K, já a região 2 Tipo T.

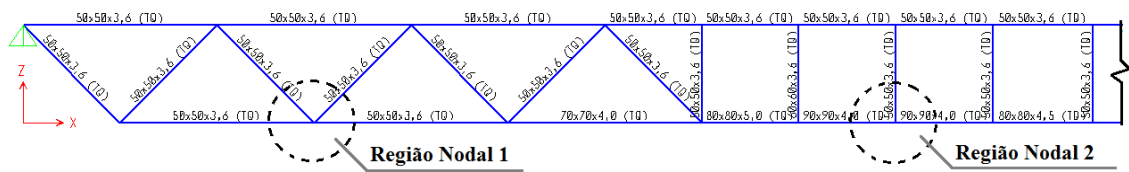


Figura 4.9: Regiões nodais 1 e 2 para o Sistema Misto com vão de 15m

Fonte: SAP2000, adaptado pela autora

4.3.1 Verificação da ligação Tipo K:

Tanto as diagonais, quanto o banzo possuem o mesmo perfil TQ 50x50x3,6. Os esforços solicitantes de cálculo retirados do software SAP2000 são os seguintes:

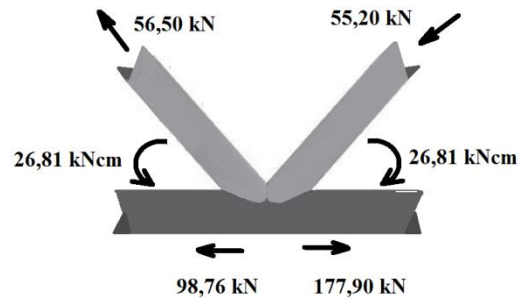
$$N_{0p} = 98,76 \text{ kN (tração);}$$

$$N_0 = 177,90 \text{ kN (tração);}$$

$$N_1 = 56,50 \text{ kN (tração);}$$

$$N_2 = 55,20 \text{ kN (compressão);}$$

$$M_0 = 26,81 \text{ kNcm.}$$



a) Verificar se é ligação com afastamento ou sobreposição:

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\text{sen}\theta_1 \times \text{sen}\theta_2} - \left(\frac{h_1}{2\text{sen}\theta_1} + \frac{h_2}{2\text{sen}\theta_2} \right)$$

$$g = \left(0 + \frac{50}{2} \right) \frac{\text{sen}(45^\circ + 45^\circ)}{\text{sen}45^\circ \times \text{sen}45^\circ} - \left(\frac{50}{2\text{sen}45^\circ} + \frac{50}{2\text{sen}45^\circ} \right) = -20,71 \text{ mm}$$

O valor de g negativo indica que a ligação do tipo K está com sobreposição.

b) Verificação das validações geométricas:

- Verificação de ângulos mínimos de diagonais:

$$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ \geq 30^\circ \text{ OK!}$$

- Verificação de espessuras mínimas dos perfis:

$$t_0 = t_1 = t_2 = 3,6\text{mm} \geq 2,5\text{mm} \text{ OK!}$$

- Verificação de suficiência de sobreposição mínima de 25%:

$$p = \frac{h_i}{\text{sen}\theta_i} = \frac{50}{\text{sen}45^\circ} = 70,71\text{mm}$$

$$-g \geq 0,25p \rightarrow 20,71 \geq 0,25 \times 70,71 = 17,68 \text{ OK!}$$

$$\lambda_{ov} = 100 \frac{-g}{p} = 100 \frac{20,71}{70,71} = 29,29\% \geq 25\% \text{ OK!}$$

- Verificação de relações geométricas:

Diagonal 1 – Tractionada

$$\frac{b_2}{t_2} \leq 35 \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 35 \text{ OK!}$$

$$\frac{h_2}{t_2} \leq 35 \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 35 \text{ OK!}$$

Diagonal 2 – Comprimida

$$\frac{b_1}{t_1} \leq 1,10 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 1,10 \left(\frac{20000}{34,5} \right)^{\frac{1}{2}} = 26,48 \text{ OK!}$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 1,10 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 1,10 \left(\frac{20000}{34,5} \right)^{\frac{1}{2}} = 26,48 \text{ OK!}$$

c) Verificação dos modos de falha da ligação

O modo E é o único modo de falha pertinente para ligação do tipo K, com sobreposição e banzo e diagonais em perfil tubulares quadrados. Para $25\% \leq \lambda_{ov} \leq 50\%$ tem-se:

$$N_{1,Rd} = \frac{1,1 f_{y1} t_1 \left(b_{ef} + b_{e,ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} (2h_1 - 4t_1) \right)}{\gamma_{a1}}$$

$$b_{ef} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} b_1 = \frac{10}{50/3,6} \frac{0,345 \times 3,6}{0,345 \times 3,6} 50 = 36,00 \text{ mm} \leq b_1 = 50 \text{ mm}$$

$$b_{e,ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \frac{f_{y2} t_2}{f_{y1} t_1} b_1 = \frac{10}{50/3,6} \frac{0,345 \times 3,6}{0,345 \times 3,6} 50 = 36,00 \text{ mm} \leq b_1 = 50 \text{ mm}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1,1 \times 0,345 \times 3,6 \left(36 + 36 + \frac{29,29}{50} (2 \times 50 - 4 \times 3,6) \right)}{1,1} = 166,87 \text{ kN}$$

Como $\theta_1 = \theta_2$, tem-se: $N_{1,Rd} = N_{2,Rd} = 166,87 \text{ kN}$

Diagonal 1: Força de tração $N_{1,Sd} = 56,50 \text{ kN} \leq N_{1,Rd} = 166,87 \text{ kN}$ OK!

Diagonal 2: Força de compressão $N_{2,Sd} = 55,20 \text{ kN} \leq N_{2,Rd} = 166,87 \text{ kN}$ OK!

4.3.2 Verificação da Ligação Tipo T:

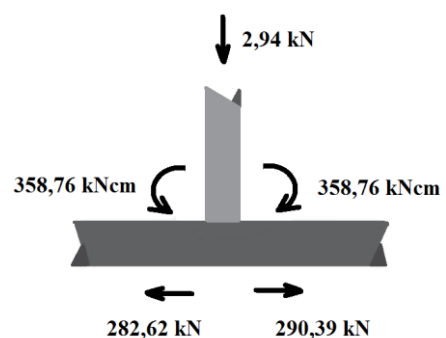
Tanto as diagonais, quanto o banzo possuem o mesmo perfil TQ 50x50x3,6. Os esforços solicitantes de cálculo retirados do *software* SAP2000 são os seguintes:

$N_{0p} = 282,62 \text{ kN}$ (tração);

$N_0 = 290,39 \text{ kN}$ (tração);

$N_1 = 2,94 \text{ kN}$ (compressão);

$M_0 = 358,76 \text{ kNcm}$.



a) Verificação das validações geométricas:

- Verificação de espessuras mínimas dos perfis:

$$t_0 = t_1 = 3,6 \text{ mm} \geq 2,5 \text{ mm} \text{ OK!}$$

- Verificação de relações geométricas:

Montante – Tracionado

$$\frac{b_1}{t_1} \leq 35 \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 35 \text{ OK!}$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 35 \rightarrow \frac{50}{3,6} = 13,89 \leq 35 \text{ OK!}$$

Condições adicionais:

$$\frac{b_1}{b_0} \leq 0,85 \rightarrow \frac{50}{90} = 0,56 \leq 0,85 \text{ OK!}$$

$$\frac{b_0}{t_0} \geq 10 \rightarrow \frac{90}{4,0} = 22,50 \geq 10 \text{ OK!}$$

b) Verificação dos modos de falha da ligação

Para a determinação do modo de falha deve-se calcular o valor de β que é dado por:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{50}{90} = 0,56$$

Uma vez que $\beta \leq 0,85$, o modo de falha para o cálculo da força axial resistente de cálculo e para a determinação do momento fletor resistente de cálculo é o modo de falha A. Sendo assim:

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{2\beta}{\text{sen}\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right)}{\gamma_{a1}}$$

$$\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0} = \frac{290,39}{13,1} + \frac{358,76}{36} = 32,13 \text{ kN/cm}^2$$

$$n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_{y0}} = \frac{32,13}{34,5} = 0,93, \quad n \geq 0 \quad \therefore \quad k_n = 1,0$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1,0 \times 34,5 \times 0,4^2}{(1 - 0,56) \sin 90^\circ} \left(\frac{2 \times 0,56}{\sin 90^\circ} + 4\sqrt{1 - 0,56} \right) = 43,03 \text{ kN}$$

Montante: Força de compressão $N_{1,Sd} = 2,94 \text{ kN} \leq N_{1,Rd} = 44,03 \text{ kN}$ OK!

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{1,1 k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \left(\frac{1}{2n} + \frac{2}{\sqrt{1 - \beta}} + \frac{n}{1 - \beta} \right)}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{ip,1,Rd} = 1,1 \times 1,0 \times 34,5 \times 4,0^2 \times 50 \left(\frac{1}{2 \times 0,93} + \frac{2}{\sqrt{1 - 0,56}} + \frac{0,93}{1 - 0,56} \right) / 1,1$$

$$M_{ip,1,Rd} = 172031 \text{ kNcm}$$

Montante: Momento $M_{ip,1,Sd} = 358,76 \text{ kNcm} \leq M_{ip,1,Rd} = 172031 \text{ kNcm}$

Combinação:

$$\frac{N_{1,Sd}}{N_{1,Rd}} + \frac{M_{ip,1,Sd}}{M_{ip,1,Rd}} = \frac{2,94}{44,03} + \frac{358,76}{172031} = 0,07 \leq 1,0$$

Pelas análises acima, é possível perceber que as diagonais e os montantes passam nas verificações. Sendo assim, não é necessário alterar as seções. Caso não passasse, deveriam ser feitos novos cálculos para uma seção maior.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, serão apresentados, de forma compacta e sistematizada, os resultados das análises dos itens anteriores, bem como discussões a eles referentes.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 apresentadas a seguir, foram incluídas, para facilidade de comparação, as diferenças efetivas e as diferenças em percentual, para os valores encontrados para Viga Vierendeel e para o Sistema Misto em comparação com os valores da Treliça Warren. A escolha por comparar com a Treliça Warren se deve ao fato dela ser o sistema mais convencional e também o mais utilizado.

Tabela 5.1: Comparação dos resultados para o Perfil W

Vão	Peso da Estrutura - Perfil W					
	Treliça Warren Peso (kN)	Viga Vierendeel (kN)		Sistema Misto		
		Peso (kN)	Diferença (kN / %)	Peso (kN)	Diferença (kN / %)	
15 m	10,784	9,878	-0,906 / -8,40	10,437	-0,347 / -3,22	
30 m	21,567	22,289	0,722 / 3,35	20,874	-0,693 / -3,21	
45 m	33,57	47,755	14,185 / 42,25	34,301	0,731 / 2,18	
60 m	54,536	93,838	39,302 / 72,07	52,975	-1,561 / -2,86	
75 m	83,921	157,206	73,285 / 87,33	83,136	-0,785 / -0,94	
90 m	118,674	231,659	112,985 / 95,21	123,923	5,249 / 4,42	

Tabela 5.2: Comparação dos resultados para o Perfil TQ

Vão	Peso da Estrutura - Perfil TQ					
	Treliça Warren Peso (kN)	Viga Vierendeel (kN)		Sistema Misto		
		Peso (kN)	Diferença (kN / %)	Peso (kN)	Diferença (kN / %)	
15 m	2,784	4,2	1,416 / 50,86	2,886	0,102 / 3,66	
30 m	8,089	19,092	11,003 / 136,02	9,647	1,558 / 19,26	
45 m	18,119	48,086	29,967 / 165,39	22,929	4,81 / 26,55	
60 m	34,023	93,673	59,65 / 175,32	42,919	8,896 / 26,15	
75 m	54,711	169,793	115,082 / 210,35	70,061	15,35 / 28,06	
90 m	81,608	286,343	204,735 / 250,88	108,223	26,615 / 32,61	

Uma relação a ser levada em conta na análise dos resultados é o somatório do comprimento das barras. Para as estruturas em Viga Vierendeel esse somatório é 8,40% menor que o da Treliça Warren. Já para o Sistema Misto, é 3,22% menor.

