



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TERÇAS DE AÇO,
CONVENCIONAIS EM VIGAS, EM TRELIÇAS PLANAS E EM
TRELIÇAS MULTIPLANARES**

Rodrigo Cuberos Vieira

**Campinas
2009**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

Rodrigo Cuberos Vieira

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TERÇAS DE AÇO,
CONVENCIONAIS EM VIGAS, EM TRELIÇAS PLANAS E EM
TRELIÇAS MULTIPLANARES**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas

Orientador: Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena

**Campinas
2009**

**Acesso que essa é a versão definitiva da
dissertação/tese
Prof. Dr. JOÃO A.V. REQUENA
matricula 222941-28/10/09**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V673e Vieira, Rodrigo Cuberos
 Estudo comparativo entre terças de aço,
 convencionais em vigas, em treliças planas e em treliças
 multiplanares / Rodrigo Cuberos Vieira. --Campinas, SP:
 [s.n.], 2009.

 Orientador: João Alberto Venegas Requena.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
 Urbanismo.

 1. Estruturas metálicas. 2. Treliças (Construção
 civil). 3. Aço - Estruturas. 4. Aço tubular - Estruturas.
 5. Cobertura metálica. I. Requena, João Alberto
 Venegas. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
 Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Comparative study of steel purlins in conventional beams, in
 planar trusses and multi-planar trusses

Palavras-chave em Inglês: Steel structures, Trusses, Structures steel, Tubular steel
 structures, Steel roofing

Área de concentração: Estruturas

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Mario Conrado Cavichia, Renato Bertolino Júnior

Data da defesa: 28/08/2009

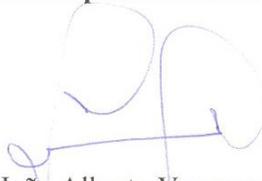
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TERÇAS DE AÇO,
CONVENCIONAIS EM VIGAS, EM TRELIÇAS PLANAS E EM
TRELIÇAS MULTIPLANARES**

Rodrigo Cuberos Vieira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena
Presidente e Orientador/FEC - Unicamp**



**Prof. Dr. Mario Conrado Cavichia
FEC - Unicamp**



**Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior
REIS - UNESP**

Campinas, 28 de agosto de 2009

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais José Roberto e Maria Cristina, pelo incentivo, compreensão e paciência durante a realização desta dissertação.

Ao orientador Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena pela amizade, atenção e pelos valiosos ensinamentos.

Aos engenheiros Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo, Patrícia Cristina Silva Costa Santana, ambos da empresa V&M do Brasil, e Mauricio Dario Filho pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos engenheiros e amigos Tiago Luís Duarte Forti e Gustavo Camargo Longhin pelo desenvolvimento do programa AutoTruss 2.0, agilizando e facilitando parte das análises realizadas.

Aos professores e colegas do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp que sempre incentivaram a conclusão desta dissertação.

À Universidade Estadual de Campinas, em especial a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo pelo fornecimento das ferramentas necessárias para a realização de todas as análises.

À empresa V&M do Brasil, pelo incentivo na pesquisa e por acreditar na realização deste trabalho.

RESUMO

As coberturas metálicas são muito utilizadas em edificações que necessitam de grandes espaços internos livres e possuem um prazo de execução pequeno, como por exemplo, galpões comerciais, industriais e centros de armazenamento e distribuição. Dentre as suas partes constituintes, as terças são responsáveis por uma parcela considerável do peso total da cobertura. Neste trabalho foi desenvolvido um amplo estudo sobre os diversos tipos de terças metálicas utilizadas em estruturas metálicas de médio e grande porte, com vãos de até 40 metros, abordando as terças em perfil laminado e formado a frio, e as terças treliçadas em perfis abertos e tubulares. Foram realizados estudos aprofundados sobre o dimensionamento de terças em perfil laminado e formado a frio, com o desenvolvimento de um programa de verificação e dimensionamento para esses tipos de terças. Também foram realizados estudos sobre o dimensionamento de terças treliçadas planas, também conhecidas como *joists*, que já têm a sua utilização bastante difundida, e de terças treliçadas tubulares multiplanares, cuja utilização ainda é pequena se comparada com os demais tipos de terças. Com esses estudos, foram feitas análises comparativas para diversos vãos, com as ações comumente utilizadas em estruturas que possuem coberturas metálicas, possibilitando identificar qual o tipo de terça mais adequado para cada situação estudada. Uma análise dos custos das terças também foi realizada, permitindo verificar a viabilidade da utilização das terças treliçadas tubulares em coberturas metálicas, principalmente das terças treliçadas tubulares multiplanares, cuja aplicação ainda é pequena.

Palavras Chave: Estruturas metálicas, terças, treliças de aço, perfis formados a frio, perfis tubulares, coberturas metálicas, *joists*.

ABSTRACT

Steel roof systems are widely used in buildings that require large free internal spaces and small execution times, such as commercial and industrial warehouses and storage and distribution centers. The purlins have a considerable contribution in the roof system total weight composition. In this work was developed a study on the different types of purlins for medium and large spans, up to 40 meters, analyzing the hot-rolled sections, cold-formed sections and trusses with open or hollow sections. Purlin design studies were conducted for hot-rolled and cold-formed sections, with a computational software development for these purlin types. The use of planar trusses as purlins, also called steel joists, is already well known, and its design was studied too, as well as the multi-planar tubular trusses, whose use is still small when compared with the other purlin types. With these studies, a comparative analysis was made for various spans, applying the loads commonly used in steel roof systems, allowing the investigation of the best purlin type for each proposed situation. An analysis of the purlin costs was also performed, allowing to study the feasibility of the tubular trusses use in steel roof systems, especially the multi-planar tubular trusses, whose application is still small.