Analisando as tabelas, observa-se que entre os três sistemas a Viga Vierendeel é o que apresenta os piores resultados. Apesar de o seu comprimento total ser menor, seu peso destoa muito do encontrado para Treliça Warren, chegando a ser quase 100% maior para o vão de 90m na estrutura com perfil W e 250% maior, para o mesmo vão, na estrutura em perfil TQ. Esse sistema se apresentou mais vantajoso apenas para o vão de 15m com perfil W, isso se deve ao fato de que, para esse vão, nos três tipos de estruturas o menor perfil tabelado foi suficiente para resistir aos esforços solicitantes, podendo-se observar que a diferença em percentual é exatamente igual à diferença entre o somatório do comprimento das barras da estrutura. O principal fator para o grande aumento de peso na estrutura Viga Vierendeel se deve à forma como a estrutura é solicitada. Na Treliça Warren, os esforços de tração e compressão são os esforços determinantes para a escolha do perfil, uma vez que os momentos fletores e esforço cortante são mínimos, já na Viga Vierendeel, essa situação se inverte, os momentos são expressivos e são eles que definem o dimensionamento da estrutura.

Em relação ao Sistema Misto, constata-se que ao compará-lo com a Treliça Warren, utilizando perfil tipo W da Gerdau, as diferenças foram mínimas, podendo-se dizer que os resultados foram equivalentes. Isso se deve ao fato de os perfis de seção H apresentarem boa resistência à flexão. O mesmo não ocorreu quando se compara a estrutura em perfil TQ.

Conforme visto na Revisão Bibliográfica, na flexão simples, quando $\lambda \leq \lambda_p$ o momento resistente característico (M_{Rk}) é dado por $M_{Rk} = M_{pl} = Z f_y$. Sendo assim, o momento fletor resistente está diretamente relacionado com o módulo de resistência plástico, Z . Para as seções H esse módulo apresenta valores elevados, a título de exemplo a menor seção tabelada apresenta $Z_x = 179,6 \text{ cm}^3$ e uma área de $29,0 \text{ cm}^2$. Por isso, apesar de nos trechos em Vierendeel do Sistema Misto o momento fletor apresentar valores mais altos, ainda assim esses valores são baixos quando comparado com o momento fletor resistente da seção necessária para resistir ao esforço axial, resistência esta que é diretamente relacionada à área da seção. Dessa forma o esforço axial é determinante para o dimensionamento, por isso a pequena diferença encontrada entre o Sistema Misto e a Treliça Warren para perfil W, uma vez que para essas duas estruturas esses esforços são bem próximos.

Já para os perfis TQ, a Vallourec disponibiliza uma grande variedade de seções, a menor delas, TQ 50x50x3,6, apresenta $Z_x = 10,8 \text{ cm}^3$ e uma área de $6,41 \text{ cm}^2$. O módulo de resistência plástico é igualado ao da menor seção em perfil H na seção 120x120x12,5 que

possui uma área de 52,4 cm², 80% maior que aquela do perfil H. Com isso, na região central do Sistema Misto, que apresenta estrutura em Vierendeel, os momentos são maiores e a relação M_{Sd}/M_{Rd} passa a ser expressiva na formulação para a combinação dos esforços solicitantes. Dessa forma tanto os esforços axiais quanto o momento fletor contribuem de forma significativa para a determinação do perfil nessa região. Por isso, a estrutura do Sistema Misto demanda perfis mais pesados e, à medida que o vão aumenta, a diferença entre a área do perfil utilizado na região em Vierendeel e a área do perfil utilizado na mesma região para Treliça Warren aumenta, a isso se deve á crescente diferença em percentual a medida em que se aumenta o vão.

A Vallourec destaca que um dos pontos para a redução do custo do sistema PREON box é a redução do peso total da estrutura. Sendo assim, esperava-se encontrar um peso total menor para as estruturas do Sistema Misto quando comparado com a Treliça Warren ao se utilizar perfil TQ, perfil este que é compatível com as seções MSH citadas pela Vallourec, que são seções tubulares quadradas de perfil laminado a quente. Porém observa-se que os resultados foram contrários ao esperado.

Essa divergência entre o resultado esperado e o resultado encontrado pode ser decorrente de diversos fatores. Para a realização deste trabalho algumas premissas iniciais tiveram que ser adotadas, tais como a definição do ângulo das diagonais, a consideração da parte Vierendeel como quadrados perfeitos, a definição da altura da viga e a determinação das porcentagens dos vãos que seriam em Treliça Warren e em Viga Vierendeel. Tudo isso pode ter interferido nos resultados, pois foram considerados valores fixos, ao passo que o sistema PREON box conta com um *software* totalmente interativo que determina todos esses parâmetros de forma a se chegar em uma solução otimizada. Como exemplo, o sistema PREON box prevê espaçamentos diferentes entre os montantes da parte Vierendeel, obtendo-se montantes mais próximos nas extremidades dessa região, que é mais solicitada ao momento fletor, e mais afastados na região central, conforme se vê na Figura 5.1.

Além disso, a redução de custos que torna o sistema PREON box mais viável economicamente é uma redução global. O sistema engloba toda a cadeia produtiva, desde o projeto estrutural, passando pela fabricação das peças, montagem e execução da obra. Sendo assim, o software possui uma ferramenta de avaliação de custos em que considera o preço real dos perfis (que pode variar de acordo com a disponibilidade), os custos de execução das

ligações, revestimento ou pintura e montagem. Com isso, a solução mais econômica poderá não necessariamente ser a de menor peso.

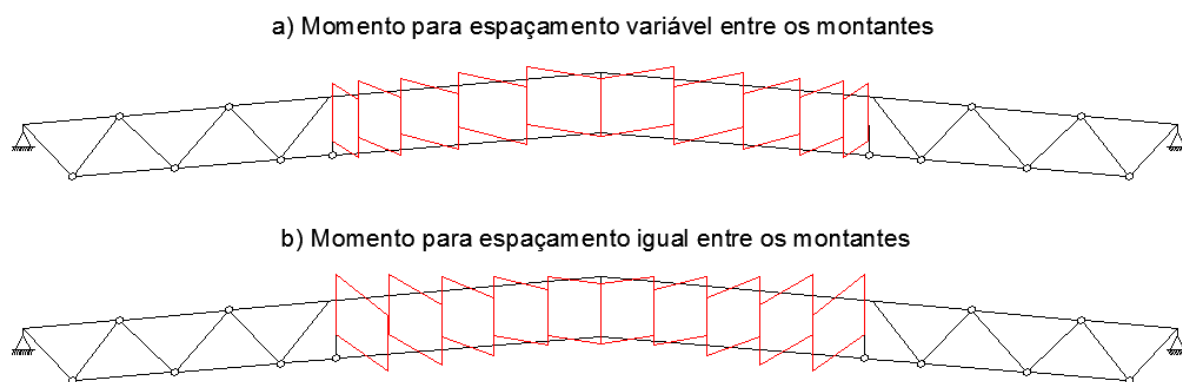


Figura 5.1: Distribuição do momento fletor de acordo com o espaçamento entre os montantes

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito um estudo de vigas de cobertura em perfil tubular quadrado e perfil H laminado. Propunha-se com este estudo analisar economicamente qual sistema para viga de cobertura seria mais econômico, analisando-se para isso o peso total das barras encontrado para as diferentes formas de estrutura. O princípio norteador do trabalho foi o novo sistema proposto pela Vallourec, PREON box, que associa Treliça Warren com Viga Vierendeel utilizando-se perfis tubulares quadrados. Segundo a empresa, esse sistema se mostra mais vantajoso para vãos maiores que trinta metros e proporciona uma redução de até 20% em material. Dessa forma, esperava-se encontrar resultados condizentes com o proposto pela Vallourec, porém, analisando-se apenas o peso total das barras da estrutura, não foi o que aconteceu.

Em relação ao Sistema Misto, semelhante ao proposto pela Vallourec, o peso da estrutura, ao contrário do esperado, foi superior ao encontrado pela estrutura convencional em Treliça Warren, o que não quer dizer que a Vallourec está errada em suas afirmações. Uma série de fatores foi condicionante para o resultado encontrado, pois analisou-se um sistema restritivo, partindo de premissas iniciais que delimitavam a geometria da estrutura. Já o *software* desenvolvido pela Vallourec para o cálculo da estrutura otimiza a geometria de forma a encontrar os resultados mais vantajosos, com isso, a solução mais viável pode, sim, ter uma geometria diferente daquela estudada neste trabalho. Além disso, a proposta de redução de custos do sistema PREON box também está associada a fatores que não foram levados em conta neste trabalho, como custos de projeto, fabricação, montagem e execução da obra.

Cabe salientar que, em relação à escolha dos perfis, a utilização de perfis tubulares quadrados proposta pela Vallourec realmente se adequa. Isso porque, para todos os modelos e em todos os vãos, o peso total da estrutura com a utilização de perfil H foi muito superior ao encontrado para perfis TQ, demonstrando que este último realmente leva a soluções mais econômicas.

O surgimento de *softwares* para cálculo estrutural é relativamente recente e, antes disso, todos os cálculos eram feitos por meio de métodos manuais, baseados em princípios, premissas e tabelas. Este trabalho mostra que o homem tem trabalhado cada vez mais no desenvolvimento de *softwares* e que estes além de proporcionarem uma redução no tempo de planejamento e cálculo dos projetos, também podem proporcionar soluções ótimas, que se baseiam em fatores econômicos. A busca pela redução de custos é um valor fundamental nos dias de hoje no

desenvolvimento de projetos. É o que gera a competitividade no mercado. Paralelo a isso, cabe dizer que o desenvolvimento de ferramentas que proporcionem uma análise do projeto com vista a reduzir o consumo de material é sempre válido e de grande importância, pois a redução de material e de desperdícios implicam em uma menor retirada de matéria-prima da natureza.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16239*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013. 85 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008. 237 p.

ARAÚJO, Afonso Henrique Mascarenhas de et al. *Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço*. Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2016. 598 p.

BELLEI, Ildony H. *Edifícios Industriais em Aço*: Projeto e cálculo. São Paulo: Ed. Pini, 2008. 493 p.

CHAVES, Michel Roque. *Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturais para Galpões Industriais Leves*. 2007. 127 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FAKURY, Ricardo Hallal. *Curso de Especialização em Estruturas: estruturas de aço I*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 343 p.

GERDAU. *Perfis Estruturais Gerdau*: Tabela de bitolas: catálogo. Disponível em < <https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-tabela-de-bitolas.pdf> >. Acesso em 3 setembro 2016.

VALLOUREC. *PREON box*: High quality, flexibility and speed in industrial hall construction: catálogo. Alemanha. 2016.

VALLOUREC. *Tubos Estruturais*: Seção circular, quadrada e retangular: catálogo. Belo Horizonte. Disponível em < <http://www.vallourec.com/COUNTRIES/BRAZIL/PT/Products-and-services/automotive-industrial-tubes/Documents/Catalogo%20Estruturais.pdf> >. Acesso em 3 setembro 2016.

APÊNDICE A - B

APÊNDICE A – Resultados e saídas gráficas para análise utilizando perfil W

Tabela A.1: Perfis utilizados na análise com perfil W

Vão	Tipo da Estrutura	Seção	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
15m	Treliça Warren	W 150x22,5	43	49,83	10,78
	Viga Vierendeel	W 150x22,5	67	45,64	9,88
	Sistema Misto	W 150x22,5	53	48,22	10,44
30m	Treliça Warren	W 150x22,5	53	96,45	20,87
	Viga Vierendeel	W 150x22,5	43	58,64	12,69
		W 150x29,8	22	29,92	8,66
		W 200x35,9	2	2,72	0,94
	Sistema Misto	W 150x22,5	53	96,45	20,87
45m	Treliça Warren	W 150x22,5	39	133,31	28,85
		W 150x29,8	4	16,30	4,72
	Viga Vierendeel	W 150x22,5	17	34,75	7,52
		W 150x29,8	4	8,20	2,37
		W 200x35,9	18	36,90	12,74
		W 200x41,7	16	32,70	13,15
		W 200x46,1	6	12,30	5,46
		W 200x52,0	4	8,20	4,15
		W 200x59,0	2	4,10	2,36
	Sistema Misto	W 150x22,5	43	120,44	26,07
		W 150x29,8	2	8,20	2,37
		W 200x35,9	6	12,20	4,21
		W 200x41,7	2	4,10	1,65
Treliça Warren	W 150x22,5	30	128,58	27,83	
	W 150x29,8	2	10,92	3,16	
	W 200x35,9	4	21,84	7,54	
	W 200x41,7	4	21,78	8,76	
	W 200x46,1	3	16,32	7,25	
60m	Treliça Warren	W 150x22,5	9	24,51	5,31
		W 150x29,8	4	10,92	3,16
		W 200x35,9	8	21,84	7,54
		W 200x46,1	4	10,92	4,85
		W 200x52,0	2	5,46	2,76
	Viga Vierendeel	W 200x59,0	12	32,70	18,82
		W 200x71,0	4	10,92	7,58
		HP 250x62,0	14	38,22	23,06
		W 250x73,0	4	10,92	7,69
		W 250x80,0	2	5,46	4,23
		W 250x89,0	2	5,46	4,74
	HP 310x79,0	2	5,46	4,11	

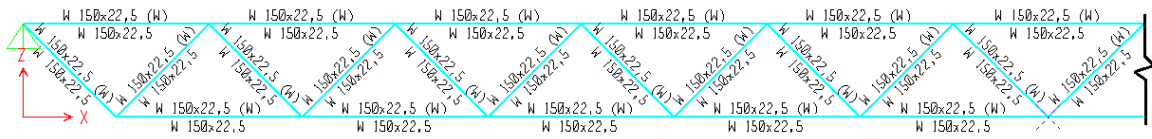
Tabela A.1: Perfis utilizados na análise com perfil W (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
60m	Sistema Misto	W 150x22,5	29	116,84	25,29
		W 150x29,8	10	32,70	9,46
		W 200x35,9	6	21,84	7,54
		W 200x46,1	2	5,40	2,40
		W 200x52,0	6	16,38	8,28
75m	Treliça Warren	W 150x22,5	22	118,07	25,55
		W 150x29,8	6	32,93	9,53
		W 200x35,9	2	9,64	3,33
		W 200x41,7	2	13,64	5,49
		W 200x46,1	2	13,64	6,06
		W 200x52,0	4	27,26	13,79
		W 200x59,0	2	13,64	7,85
		HP 250x62,0	3	20,44	12,33
	Viga Vierendeel	W 150x22,5	7	23,85	5,16
		W 200x35,9	8	27,28	9,42
		W 200x46,1	2	6,82	3,03
		W 200x52,0	4	13,64	6,90
		W 200x71,0	4	13,64	9,47
		W 250x73,0	2	6,82	4,80
		W 250x80,0	2	6,82	5,29
		HP 250x85,0	4	13,62	11,25
		W 250x89,0	12	40,92	35,50
		HP 310x79,0	8	27,28	20,54
		W 360x91,0	8	27,28	23,88
		W 360x101,0	2	6,82	6,67
W 360x110,0	2	6,82	7,27		
W 360x122,0	2	6,82	8,04		
Sistema Misto	W 150x22,5	17	89,73	19,42	
	W 150x29,8	6	32,93	9,53	
	W 200x35,9	10	43,74	15,11	
	W 200x41,7	2	6,80	2,73	
	W 200x46,1	8	34,10	15,15	
	W 200x52,0	2	6,82	3,45	
	W 200x71,0	2	6,82	4,73	
	HP 250x62,0	4	13,62	8,22	
W 250x73,0	2	6,82	4,80		

Tabela A.1: Perfis utilizados na análise com perfil W (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
90m	Treliça Warren	W 150x22,5	20	130,07	28,15
		W 150x29,8	2	11,57	3,35
		W 150x37,1	2	16,36	5,92
		W 200x35,9	2	11,57	4,00
		W 200x46,1	4	23,14	10,28
		W 200x52,0	2	16,36	8,27
		W 200x59,0	4	32,72	18,83
		HP 250x62,0	2	16,38	9,88
		W 250x73,0	2	16,36	11,52
		HP 310x79,0	3	24,56	18,49
	Viga Vierendeel	W 150x22,5	7	28,65	6,20
		W 200x35,9	2	8,18	2,83
		W 200x41,7	4	16,36	6,58
		W 200x46,1	2	8,18	3,63
		HP 250x62,0	2	8,18	4,94
		W 250x73,0	4	16,36	11,52
		W 250x80,0	4	16,36	12,68
		W 310x97,0	2	8,18	7,64
		W 310x107,0	10	40,92	42,29
		W 310x117,0	2	8,18	9,30
		W 310x143,0	2	8,18	11,36
		W 310x158,0	4	16,36	25,00
		W 360x91,0	8	32,72	28,65
		W 360x101,0	8	32,72	31,98
	W 360x110,0	4	16,36	17,43	
	W 360x122,0	2	8,18	9,64	
	Sistema Misto	W 150x22,5	15	91,26	19,75
		W 150x29,8	2	16,36	4,73
		W 200x35,9	2	8,18	2,83
		W 200x41,7	4	27,93	11,23
		W 200x46,1	8	47,68	21,17
		W 200x52,0	6	24,56	12,42
		W 200x71,0	2	8,18	5,68
HP 250x62,0		6	32,72	19,74	
W 250x80,0		2	8,18	6,34	
HP 250x85,0		2	8,20	6,77	
W 250x89,0		2	8,18	7,10	
HP 310x79,0		2	8,18	6,16	

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

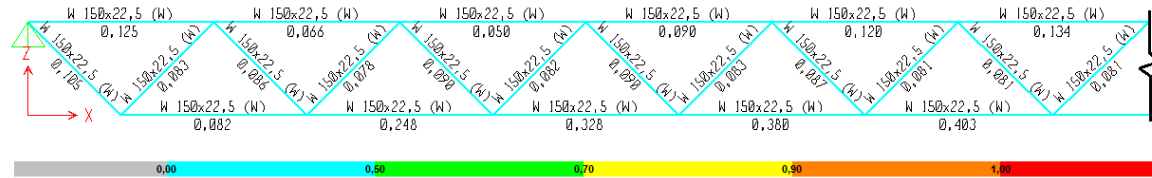
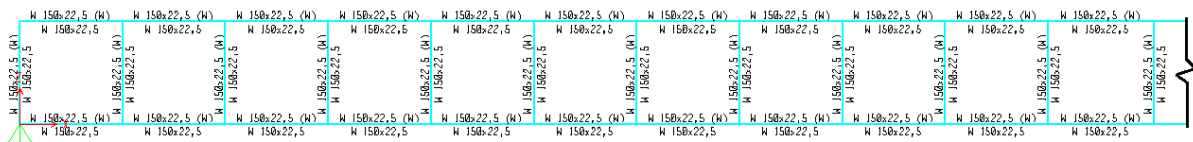


Figura A.1: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

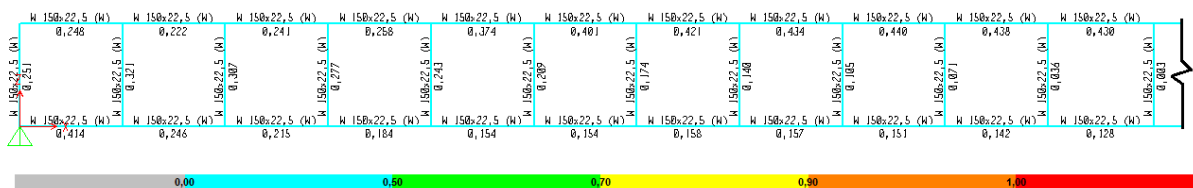
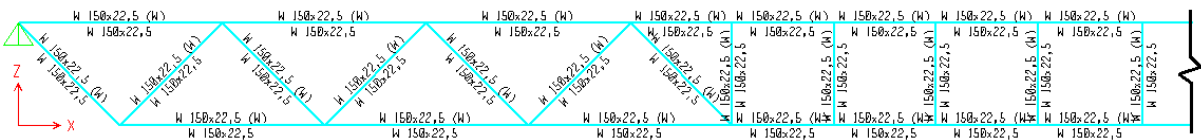


Figura A.2: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

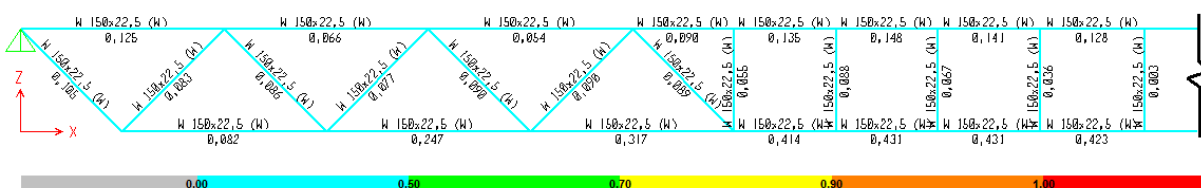
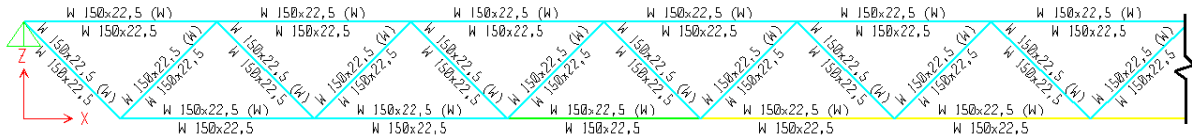


Figura A.3: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

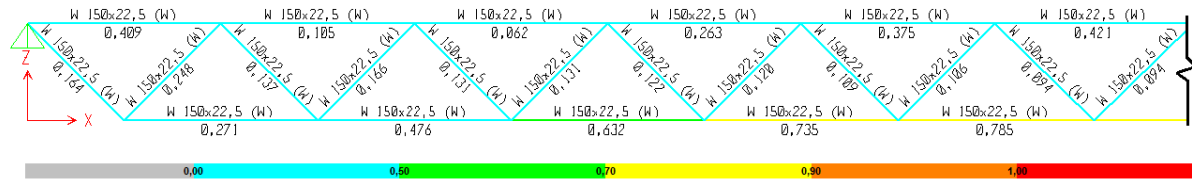
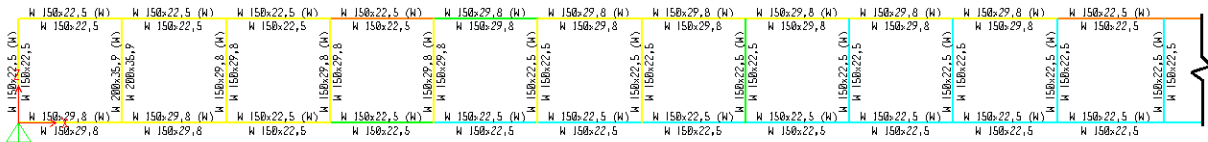


Figura A.4: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

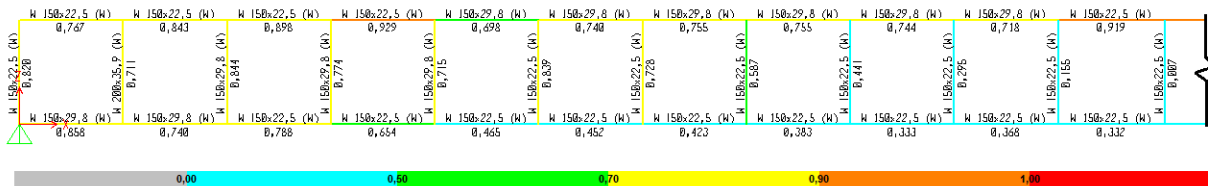
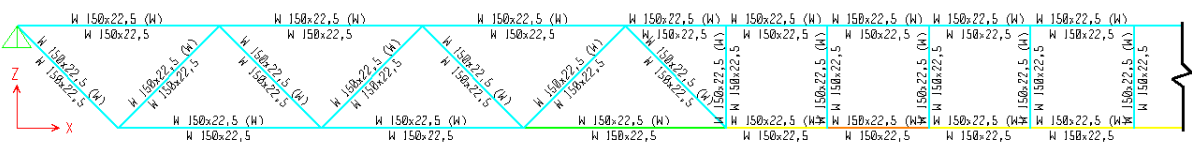


Figura A.5: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

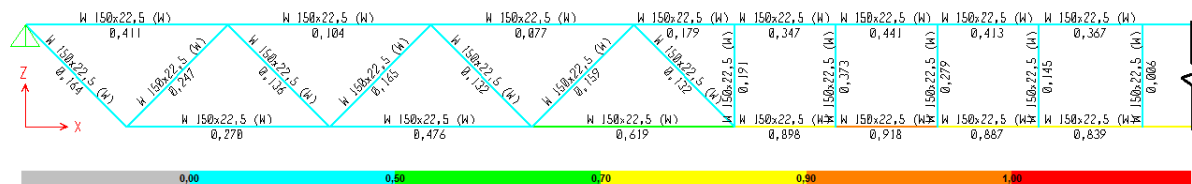
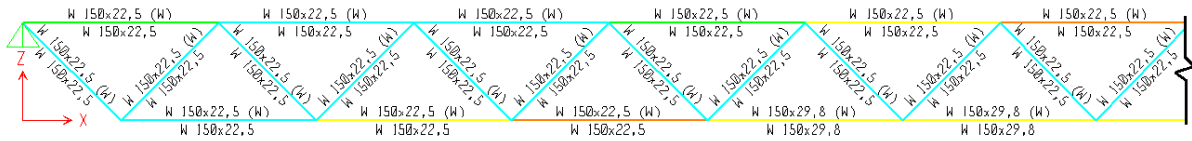