Key Words: Steel structures, purlins, steel trusses, cold-formed sections, hollow sections, steel roof systems, steel joists.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Principais elementos que compõem uma cobertura metálica | 3 |
| Figura 1.2 – Telha metálica: a) telha apoiada na terço, b) gancho para fixação da telha, c) parafuso autobrocante. Adaptado de CBCA [33], Pugliesi [55] e Faz Fácil [24] | 4 |
| Figura 1.3 – Telha zipada: a) colocação da telha, b) fixação nos clips, c) cobertura finalizada. Fonte: Metálica [46] | 4 |
| Figura 1.4 – Telhas termo-acústicas. Fonte: Metálica [46] | 5 |
| Figura 1.5 – Tipos de terços: a) terços em perfil, b) terços treliçadas | 6 |
| Figura 1.6 – Exemplos de vigas da estrutura principal: a) em perfil, b) em treliça plana | 8 |
| Figura 1.7 – Sistema de contraventamentos dos banzos superiores de vigas treliçadas | 9 |
| Figura 1.8 – Terços: a) em perfil formado a frio, b) em perfil laminado | 10 |
| Figura 1.9 – Perfis utilizados nas terços treliçadas | 11 |
| Figura 1.10 – Terço: a) biapoiada, b) contínua | 11 |
| Figura 1.11 – Continuidade em terços em perfil: a) com chapa, b) sem chapa. Fonte: METFORM [47] | 12 |
| Figura 1.12 – Continuidade de terços treliçadas | 13 |
| Figura 1.13 – Linhas de corrente em perfis. Fonte: METFORM [47] | 14 |
| Figura 1.14 – Linhas de corrente em terços treliçadas planas | 15 |
| Figura 1.15 – Terço treliçada multiplanar | 15 |
| Figura 1.16 – Perfil tubular usado por Zorès. Fonte Eekhout [20] | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 1.17 – Processos de laminação: a) Mannesmann, b) Pilger Process. Fonte: Wardenier [76] | 27 |
| Figura 1.18 – Ligações em perfis tubulares a) processo de soldagem contínua b) conector Mero. Fonte: Wardenier [76] e Eekhout [20]..... | 28 |
| Figura 1.19 – Sistema de treliças leves..... | 31 |
| Figura 2.1 – Grupos de perfis de aço: a) laminados, b) soldados, c) formados a frio | 36 |
| Figura 2.2 – Seções dos perfis laminados | 38 |
| Figura 2.3 – Curvas de resistência para determinação do esforço resistente a compressão..... | 39 |
| Figura 2.4 – Produção de perfil em perfiladeira. Fonte: Carvalho [13] | 42 |
| Figura 2.5 – Produção de perfil em dobradeira. Fonte: Yu [81] | 43 |
| Figura 2.6 – Seções dos perfis formados a frio | 44 |
| Figura 2.7 – Perfis estruturais presentes na NBR 6355/2003 [5] | 44 |
| Figura 2.8 – Aumento da resistência e diminuição da ductilidade. Fonte: Malite [45]..... | 45 |
| Figura 2.9 – Influência do trabalho a frio nas propriedades mecânicas do aço. Fonte: Malite [45] | 46 |
| Figura 2.10 – Definições e nomenclaturas: a) elementos não enrijecidos, b) elementos enrijecidos, c) enrijecedores, d) largura do elemento | 47 |
| Figura 2.11 – Flambagem de chapas: a) chapa quadrada, b) chapa retangular. Fonte: Malite [45] | 49 |
| Figura 2.12 – Gráfico com valores de k. Fonte: Malite [45] | 50 |
| Figura 2.13 – Chapa comprimida | 52 |
| Figura 2.14 – Distribuição de tensões. Fonte: Malite [45] | 53 |
| Figura 2.15 – Largura efetiva. Fonte: Malite [45] | 54 |
| Figura 2.16 – Exemplos de perfis utilizados em treliças | 58 |
| Figura 2.17 – Treliças Warren com e sem montantes | 59 |

| | |
|--|-----|
| Figura 2.18 – Exemplos de apoios das treliças planas | 60 |
| Figura 2.19 – Travamentos entre duas treliças planas: a) horizontal, b) diagonal | 60 |
| Figura 2.20 – Comparação das propriedades geométricas dos perfis. Adaptado de CIDECT [16] | 62 |
| Figura 3.1 – Tipos de perfis laminados disponíveis no programa..... | 66 |
| Figura 3.2 – Tipos de perfis formados a frio disponíveis no programa..... | 67 |
| Figura 3.3 – Área efetiva de um perfil..... | 68 |
| Figura 3.4 – Tensões em perfil comprimido e fletido | 69 |
| Figura 3.5 – Deslocamento do centro de gravidade | 70 |
| Figura 3.6 – Alteração nas tensões atuantes na alma | 72 |
| Figura 3.7 – Tela do programa AutoTerças..... | 73 |
| Figura 3.8 – Perfis laminados considerados pelo programa..... | 75 |
| Figura 3.9 – Dados para validação dos esforços resistentes..... | 78 |
| Figura 4.1 – Tela do programa AutoTruss 2.0 | 84 |
| Figura 4.2 – Disposição dos grupos | 85 |
| Figura 4.3 – Treliça com dois grupos de perfis | 86 |
| Figura 5.1 – Mapa de isopletas. Adaptado de NBR 6123/1988 [4]..... | 91 |
| Figura 5.2 – Coeficientes de forma externos. Fonte: NBR 6123/1988 [4]..... | 94 |
| Figura 5.3 – Gráfico das terças em perfil laminado | 100 |
| Figura 5.4 – Gráfico das terças em perfil formado a frio | 103 |
| Figura 5.5 – Tipos de treliças | 104 |
| Figura 5.6 – Tipos de treliças planas estudadas | 105 |
| Figura 5.7 – Variáveis consideradas na treliça..... | 108 |
| Figura 5.8 – Área de influência da treliça plana..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.9 – Travamentos dos nós das treliças planas..... | 109 |
| Figura 5.10 – Treliça multiplanar tipo Warren..... | 112 |
| Figura 5.11 – Travamentos do plano que contém os banzos superiores da treliça multiplanar .. | 113 |
| Figura 5.12 – Área de influência da treliça multiplanar | 113 |
| Figura 5.13 – Gráfico das terças treliçadas tubulares planas e multiplanares | 115 |
| Figura 5.14 – Tipos de terças treliçadas em perfis abertos..... | 116 |
| Figura 5.15 – Gráfico das terças treliçadas em perfis abertos | 118 |
| Figura 5.16 – Comparação das taxas das terças em perfil..... | 123 |
| Figura 5.17 – Comparação das taxas das terças treliçadas | 124 |
| Figura 5.18 – Comparação das taxas de todas as terças | 125 |
| Figura 5.19 – Esforço axial nos banzos da treliça | 126 |
| Figura 5.20 – Comparação dos custos das terças em perfil..... | 130 |
| Figura 5.21 – Comparação dos custos das terças treliçadas | 131 |
| Figura 5.22 – Comparação dos custos de todas as terças | 132 |
| Figura 5.23 – Custo do material | 134 |
| Figura 5.24 – Custo de fabricação | 134 |
| Figura 5.25 – Custo de montagem..... | 135 |
| Figura 5.26 – Custo total | 135 |
| Figura 5.27 – Armazenamento e transporte dos perfis Z | 138 |
| Figura C.1 – Tela inicial do programa AutoTerças | 177 |
| Figura C.2 – Escolha do tipo de análise | 178 |
| Figura C.3 – Escolha do tipo de aço..... | 178 |
| Figura C.4 – Tela do programa AutoTerças para perfis laminados..... | 179 |
| Figura C.5 – Fornecimento das dimensões dos perfis: a) formado a frio, b) laminado | 180 |