Figura A.6: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

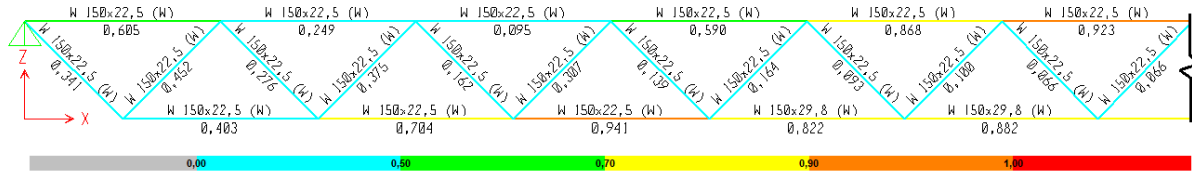
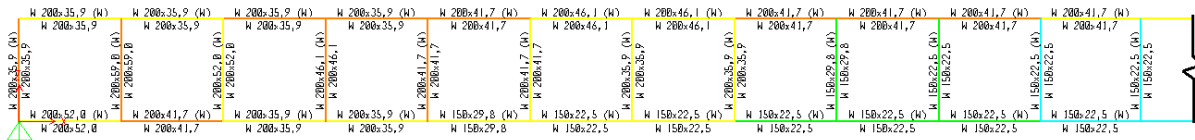


Figura A.7: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

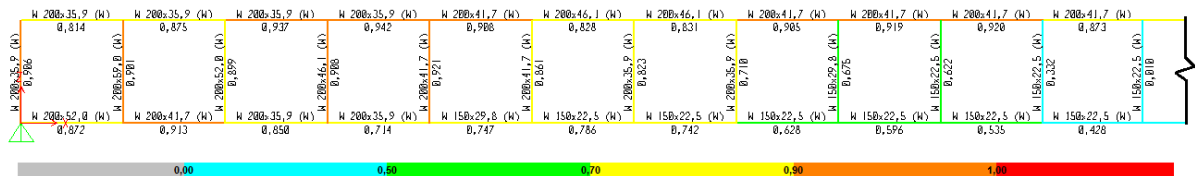
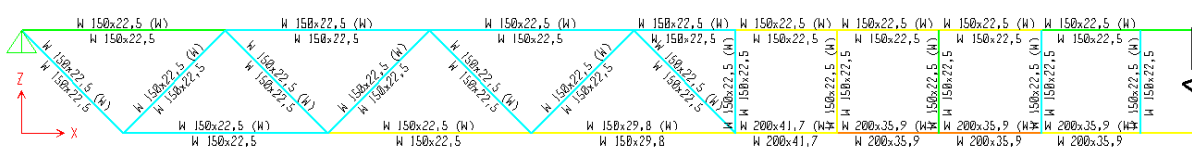


Figura A.8: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

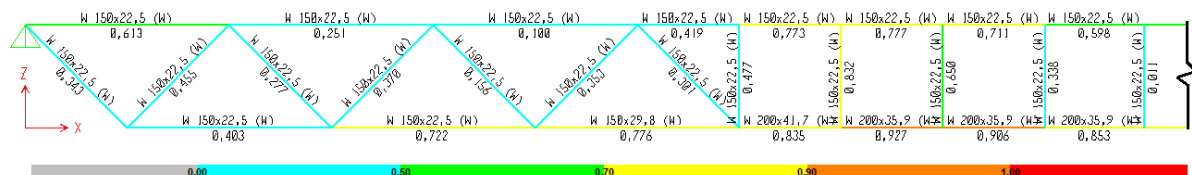
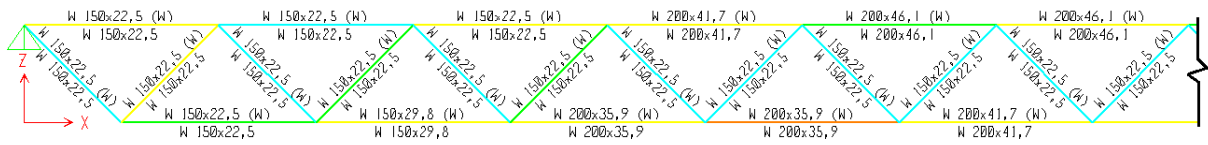


Figura A.9: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

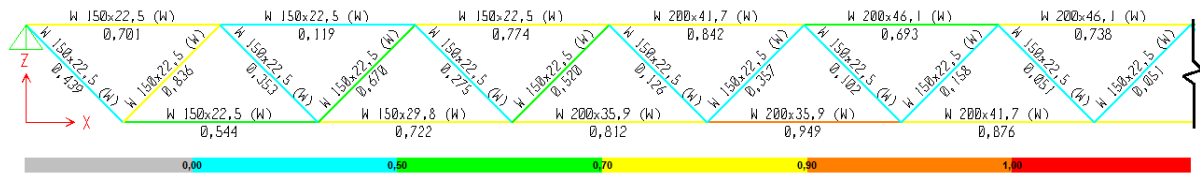
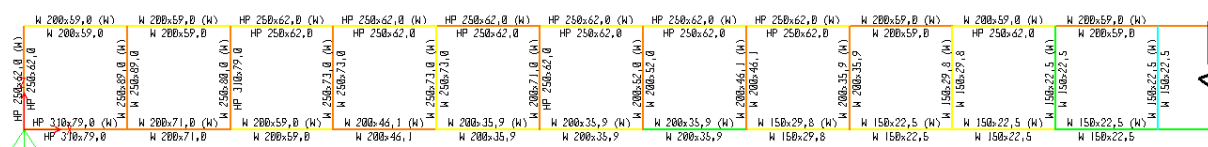


Figura A.10: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

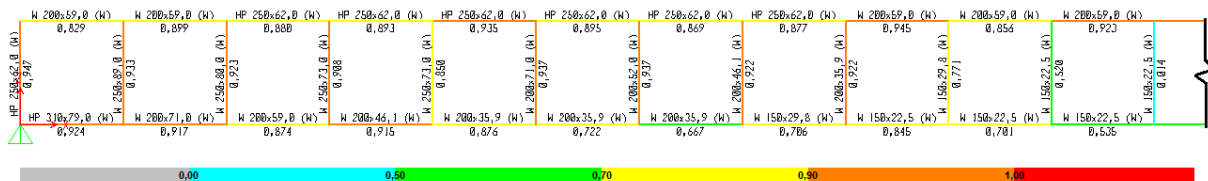
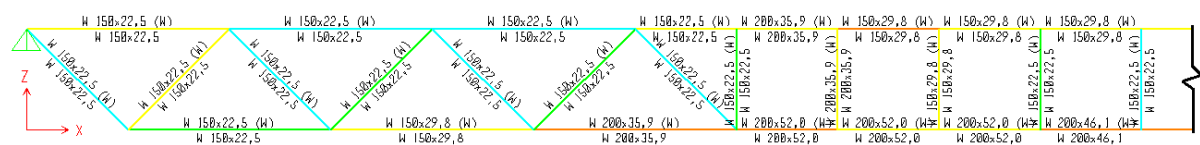


Figura A.11: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

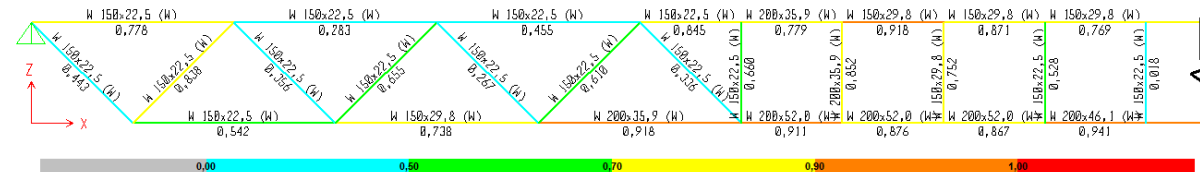
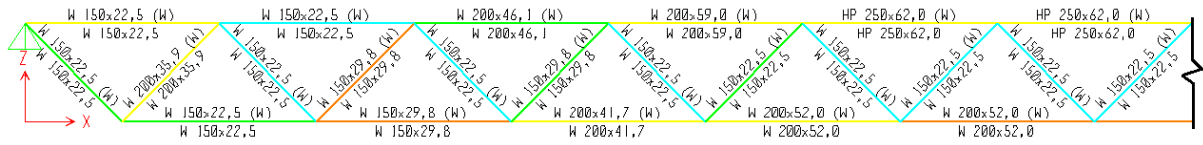


Figura A.12: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

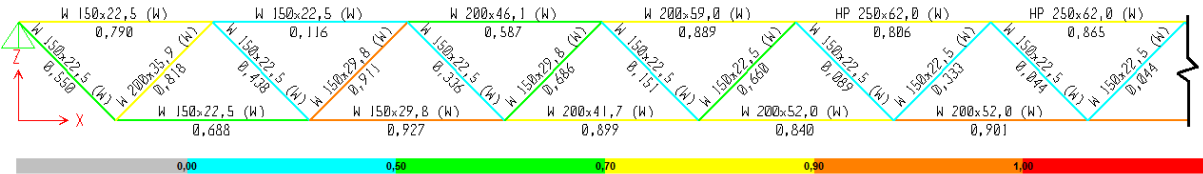
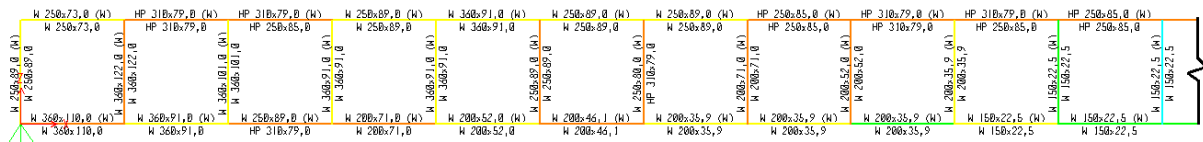


Figura A.13: Saída gráfica Treliza Warren - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

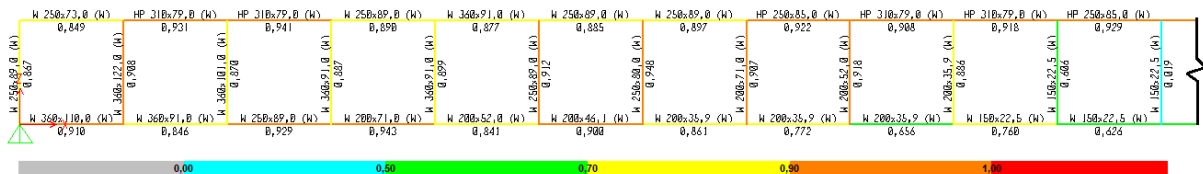
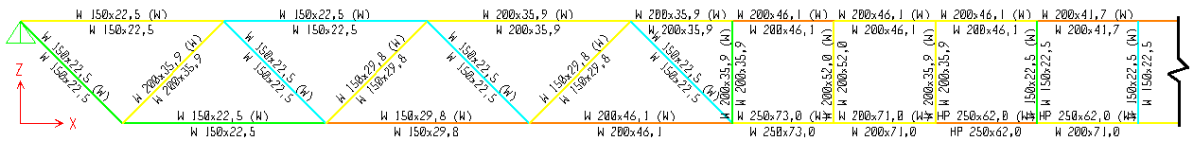


Figura A.14: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

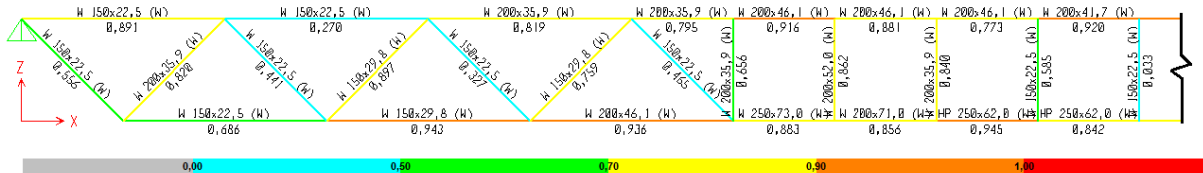
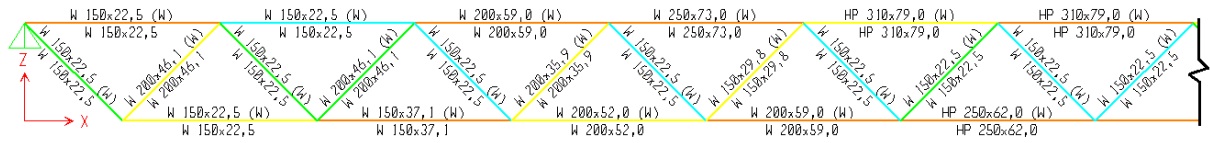


Figura A.15: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

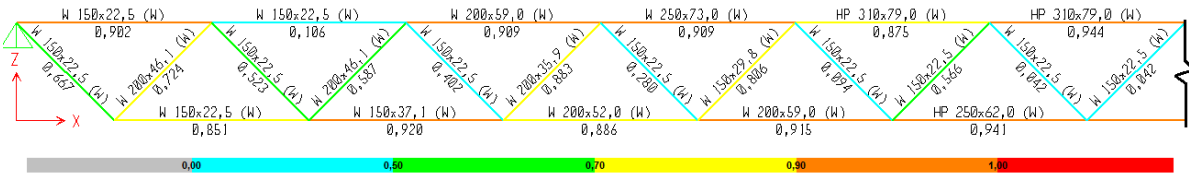
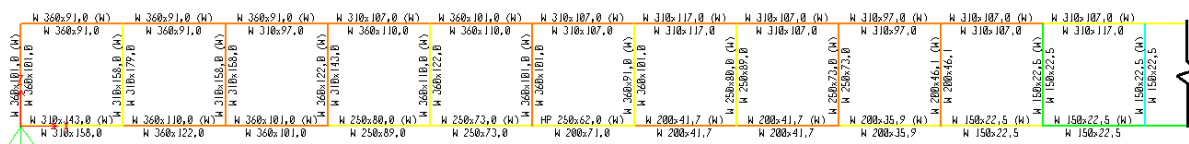


Figura A.16: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

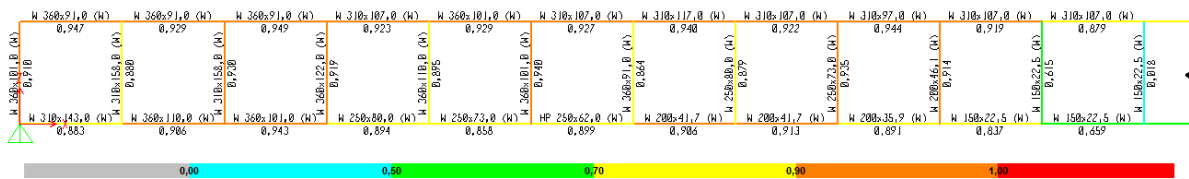
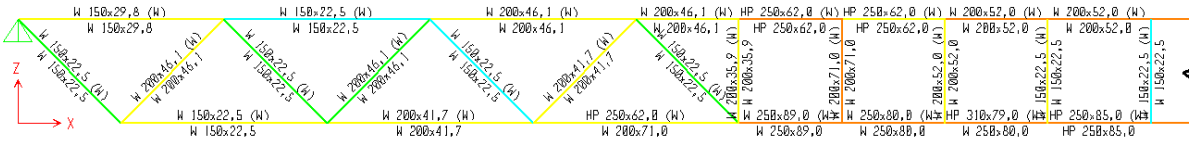


Figura A.17: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

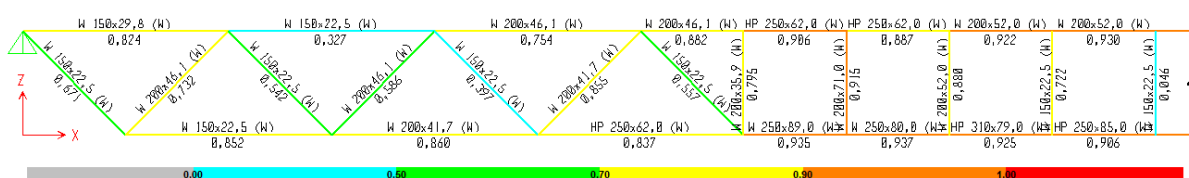


Figura A.18: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

APÊNDICE B – Resultados e saídas gráficas para análise utilizando perfil TQ

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)	
15m	Treliça Warren	50x50x3,6	37	41,63	2,14	
		60x60x4,0	2	2,72	0,19	
		70x70x4,0	2	2,72	0,22	
		80x80x3,6	2	2,76	0,23	
	Viga Vierendeel	50x50x3,6	13	8,88	0,46	
		60x60x3,6	4	2,72	0,17	
		60x60x4,0	2	1,36	0,09	
		70x70x3,6	2	1,36	0,10	
		70x70x4,0	4	2,72	0,22	
		80x80x3,6	2	1,36	0,12	
		80x80x4,0	2	1,36	0,13	
		80x80x4,5	12	8,16	0,85	
		80x80x5,0	4	2,72	0,31	
		90x90x4,0	12	8,20	0,87	
		90x90x4,5	4	2,72	0,32	
		90x90x5,0	2	1,36	0,18	
	Sistema Misto	100x100x4,5	2	1,36	0,18	
		100x100x5,0	2	1,36	0,20	
		50x50x3,6	41	38,66	1,99	
		60x60x3,6	2	1,36	0,09	
		70x70x4,0	2	2,72	0,22	
		80x80x4,5	2	1,40	0,15	
	30m	Treliça Warren	80x80x5,0	2	1,36	0,16
			90x90x4,0	4	2,72	0,29
50x50x3,6			20	41,71	2,15	
50x50x4,0			4	9,29	0,53	
50x50x5,6			2	5,44	0,42	
60x60x3,6			2	3,85	0,24	
70x70x3,6			2	3,85	0,28	
70x70x5,0			2	5,44	0,54	
80x80x3,6			2	5,44	0,46	
80x80x7,1			2	5,44	0,87	
90x90x4,0			2	5,44	0,58	
90x90x4,5			1	2,80	0,33	
100x100x4,5	2	5,44	0,72			
120x120x5,0	2	5,52	0,98			

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
30m	Viga Vierendeel	50x50x3,6	7	9,60	0,49
		80x80x4,5	2	2,72	0,29
		90x90x4,0	4	5,44	0,58
		90x90x4,5	2	2,72	0,32
		100x100x5,0	2	2,72	0,40
		110x110x5,0	2	2,72	0,44
		120x120x5,0	2	2,72	0,48
		130x130x5,0	2	2,72	0,52
		140x140x5,0	4	5,44	1,13
		140x140x5,6	14	19,04	4,41
		140x140x6,4	12	16,32	4,30
		150x150x6,4	8	10,96	3,10
		160x160x6,4	2	2,72	0,82
		175x175x6,4	4	5,44	1,81
	Sistema Misto	50x50x3,6	15	30,35	1,56
		50x50x4,0	2	5,44	0,31
		60x60x3,6	4	7,69	0,48
		60x60x4,5	2	5,44	0,42
		70x70x3,6	6	9,29	0,68
		80x80x4,0	4	5,52	0,52
		90x90x4,0	4	8,16	0,86
		100x100x4,5	4	5,44	0,72
120x120x5,0		4	8,16	1,45	
140x140x5,0		2	2,72	0,57	
45m	Treliça Warren	140x140x5,6	2	2,72	0,63
		140x140x6,4	4	5,52	1,45
		50x50x3,6	12	37,12	1,91
		50x50x4,0	2	5,80	0,33
		60x60x3,6	2	5,80	0,36
		60x60x5,0	2	8,20	0,69
		70x70x3,6	2	5,80	0,43
		70x70x8,0	2	8,20	1,25
		80x80x3,6	2	5,80	0,49
		80x80x4,5	4	14,00	1,46
		90x90x4,0	2	8,20	0,87
		90x90x4,5	2	5,80	0,69
		120x120x5,0	2	8,20	1,45
		130x130x5,0	3	12,20	2,35
130x130x6,4	2	8,20	2,00		
140x140x5,0	2	8,20	1,70		
140x140x6,4	2	8,10	2,13		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
45m	Viga Vierendeel	50x50x3,6	7	14,25	0,73
		110x110x5,0	2	4,10	0,66
		120x120x5,0	6	12,30	2,18
		140x140x5,0	2	4,10	0,85
		150x150x6,4	2	4,10	1,16
		160x160x6,4	2	4,10	1,24
		175x175x6,4	2	4,10	1,36
		175x175x7,1	8	16,40	6,02
		180x180x6,4	2	4,10	1,40
		180x180x7,1	2	4,10	1,55
		200x200x6,4	2	4,10	1,56
		200x200x7,1	2	4,10	1,73
		220x220x6,4	6	12,30	5,18
		220x220x7,1	4	8,20	3,82
		240x240x6,4	10	20,40	9,39
		250x250x8,0	2	4,10	2,44
	260x260x7,1	6	12,30	6,80	
	Sistema Misto	50x50x3,6	11	31,74	1,63
		60x60x4,0	2	5,80	0,40
		60x60x5,0	2	8,20	0,69
		80x80x3,6	2	4,10	0,35
		80x80x4,0	2	5,80	0,54
		80x80x4,5	4	14,00	1,46
		90x90x4,0	2	8,20	0,87
		90x90x4,5	2	5,80	0,69
		110x110x5,0	2	4,00	0,65
		120x120x5,0	6	16,40	2,90
130x130x5,0		2	4,10	0,79	
140x140x5,6	2	4,10	0,95		
140x140x6,4	2	4,10	1,08		
160x160x6,4	4	12,30	3,72		
175x175x6,4	2	4,10	1,36		
175x175x7,1	2	4,10	1,51		
175x175x8,0	4	8,10	3,33		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
60m	Treliça Warren	50x50x3,6	10	41,76	2,15
		60x60x4,0	2	7,72	0,53
		70x70x3,6	2	7,72	0,57
		70x70x4,5	2	7,72	0,70
		80x80x4,5	2	7,72	0,81
		80x80x5,0	2	10,92	1,26
		90x90x5,0	2	10,92	1,43
		100x100x4,5	2	7,72	1,02
		110x110x5,0	4	15,44	2,50
		120x120x5,0	2	10,92	1,93
		130x130x8,8	2	10,92	3,59
		140x140x5,0	2	10,92	2,27
		150x150x6,4	4	21,84	6,18
		160x160x6,4	2	10,92	3,31
		175x175x6,4	1	5,40	1,79
		175x175x7,1	2	10,86	3,99
		Viga Vierendeel	50x50x3,6	5	13,59
	60x60x3,6		2	5,46	0,34
	140x140x5,0		2	5,46	1,14
	140x140x5,6		2	5,46	1,27
	150x150x6,4		4	10,92	3,09
	175x175x7,1		2	5,46	2,00
	240x240x6,4		4	10,92	5,03
	240x240x8,0		8	21,84	12,48
	240x240x8,8		2	5,46	3,42
	250x250x8,0		16	43,68	26,04
	250x250x8,8		2	5,40	3,53
	260x260x7,1		6	16,38	9,06
	260x260x8,8		2	5,46	3,72
	260x260x11,0	2	5,46	4,61	
270x270x8,8	4	10,92	7,73		
270x270x10,0	2	5,46	4,37		
290x290x11,0	2	5,46	5,16		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
60 m	Sistema Misto	50x50x3,6	9	34,55	1,78
		70x70x3,6	2	7,72	0,57
		70x70x4,5	2	7,72	0,70
		80x80x6,4	2	10,92	1,58
		90x90x4,5	2	10,92	1,29
		100x100x4,5	2	7,72	1,02
		110x110x5,0	4	13,18	2,13
		120x120x5,0	4	18,64	3,30
		140x140x5,6	4	16,38	3,80
		140x140x6,4	4	10,86	2,86
		150x150x6,4	2	5,46	1,55
		175x175x7,1	4	10,92	4,01
		180x180x7,1	2	10,92	4,13
		240x240x6,4	2	5,46	2,51
		240x240x8,0	2	5,40	3,09
		250x250x6,4	2	5,46	2,62
250x250x8,0	2	5,46	3,26		
260x260x6,4	2	5,46	2,73		
75m	Treliça Warren	50x50x3,6	6	28,92	1,49
		60x60x3,6	2	13,64	0,85
		60x60x4,0	2	9,64	0,67
		70x70x4,5	2	9,64	0,88
		70x70x8,0	2	13,64	2,08
		80x80x4,0	2	9,64	0,90
		80x80x5,0	2	9,64	1,11
		100x100x5,0	2	9,64	1,41
		110x110x5,0	2	13,64	2,21
		120x120x5,0	2	9,64	1,71
		130x130x5,0	2	9,64	1,86
		130x130x7,1	2	13,64	3,67
		140x140x5,0	2	9,64	2,01
		140x140x6,4	2	13,64	3,59
		175x175x7,1	2	13,64	5,01
		180x180x6,4	2	13,64	4,67
220x220x6,4	5	34,08	14,35		
240x240x6,4	2	13,62	6,27		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)		
	Viga Vierendeel	50x50x3,6	5	17,03	0,88		
		60x60x3,6	2	6,82	0,43		
		160x160x6,4	2	6,82	2,06		
		175x175x6,4	4	13,64	4,53		
		200x200x6,4	2	6,82	2,60		
		240x240x8,0	2	6,82	3,90		
		250x250x8,0	2	6,82	4,07		
		260x260x7,1	2	6,82	3,77		
		260x260x8,8	2	6,82	4,64		
		260x260x10,0	2	6,82	5,25		
		260x260x11,0	2	6,82	5,75		
		270x270x8,8	2	6,82	4,83		
		270x270x10,0	10	34,10	27,30		
		290x290x10,0	8	27,28	23,52		
		290x290x11,0	8	27,26	25,76		
		290x290x12,5	4	13,64	14,57		
		290x290x20,0	2	6,82	11,34		
		300x300x12,5	2	6,82	7,55		
		300x300x14,2	4	13,64	17,05		
		75m	Sistema Misto	50x50x3,6	3	10,23	0,53
				60x60x3,6	2	13,64	0,85
60x60x4,0	4			19,29	1,33		
80x80x4,0	2			9,64	0,90		
80x80x5,0	2			9,64	1,11		
80x80x7,1	2			13,64	2,17		
120x120x5,0	2			13,64	2,42		
130x130x5,0	6			26,11	5,03		
130x130x8,0	2			13,64	4,10		
140x140x5,0	2			9,64	2,01		
140x140x6,4	2			13,64	3,59		
175x175x6,4	6			20,44	6,79		
200x200x6,4	2			6,82	2,60		
220x220x7,1	2			6,82	3,17		
220x220x8,0	2			13,64	7,12		
240x240x8,0	2			6,82	3,90		
250x250x6,4	2			6,82	3,27		
250x250x8,0	2			6,82	4,07		
260x260x10,0	2			6,80	5,24		
270x270x8,0	2			6,82	4,40		
270x270x10,0	2			6,82	5,46		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)	
90m	Treliça Warren	60x60x3,6	6	34,72	2,17	
		70x70x4,0	2	11,57	0,94	
		80x80x3,6	2	16,36	1,39	
		80x80x6,4	2	11,57	1,68	
		90x90x4,0	2	11,57	1,23	
		100x100x4,5	2	11,57	1,53	
		120x120x5,0	2	11,57	2,05	
		130x130x5,0	2	16,36	3,15	
		140x140x5,0	4	27,93	5,81	
		140x140x6,4	2	11,57	3,05	
		160x160x6,4	2	11,57	3,50	
		175x175x6,4	4	32,72	10,87	
		175x175x8,8	2	16,36	7,37	
		220x220x6,4	2	16,36	6,89	
		240x240x8,0	2	16,38	9,36	
		250x250x6,4	2	16,36	7,85	
		250x250x7,1	2	16,36	8,69	
		260x260x6,4	1	8,20	4,10	
		Viga Vierendeel	50x50x3,6	7	28,65	1,47
			70x70x3,6	2	8,18	0,60
			250x250x8,0	2	8,18	4,88
			260x260x7,1	4	16,36	9,05
			260x260x10,0	4	16,36	12,59
			290x290x10,0	2	8,18	7,05
			290x290x11,0	4	16,36	15,46
			290x290x12,5	8	32,72	34,95
290x290x14,2	4		16,38	19,75		
290x290x16,0	6		24,54	33,13		
290x290x20,0	4		16,36	27,20		
300x300x14,2	8		32,72	40,89		
300x300x16,0	4		16,36	22,89		
300x300x20,0	8		32,72	56,42		