| | |
|--|-----|
| Figura C.6 – Fornecimento dos carregamentos | 181 |
| Figura C.7 – Resultados da verificação apresentados na tela..... | 182 |
| Figura C.8 – Arquivo de resultados..... | 183 |
| Figura C.9 – Seleção dos perfis para dimensionamento: a) todos os perfis, b) apenas o perfil selecionado | 184 |
| Figura C.10 – Lista de perfis: a) formados a frio, b) laminado | 185 |
| Figura C.11 – Resultados do dimensionamento apresentados na tela..... | 186 |
| Figura C.12 – Deslocamentos e rotações nas barras | 190 |
| Figura C.13 – Tela do programa AutoTruss 2.0..... | 191 |
| Figura C.14 – Modelos de treliça disponíveis no programa AutoTruss 2.0..... | 192 |
| Figura C.15 – Treliça plana e multiplanar disponíveis no programa AutoTruss 2.0 | 193 |
| Figura C.16 – Definição do tipo de material | 194 |
| Figura C.17 – Escolha do perfis | 194 |
| Figura C.18 – Definição dos carregamentos | 195 |
| Figura C.19 – Definição das combinações | 195 |
| Figura C.20 – Definição dos releases | 196 |
| Figura C.21 – Tela do AutorTruss 2.0 com os resultados | 197 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Alterações na determinação do momento fletor resistente de cálculo..... | 40 |
| Tabela 2.2 – Tabela com valores de k. Fonte: Carvalho [13]..... | 51 |
| Tabela 3.1 – Propriedades geométricas do perfil U laminado..... | 74 |
| Tabela 3.2 – Propriedades geométricas do perfil I laminado | 75 |
| Tabela 3.3 – Propriedades geométricas do perfil U laminado com faces internas das mesas inclinadas | 76 |
| Tabela 3.4 – Propriedades geométricas do perfil I laminado com faces internas das mesas inclinadas | 76 |
| Tabela 3.5 – Propriedades geométricas do perfil U formado a frio | 77 |
| Tabela 3.6 – Propriedades geométricas do perfil U enrijecido formado a frio | 77 |
| Tabela 3.7 – Propriedades geométricas do perfil Z enrijecido formado a frio..... | 78 |
| Tabela 3.8 – Esforços resistentes para o perfil laminado U 101,6x40,1x4,57x7,5 | 79 |
| Tabela 3.9 – Esforços resistentes para o perfil formado a frio Z 300x85x2..... | 79 |
| Tabela 3.10 – Perfil laminado U 101,6x40,1x4,57x7,5..... | 80 |
| Tabela 3.11 – Perfil laminado I 76x61x6,4x6,6 | 81 |
| Tabela 3.12 – Perfil laminado U 381x86,9x10,7x16,5..... | 81 |
| Tabela 3.13 – Perfil laminado I 305x136x14,4x16,7 | 81 |
| Tabela 4.1 – Número máximo de grupos de barras | 85 |
| Tabela 4.2 – Comparação do perfil tubular 101,6x5,7 | 87 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.3 – Comparação do perfil tubular 60,3x5,5 | 87 |
| Tabela 5.1 – Tabela para determinação do fator S2. Fonte: NBR 6123/1988 [4] | 92 |
| Tabela 5.2 – Coeficientes de ponderação das combinações | 95 |
| Tabela 5.3 – Terças em perfil U laminado | 99 |
| Tabela 5.4 – Terças em perfil I laminado | 99 |
| Tabela 5.5 – Terças em perfil U formado a frio | 101 |
| Tabela 5.6 – Terças em perfil U enrijecido formado a frio | 101 |
| Tabela 5.7 – Terças em perfil Z formado a frio..... | 102 |
| Tabela 5.8 – Terças em perfil Z enrijecido formado a frio..... | 102 |
| Tabela 5.9 – Análise inicial para escolha do tipo de treliça | 107 |
| Tabela 5.10 – Limites das alturas das treliças planas | 109 |
| Tabela 5.11 – Melhores alternativas..... | 111 |
| Tabela 5.12 – Terças treliçadas tubulares planas | 111 |
| Tabela 5.13 – Limites das alturas das treliças multiplanares | 114 |
| Tabela 5.14 – Terças treliçadas tubulares multiplanares | 114 |
| Tabela 5.15 – Terças treliçadas em perfis abertos..... | 117 |
| Tabela 5.16 – Custos das terças em perfil em R\$/kg | 120 |
| Tabela 5.17 – Custos das terças treliçadas em R\$/kg..... | 120 |
| Tabela 5.18 – Custos das terças em perfil em R\$/m ² | 122 |
| Tabela 5.19 – Custos das terças treliçadas em R\$/m ² | 122 |
| Tabela 5.20 – Valores adotados para os custos das terças em perfil | 128 |
| Tabela 5.21 – Valores adotados para os custos das terças treliçadas | 128 |
| Tabela 5.22 – Custo total das terças em perfil..... | 129 |
| Tabela 5.23 – Custo total das terças treliçadas..... | 129 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.24 – Melhores modelos de terças..... | 137 |
| Tabela B.1 – Determinação das curvas de flambagem para seções U e Z de perfil formado a frio. Adaptado de NBR 14762/2001 [9]..... | 167 |
| Tabela C.1 – Lista de perfis laminados | 187 |
| Tabela C.2 – Lista de perfis formados a frio | 189 |