Tabela B.1: Perfis utilizados na análise com perfil TQ (Continuação)

Vão	Tipo da Estrutura	Seção TQ	Número de Barras	Comprimento Total (m)	Peso Total (kN)
90m	Sistema Misto	50x50x3,6	2	8,18	0,42
		60x60x3,6	1	4,09	0,26
		70x70x4,5	2	11,57	1,05
		80x80x3,6	4	27,93	2,37
		80x80x5,0	2	11,57	1,34
		90x90x5,6	2	11,57	1,68
		120x120x5,6	2	16,36	3,23
		120x120x6,4	2	16,36	3,66
		140x140x5,6	2	11,57	2,68
		150x150x6,4	2	11,57	3,27
		160x160x6,4	2	11,57	3,50
		175x175x6,4	4	24,54	8,15
		175x175x7,1	2	16,36	6,01
		220x220x6,4	2	8,18	3,44
		240x240x6,4	2	8,20	3,78
		240x240x8,8	2	16,36	10,25
		250x250x6,4	2	8,18	3,93
		250x250x8,0	2	8,18	4,88
		250x250x8,8	2	8,18	5,35
		260x260x7,1	2	8,18	4,52
260x260x10,0	2	8,18	6,30		
260x260x11,0	2	8,18	6,90		
270x270x8,8	2	8,18	5,79		
290x290x11,0	4	16,38	15,48		

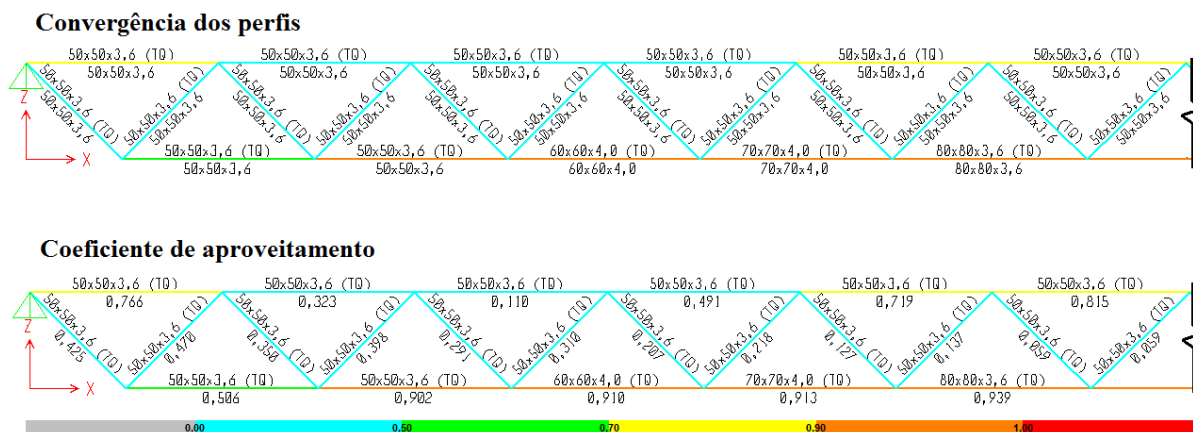


Figura B.1: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

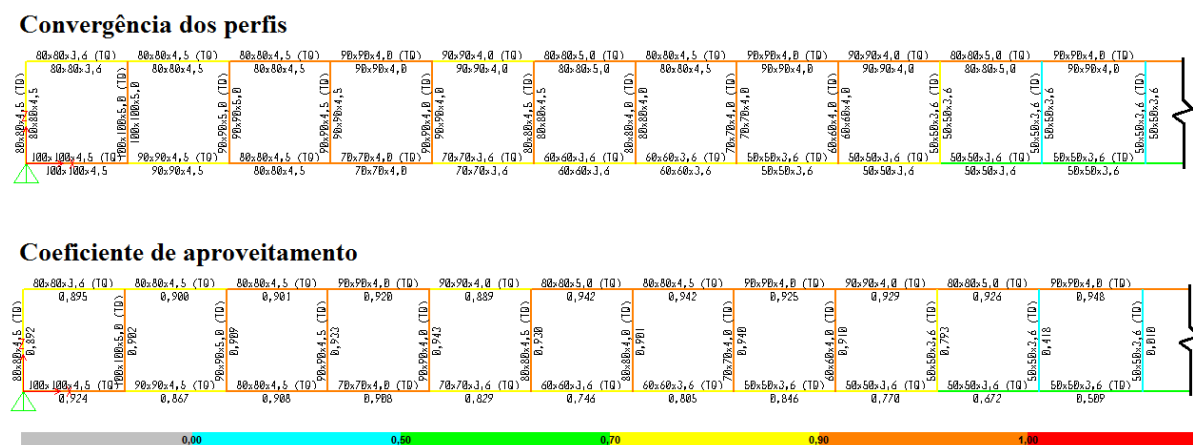


Figura B.2: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

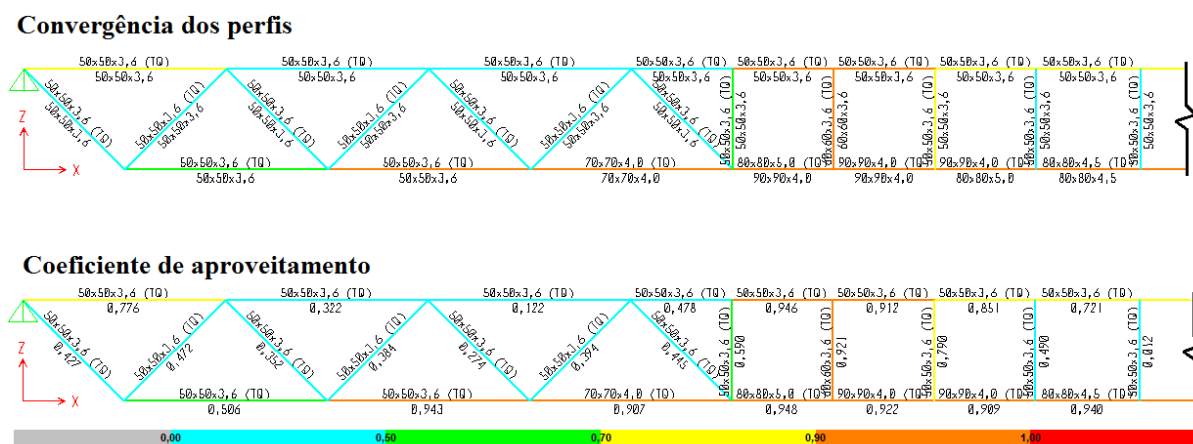
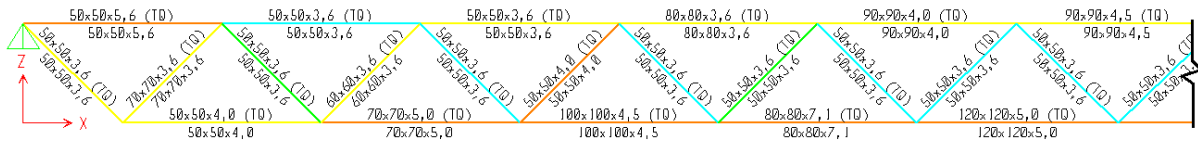


Figura B.3: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 15m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

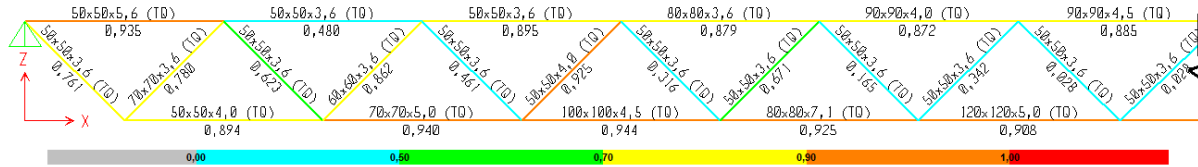
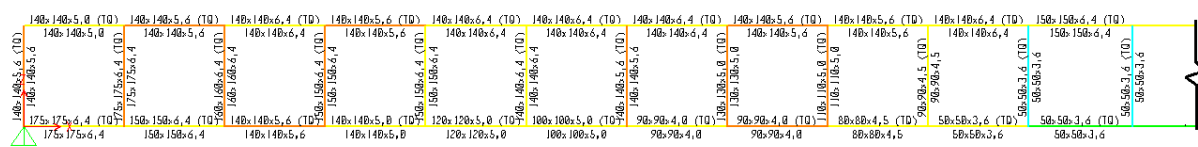