LISTA DE SÍMBOLOS

a) Letras romanas maiúsculas

A_e – Área líquida efetiva da seção transversal da barra

A_{ef} – Área efetiva da seção transversal da barra

A_g – Área bruta da seção transversal da barra

A_n – Área líquida da seção transversal da barra

C_b – Coeficiente de equivalência de momento na flexão

C_e ; C_i – Coeficiente de forma externo e interno, respectivamente

C_{mx} ; C_{my} – Coeficientes de equivalência de momento na flexão composta, em relação aos eixos x e y , respectivamente

C_t – Coeficiente de redução da área líquida

C_w – Constante de empenamento da seção

D – Diâmetro externo da seção transversal tubular circular

E – Módulo de elasticidade

G – Módulo de elasticidade transversal do aço

I_{ef} – Momento de inércia da seção efetiva

I_{max} – Momento de inércia máximo

I_{min} – Momento de inércia mínimo

I_t – Momento de inércia a torção

$I_x ; I_y$ – Momento de inércia da seção bruta em relação aos eixos x e y , respectivamente
 I_{xy} – Produto de inércia da seção em relação ao sistema de coordenadas xy
 $I_1 ; I_2$ – Momento de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais 1 e 2 , respectivamente
 J – Momento de inércia a torção
 K – Coeficiente de flambagem
 $K_x L_x ; K_y L_y$ – Comprimento de flambagem por flexão em relação aos eixos x e y , respectivamente
 $K_t L_t$ – Comprimento de flambagem por torção
 L – Vão, em geral
 L_v – Distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula
 L_x – Comprimento destravado da barra em relação ao eixo x
 L_y – Comprimento destravado da barra em relação ao eixo y
 M – Momento fletor, em geral
 M_{dist} – Momento fletor de flambagem por distorção
 M_e – Momento fletor de flambagem elástica
 M_{Rd} – Momento fletor resistente de cálculo
 M_{Sd} – Momento fletor solicitante de cálculo
 $M_{x,Rd} ; M_{y,Rd}$ – Momento fletor resistente de cálculo em relação aos eixos x e y , respectivamente
 $M_{xt,Rd} ; M_{yt,Rd}$ – Momento fletor resistente de cálculo em relação aos eixos x e y , respectivamente, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta
 $M_{1,Rd} ; M_{2,Rd}$ – Momento fletor resistente de cálculo em relação aos eixos principais 1 e 2 , respectivamente
 N – Força normal, em geral
 $N_{c,Rd}$ – Força normal de compressão resistente de cálculo
 $N_{c,Sd}$ – Força normal de compressão solicitante de cálculo

N_e – Força normal de flambagem elástica

$N_{t,Rd}$ – Força normal de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$ – Força normal de tração solicitante de cálculo

$N_{0,Rd}$ – Força normal de compressão resistente de cálculo, com $\rho = 0$

Q – Fator de redução total associado à flambagem local

S_1 – Fator topográfico

S_2 – Fator que depende da rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

S_3 – Fator estatístico

V_k – Velocidade característica do vento

V_{pl} – Força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento

V_{Rd} – Força cortante resistente de cálculo

V_{Sd} – Força cortante solicitante de cálculo

V_0 – Velocidade básica do vento

W – Módulo de resistência elástico mínimo da seção bruta

W_c – Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida

$W_{c,ef}$ – Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida

W_{ef} – Módulo de resistência elástico da seção efetiva

$W_x ; W_y$ – Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação aos eixos x e y , respectivamente

$W_{xt} ; W_{yt}$ – Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação aos eixos x e y , respectivamente, com relação à fibra tracionada

$Z_x ; Z_y$ – Módulo de resistência plástico da seção bruta em relação aos eixos x e y , respectivamente

b) Letras romanas minúsculas

a – Comprimento da chapa; distância entre enrijecedores transversais

b – Largura efetiva do elemento

d – Altura total da seção transversal

f – Tensão

f_{cr} – Tensão crítica

f_{max} – Tensão máxima

f_x – Tensão de compressão atuante na direção x

f_y – Tensão de escoamento do aço

f_u – Tensão de ruptura do aço

h – Altura da treliça; altura da alma

k – Coeficiente de flambagem local

k_v – Coeficiente de flambagem local por cisalhamento

m – Número de meia onda

q – Pressão de obstrução do vento; carga distribuída ao longo de uma barra

r – Raio de giração, em geral

r_x ; r_y – Raio de giração da seção bruta em relação aos eixos x e y, respectivamente

r_0 – Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento

t – Espessura da chapa ou do elemento

t_w – Espessura da alma

w – Largura da chapa

x_{cg} – Coordenada do centro de gravidade, na direção do eixo x, em relação à face externa do perfil

x_0 ; y_0 – Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção

c) Letras gregas maiúsculas

α – Menor ângulo formado entre o eixo x e o eixo principal de maior inércia

γ – Coeficiente de ponderação das ações ou das resistências

λ – Comprimento de onda; índice de esbeltez

λ_{dist} – Índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção

λ_p – Índice de esbeltez reduzido da chapa ou do elemento

λ_0 – Índice de esbeltez reduzido da barra

ν – Coeficiente de poisson

ρ – Fator de redução associado à flambagem da barra

ρ_{FLT} – Fator de redução associado à flambagem lateral com torção da barra

σ – Tensão normal, em geral

τ – Tensão de cisalhamento, em geral

χ – fator de redução associado à flambagem da barra

ψ_0 – Fator de combinação para as combinações últimas das ações

ψ_2 – Fator de utilização para as combinações de serviço das ações

ω – Deslocamento perpendicular ao plano da chapa

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Considerações Gerais | 1 |
| 1.1.1 Principais Elementos de uma Cobertura Metálica..... | 2 |
| 1.1.2 Terças Metálicas | 9 |
| 1.2 Histórico | 16 |
| 1.2.1 Perfis Laminados | 18 |
| 1.2.2 Perfis Formados a Frio | 21 |
| 1.2.3 Perfis Tubulares | 25 |
| 1.2.4 Terças Trelaçadas | 30 |
| 1.3 Proposta de Trabalho | 32 |
| 2. ESTUDOS PRELIMINARES | 35 |
| 2.1 Terças em Perfil Laminado..... | 37 |
| 2.2 Terças em Perfil Formado a Frio..... | 41 |
| 2.3 Terças Trelaçadas em Perfis Abertos | 57 |
| 2.4 Terças Trelaçadas Tubulares | 61 |
| 3. O PROGRAMA AUTOTERÇAS | 65 |
| 3.1 Terças em Perfil Laminado..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| 3.2 Terças em Perfil Formado a Frio..... | 67 |
| 3.3 Utilização do Programa | 72 |
| 3.4 Validação do Programa | 74 |
| 3.5 Comparações entre a NBR 8800/1986 e a NBR 8800/2008 | 80 |
| 4. O PROGRAMA AUTOTRUSS | 83 |
| 4.1 Comparações entre a NBR 8800/1986 e a NBR 8800/2008 | 86 |
| 5. ANÁLISES DAS TERÇAS | 89 |
| 5.1 Carregamentos Atuantes nas Terças..... | 90 |
| 5.2 Análise das Terças em Perfil | 97 |
| 5.2.1 Terças em Perfil Laminado..... | 98 |
| 5.2.2 Terças em Perfil Formado a Frio..... | 100 |
| 5.3 Análise das Terças Treliçadas Tubulares | 104 |
| 5.3.1 Terças Treliçadas Tubulares Planas | 104 |
| 5.3.2 Terças Treliçadas Tubulares Multiplanares..... | 112 |
| 5.4 Análise das Terças Treliçadas em Perfis Abertos | 115 |
| 5.5 Análise de Custo..... | 118 |
| 5.6 Comparações | 123 |
| 5.6.1 Comparações dos Pesos..... | 123 |
| 5.6.2 Comparações dos Custos..... | 127 |
| 5.6.3 Comparações dos Custos Intermediários..... | 133 |
| 5.7 Investigação das Melhores Terças | 137 |
| 6. Considerações Finais | 141 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 145 |
| ANEXOS | 153 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO A – TABELAS DAS ANÁLISES REALIZADAS COM O AUTOTRUSS | 155 |
| A.1. Terças Treliçadas Planas | 155 |
| A.2. Terças Treliçadas Multiplanares..... | 157 |
| ANEXO B – PROCEDIMENTOS DE NORMA..... | 159 |
| B.1. Determinação dos Esforços Resistentes dos Perfis Laminados | 159 |
| B.2. Determinação dos Esforços Resistentes dos Perfis Formados a Frio | 165 |
| ANEXO C – DETALHES SOBRE OS PROGRAMAS..... | 177 |
| C.1. Programa AutoTerças | 177 |
| C.1.1 Verificação..... | 178 |
| C.1.2 Dimensionamento | 183 |
| C.1.3 Listas de Perfis..... | 186 |
| C.2. Programa AutoTruss 2.0..... | 189 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A utilização das estruturas metálicas na construção civil vem crescendo e se firmando como uma ótima solução para a execução de obras de médio e grande porte, principalmente quando o uso da estrutura requer a existência de grandes áreas livres, sem a presença de muitos pilares internos.

Esse bom comportamento das estruturas metálicas para obras de grandes vãos se deve a elevada resistência mecânica do aço e a existência de diferentes tipos de perfis, que são apropriados para as mais diversas situações de projeto.

Outra grande vantagem das estruturas metálicas que permite a sua utilização para grandes vãos, é a possibilidade de unir os perfis metálicos formando treliças, cujas barras trabalham sobretudo a tração e compressão, extraindo o máximo da resistência dos perfis e resultando em estruturas leves.

Uma estrutura pode ser feita totalmente em estrutura metálica, ou através de uma mescla de dois ou mais tipos de estruturas, como por exemplo, estrutura metálica e de concreto. Essa mescla é muito utilizada no Brasil em galpões industriais, comerciais e de armazenamento, onde as colunas são feitas em concreto e a cobertura, pela necessidade de grandes áreas livres internas, é feita com estruturas metálicas. Portanto, pode-se notar que a cobertura metálica é um tipo de estrutura metálica muito comum de ser executado atualmente no Brasil, o que motivou o desenvolvimento desse projeto.

Dentre os elementos componentes de um sistema de cobertura, foram estudadas as terças metálicas, analisando os principais tipos usados nas coberturas metálicas, com o objetivo de buscar as melhores soluções de terças com relação aos vãos a serem cobertos e às cargas atuantes na cobertura.