Figura B.4: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

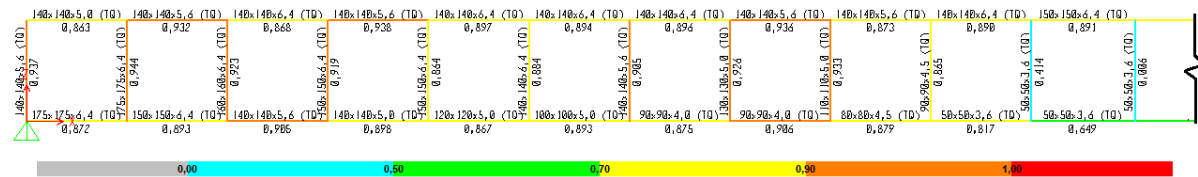
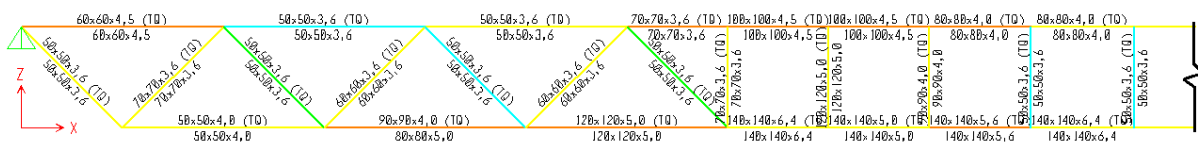


Figura B.5: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

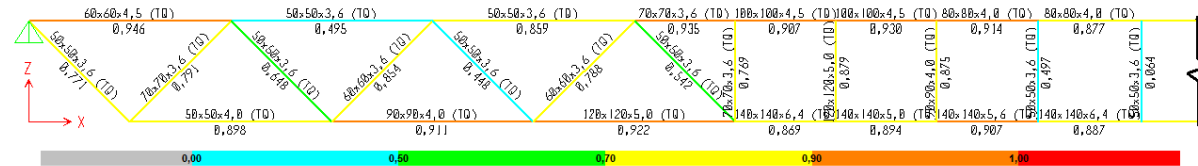
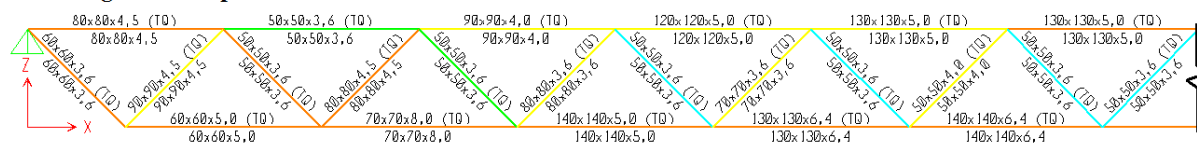


Figura B.6: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 30m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

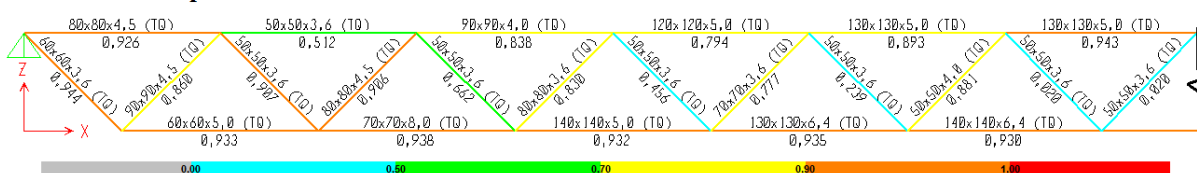
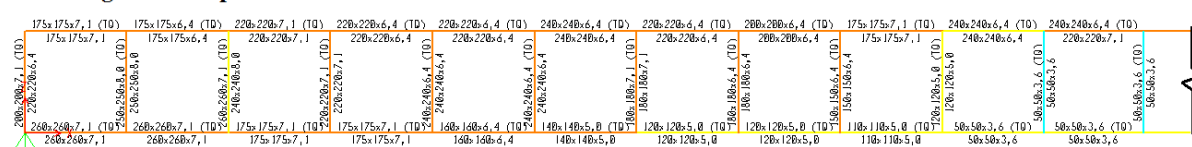


Figura B.7: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

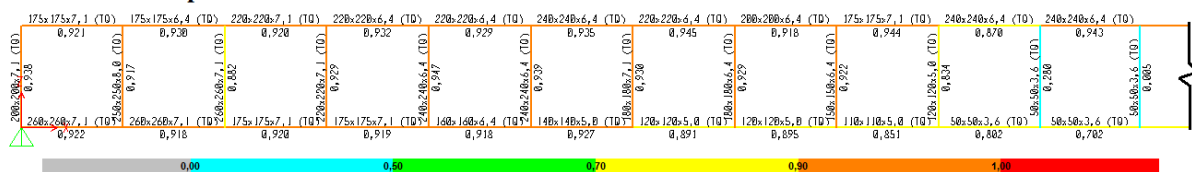
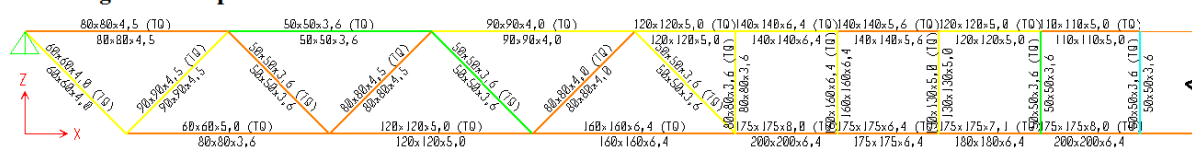


Figura B.8: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

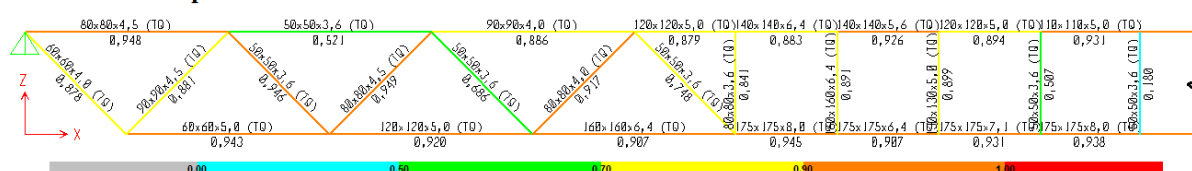
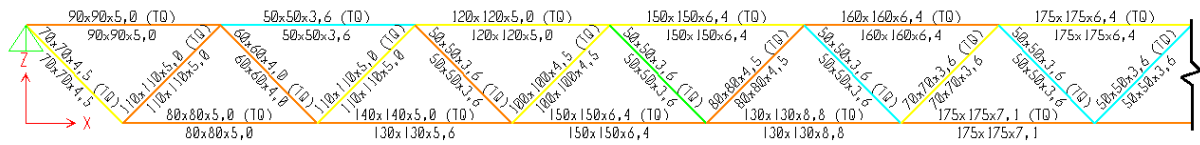


Figura B.9: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 45m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

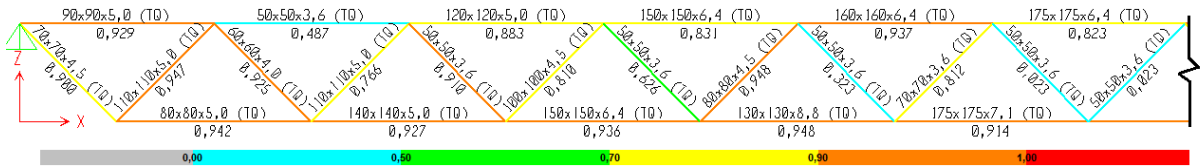
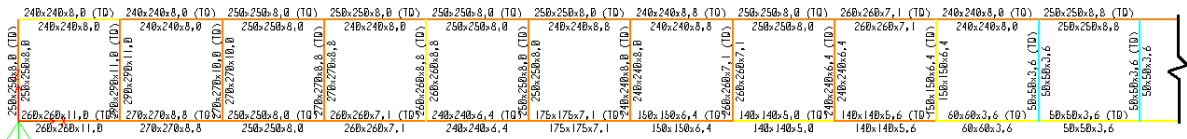


Figura B.10: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

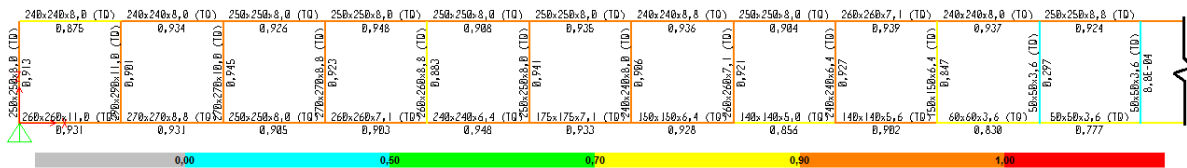
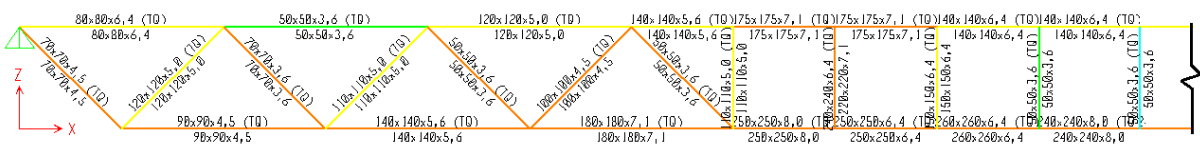


Figura B.11: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

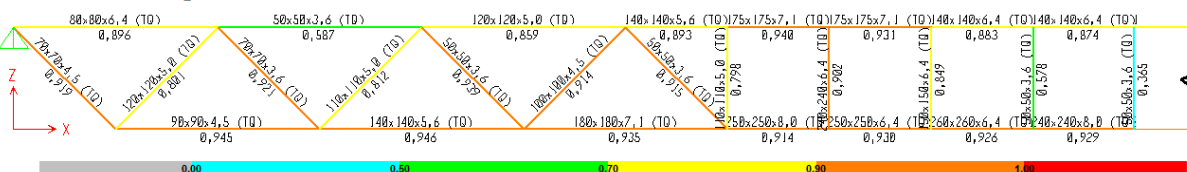
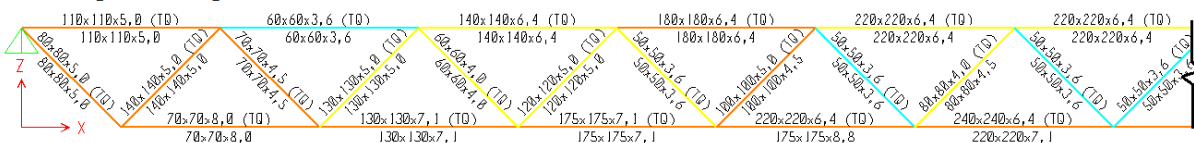


Figura B.12: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 60m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

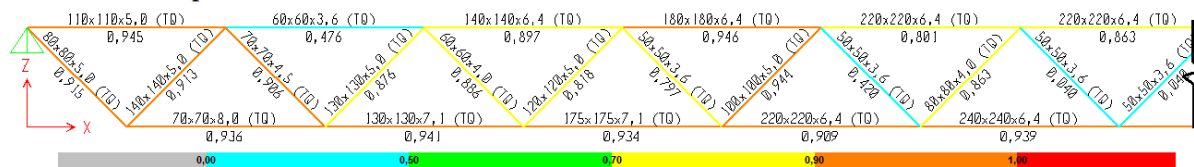
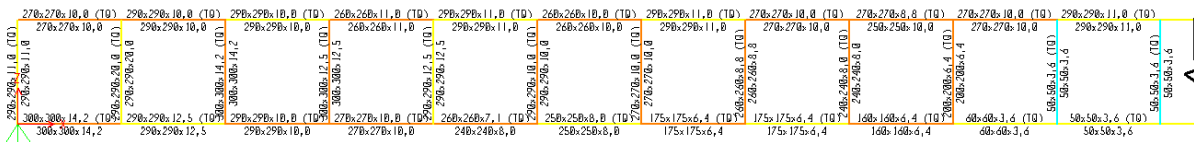