Os resultados finais deste trabalho possibilitam evitar desperdícios de material com a utilização de soluções que não conduzem as melhores soluções de terças, e reduzir o peso final do sistema de cobertura metálico, aliviando o carregamento atuante sobre o restante da estrutura e sobre a fundação, o que resulta em redução do custo da obra.

1.1.1 Principais Elementos de uma Cobertura Metálica

Sabe-se que, em determinadas situações, o fator tempo é extremamente importante para a finalização de uma obra, e nesses casos, a utilização de coberturas em estruturas metálicas é uma das soluções mais adotadas.

Um dos fatos que permitem essa rapidez de execução de uma cobertura em estrutura metálica é que os elementos que a constituem são pré-fabricados, ou seja, já chegam na obra prontos para serem montados, bastando apenas posicioná-los nos locais corretos e unir todos os elementos.

A possibilidade de trabalhar com elementos pré-fabricados, além de acelerar o processo de montagem da estrutura, também garante um aumento na produtividade e na qualidade da construção.

Esses elementos que compõem uma cobertura metálica são, basicamente, as estruturas principais, como vigas ou treliças, as terças, os contraventamentos e as telhas, conforme pode ser observado na Figura 1.1.

As telhas são responsáveis por proteger o interior das construções das intempéries do tempo, funcionando como elementos de vedação, além de transmitir os esforços provenientes do vento ao restante da estrutura. Existem diversos tipos de telhas, que podem ser utilizados em uma cobertura, como as telhas cerâmicas, de fibrocimento, de aço galvanizado, de alumínio e de PVC, dependendo do tipo de estrutura que será construído e do carregamento de vento atuante no local.

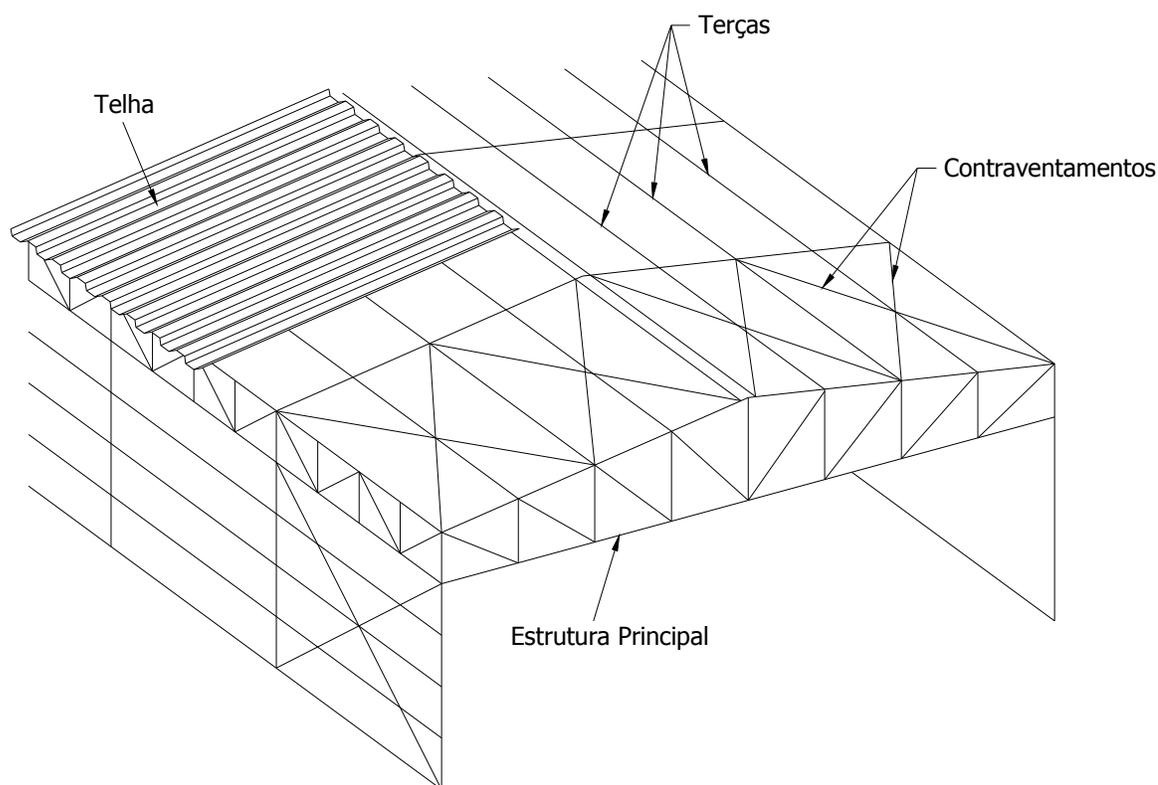


Figura 1.1 – Principais elementos que compõem uma cobertura metálica

As telhas de aço são as mais utilizadas em coberturas metálicas, por serem leves e se adaptarem aos vãos praticados nessas estruturas. Outra vantagem é o fato de serem disponibilizadas em grandes comprimentos, tornando mais rápido o processo de cobertura da estrutura, pois uma grande área pode ser coberta rapidamente com apenas uma telha. A telha é fornecida com o comprimento exato solicitado, evitando desperdícios, variando em torno de 6,0 m e podendo atingir até 12,0 m. Existem espessuras variadas, de acordo com a disposição dos elementos estruturais da cobertura.

As telhas de aço são comercializadas com seções onduladas ou trapezoidais, e necessitam de uma inclinação mínima de 5% para garantir o escoamento da água. A sua fixação nas terças pode ser feita através de ganchos ou parafusos autobrocantes, conforme a Figura 1.2.

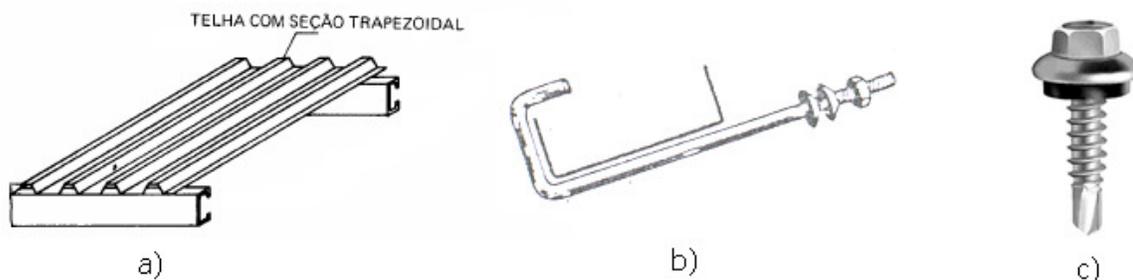


Figura 1.2 – Telha metálica: a) telha apoiada na terça, b) gancho para fixação da telha, c) parafuso autobrocante. Adaptado de CBCA [33], Pugliesi [55] e Faz Fácil [24]

Outro tipo de telha de aço comumente utilizado para coberturas de grandes estruturas, é a telha zipada, que requer inclinações próximas a 3%. A sua fixação na terça é feita através de clips, e a fixação das telhas nos clips é feito através de um equipamento especial, conforme a Figura 1.3.

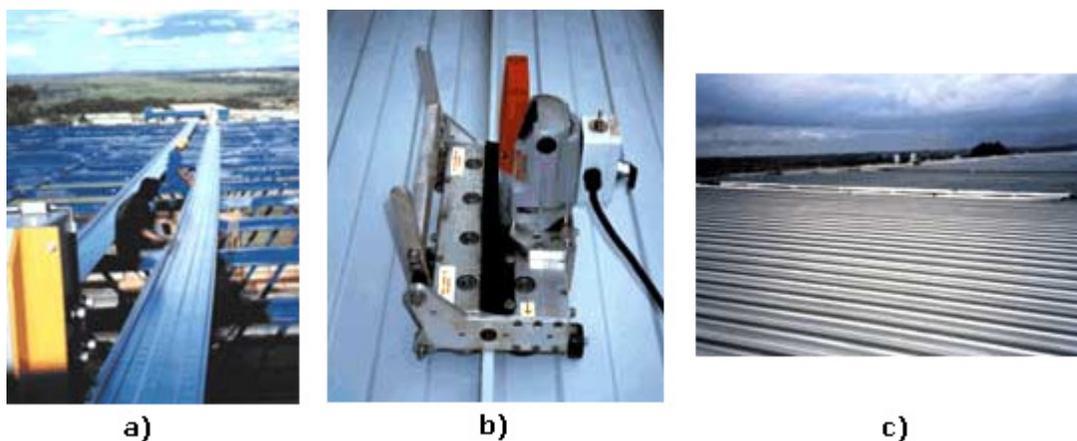


Figura 1.3 – Telha zipada: a) colocação da telha, b) fixação nos clips, c) cobertura finalizada. Fonte: Metálica [46]

As telhas de alumínio são uma alternativa, apresentando um peso menor que as telhas de aço, porém são mais caras. Já as telhas de fibrocimento são bem mais pesadas que as telhas de aço e alumínio, além de serem fornecidas em comprimentos menores, pré-definidos pelos fabricantes, geralmente entre 1,53 m e 2,44 m.

Nos casos onde existe a necessidade de um isolamento térmico ou acústico, podem ser utilizadas as telhas termo-acústicas, também conhecidas como telhas sanduíche, que são compostas por duas telhas de aço convencionais, com um material isolante entre elas, conforme a Figura 1.4. Como alternativa para tornar o conjunto mais leve, também é possível utilizar apenas uma telha superior e uma chapa fina de aço substituindo a telha inferior.



Figura 1.4 – Telhas termo-acústicas. Fonte: Metálica [46]

Nos estudos realizados neste trabalho, será admitida a utilização das telhas de aço para as coberturas, por ser a solução que se adéqua melhor às coberturas metálicas.

As terças são utilizadas como suporte para as telhas, e também ajudam na estabilidade global da estrutura. Devem resistir à carga de vento proveniente das telhas, à sobrecarga e ao peso próprio das telhas, além das demais cargas permanentes ou variáveis que vierem a atuar sobre a terça. O seu posicionamento e espaçamento dependem do carregamento aplicado e do tipo de telha utilizado.

Devido à inclinação do telhado, os carregamentos atuam nos dois eixos principais das terças, ocorrendo uma flexão oblíqua. No caso das terças que fazem parte do contraventamento da estrutura, como entre o primeiro e o segundo pórtico, também existe uma carga aplicada no eixo da terça, sendo então dimensionada a flexão composta.

As terças podem ser biapoiadas ou contínuas, e pode ser necessária a existência de travamentos intermediários, também conhecidos como linhas de corrente, para conter lateralmente as terças. A quantidade de linhas de corrente varia de acordo com o vão a ser vencido pela terça.

Os tipos de terças mais utilizados são as em perfil formado a frio ou laminado, e as treliçadas planas, também conhecidas como *joists*, que são treliças leves. Um outro modelo que não é muito utilizado, mas que está incluído nesse estudo por apresentar bons resultados para grandes vãos, é a terça treliçada multiplanar. Esses tipos de terças são apresentados na Figura 1.5.