Figura B.13: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

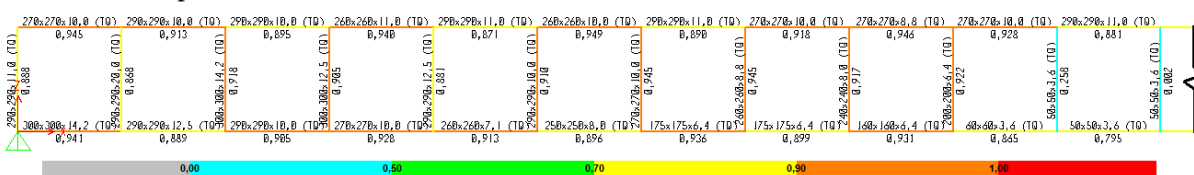
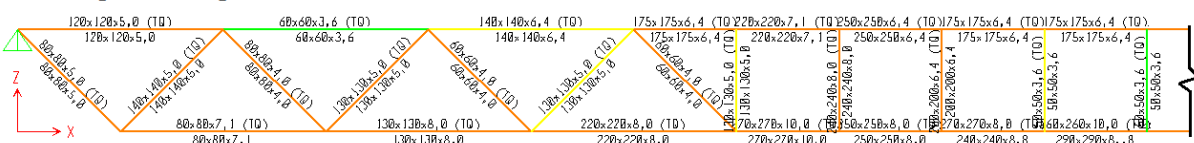


Figura B.14: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

Convergência dos perfis



Coefficiente de aproveitamento

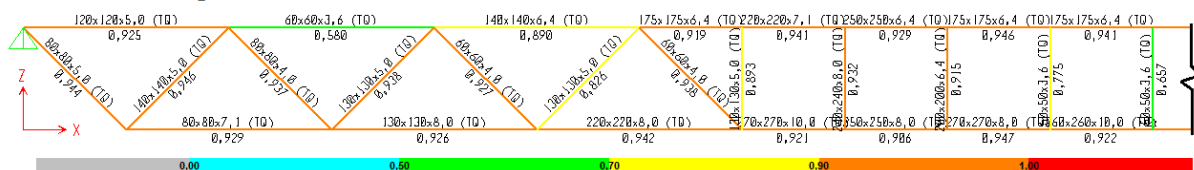


Figura B.15: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 75m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

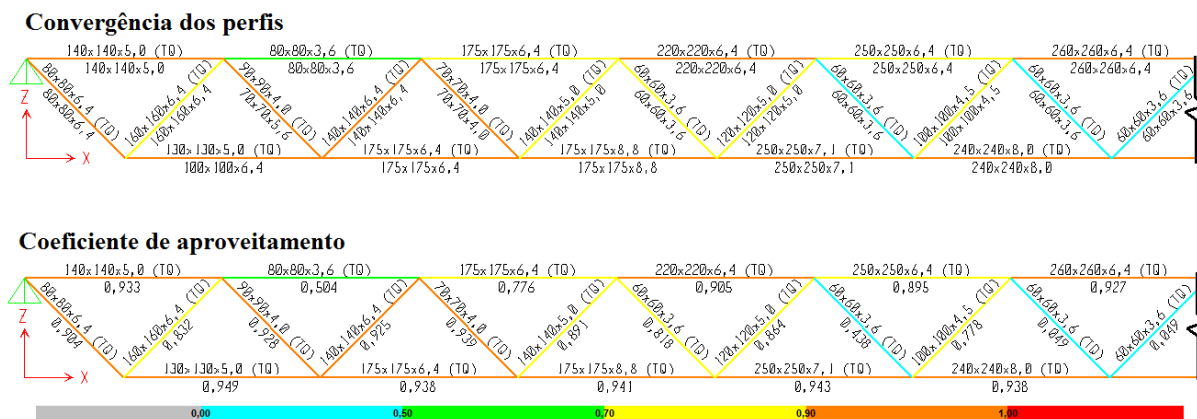


Figura B.16: Saída gráfica Treliça Warren - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

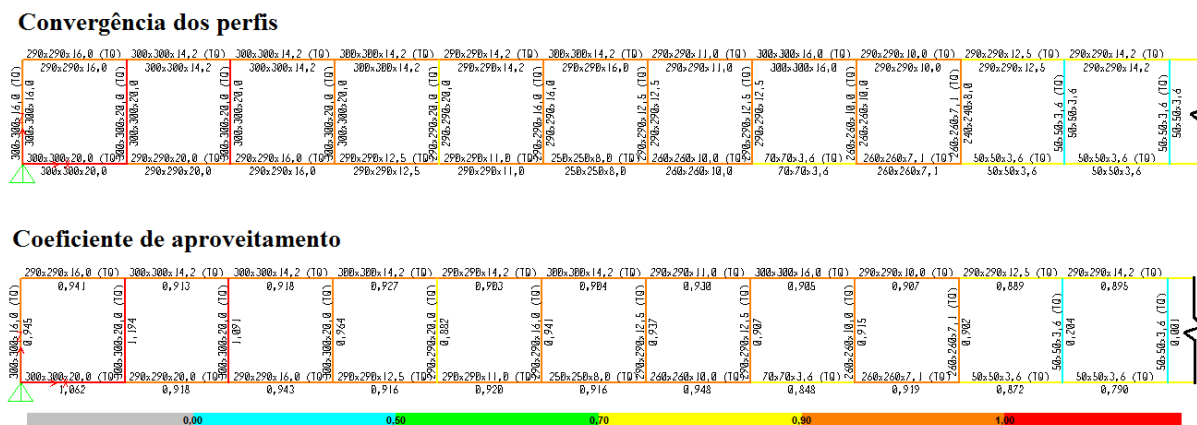


Figura B.17: Saída gráfica Viga Vierendeel - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

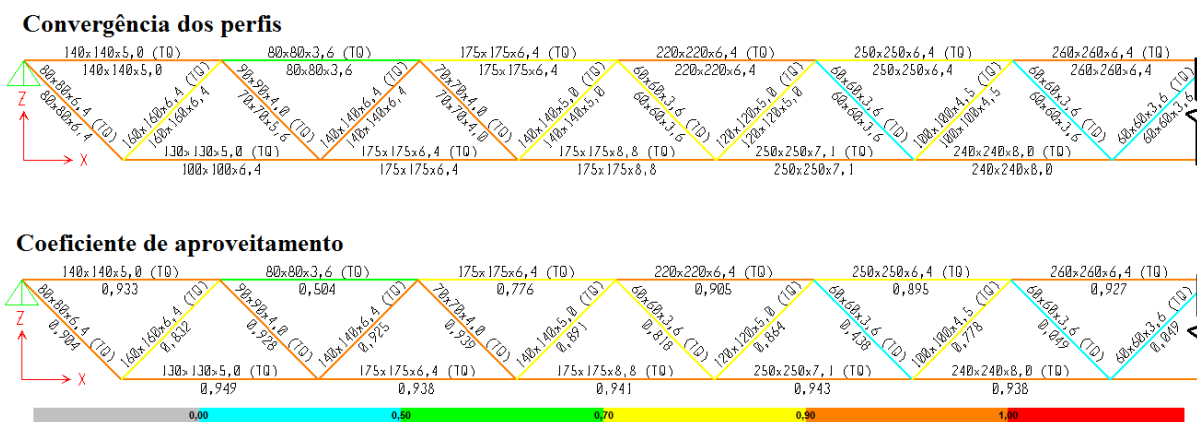


Figura B.18: Saída gráfica Sistema Misto - vão de 90m

Fonte: SAP2000 - Elaborada pela autora

ANEXO A - C

ANEXO A – Tabelas para cálculo das combinações de ações

Tabela A.1: Valores dos coeficientes de ponderação das ações γ_g , γ_q

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Fonte: ABNT NBR 8800:2008, p.18

Tabela A.2: Valores dos fatores de combinação Ψ_0 e redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_f^a		
		Ψ_0	Ψ_1^d	Ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 4.7.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar Ψ_1 igual a 1,0. ^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para Ψ_2 o valor zero.				

Fonte: ABNT NBR 8800:2008, p.19

ANEXO B – Valores dos coeficientes de flambagem e comprimentos de flambagem

Os valores teóricos dos coeficientes de flambagem por flexão, K_x ou K_y , são fornecidos na Tabela B.1 abaixo retirada da ABNT NBR 8800:2008

Tabela B.1: Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	 Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: ABNT NBR 8800:2008, p.125

Ainda segundo a ABNT NBR 8800:2008 o coeficiente de flambagem por torção, K_z , pode ser tomado igual a:

1,0 quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre;

2,0 quando uma das extremidades da barra possuir rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento livres e, a outra extremidade, rotação e empenamento impedidos.

O comprimento das barras, L , a ser considerado no cálculo do comprimento de flambagem, deve ser tomado como a distância entre duas seções com contenção contra translação no plano em que a flambagem estiver sendo considerada.

Para as treliças formadas apenas por perfis tubulares, a ABNT NBR 16239:2013, determina que:

a) o comprimento de flambagem dos banzos pode ser tomado igual a $0,9L$, onde L é o comprimento da barra, medido entre os nós no plano e o comprimento entre duas contenções laterais fora do plano;

b) para diagonais e montantes ligados aos banzos diretamente por meio de solda, em todo o seu perímetro, o comprimento de flambagem, no plano e fora do plano, pode ser tomado igual a $0,90L$ para $\beta > 0,60$ e $0,75L$ para $\beta \leq 0,60$, sendo β , para ligações de perfis tubulares quadrados, dado por:

- para ligações T, Y ou X

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}$$

- para ligações K e N

$$\beta = \frac{2b_1 + 2b_2}{4b_0}$$

Sendo b_0 a largura da seção transversal do banzo e b_1 e b_2 a largura da seção transversal do montante ou das diagonais.

ANEXO C – Condições de validade de ligações soldadas

Tabela C.1: Condições de validade de ligações soldadas entre diagonais e montantes de perfis tubulares circulares ou retangulares e banzos de perfis tubulares retangulares

Perfil das diagonais ou montantes e tipo de ligação	Condições de validade				
	Compressão	Tração	Tração ou compressão		
Retangular T, Y ou X	$\frac{b_1}{t_1} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\frac{b_1}{b_0} \geq 0,25$	$\frac{b_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\frac{h_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	—
Retangular K e N com afastamento	$\frac{h_1}{t_1} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\frac{b_1}{t_1} \leq 35$ $\frac{h_1}{t_1} \leq 35$	$\frac{b_1}{b_0} \geq \begin{cases} 0,35 \\ 0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0} \end{cases}$	$\frac{b_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$ $\frac{h_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\frac{g}{b_0} \leq 1,5(1-\beta)$ " " $\frac{g}{b_0} \geq 0,5(1-\beta)^a$ " " $0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0$ $0,5 \leq \frac{h_1}{b_1} \leq 2,0$
Retangular K e N com sobreposição	$\frac{b_1}{t_1} \leq 1,10 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $\frac{h_1}{t_1} \leq 1,10 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b_1}{b_0} \geq 0,25$	$\frac{b_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$ $\frac{h_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\lambda_{ov} \geq 25\%$ $\lambda_{ov} \leq 100\%$ " " $\frac{b_1}{b_0} \geq 0,75^d$	
Circular	$\frac{d_1}{t_1} \leq 0,05 \frac{E}{f_y}$	$\frac{d_1}{t_1} \leq 50$	$0,4 \leq \frac{d_1}{b_0} \leq 0,8$	$\frac{d_0}{t_0} \leq \begin{cases} 50 \\ 0,05 \frac{E}{f_y} \end{cases}$	Conforme acima, substituindo b_1 por d_1 e b_0 por d_0 , onde aplicável.

^a Se $\frac{g}{b_0} > 1,5(1-\beta)$ e $g > t_1 + t_2$, tratar a ligação como duas ligações T separadas ou como duas ligações Y separadas.

^b A sobreposição pode ser aumentada para permitir que a extremidade da barra sobreposta seja soldada no banzo.

^c λ_{ov} igual a $100 \frac{g}{p}$ (ver Figura 5).

^d Nas ligações com sobreposição, i = diagonais ou montantes subpostas, j = diagonais ou montantes sobrepostas.

Fonte: ABNT NBR 16239:2013, p.32

Tabela C.2: Condições adicionais para o uso da Tabela C1

Tipos de perfis	Tipo de ligações	Parâmetros de ligações	
Perfis tubulares quadrados	T, Y ou X	$\frac{b_1}{b_0} \leq 0,85$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 10$
	K e N com afastamento	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 15$
Perfis tubulares circulares	T, Y ou X	-	$\frac{b_0}{t_0} \geq 10$
	K e N com afastamento	$0,6 \leq \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \leq 1,3$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 15$

Fonte: ABNT NBR 16239:2013, p.33