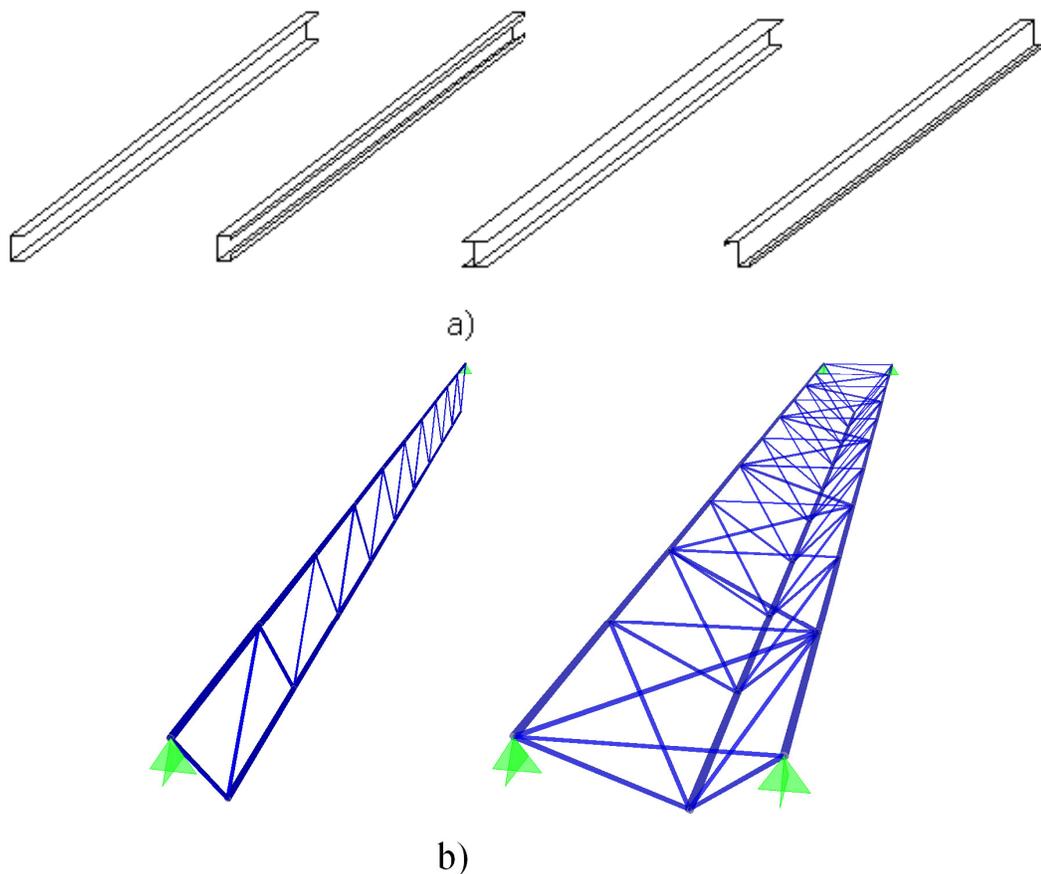


Figura 1.5 – Tipos de terças: a) terças em perfil, b) terças treliçadas

As travessas de fechamento, ou longarinas, também são muito utilizadas como apoios para os fechamentos laterais e frontais feitos em chapas ou telhas metálicas. O seu comportamento é muito semelhante ao das terças, sendo que nesse caso, os perfis devem ser posicionados horizontalmente e resistir às cargas de vento e ao peso próprio dos fechamentos. Mais detalhes sobre as terças metálicas são fornecidos no próximo item deste capítulo.

A estrutura principal serve como apoio para as terças transmitindo os esforços para as colunas da estrutura, que por sua vez, transmitem os esforços para as fundações. Pode ser constituída por vigas em perfis de alma cheia ou por vigas em treliças planas.

As vigas em perfil de alma cheia são feitas normalmente em perfis laminados ou soldados, e têm como vantagem o tempo e o custo de fabricação reduzidos, facilidade de montagem e maior altura livre abaixo da viga, já que a altura da mesma geralmente é inferior a de uma treliça. Os perfis mais utilizados são aqueles que possuem maior momento de inércia no plano de flexão. Na Figura 1.6a é apresentado um exemplo de viga em perfil.

Para grandes vãos, as vigas em perfil resultam em estruturas pouco econômicas, sendo recomendado o uso de treliças planas. Um exemplo de viga treliçada é apresentado na Figura 1.6b.

Os perfis utilizados para compor as treliças podem ser perfis abertos, como cantoneiras e perfis U, ou perfis tubulares circulares, retangulares ou quadrados. As terças devem ser posicionadas sobre os nós das vigas, para evitar a flexão no banzo superior da treliça. O mesmo vale para as demais cargas adicionais, tanto no banzo superior quanto no banzo inferior.

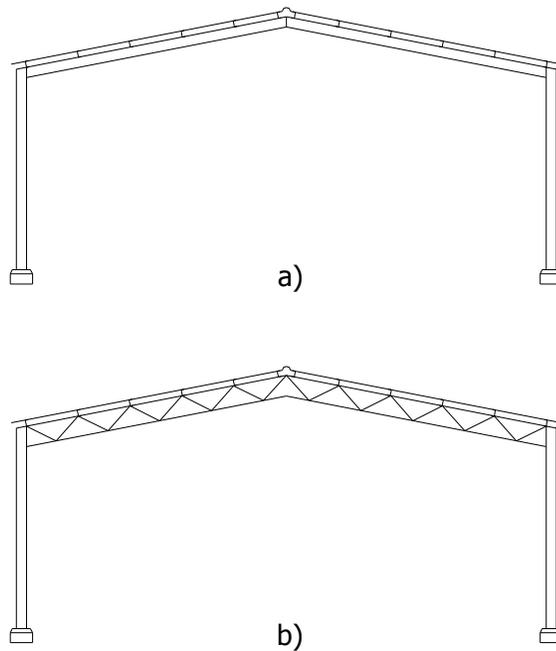


Figura 1.6 – Exemplos de vigas da estrutura principal: a) em perfil, b) em treliça plana

Os contraventamentos têm por finalidade garantir a estabilidade global da estrutura, sendo de extrema importância para o seu bom comportamento e funcionamento. Normalmente são utilizados perfis esbeltos, como cantoneiras e barras redondas, fazendo com que trabalhem, sempre que possível, somente com esforços de tração.

A presença dos contraventamentos pode ser notada entre as terças, como linhas de corrente, utilizando-se normalmente barras redondas, e entre duas vigas adjacentes, já que apenas a presença das terças não garante a estabilidade lateral das vigas.

Caso a viga seja uma treliça, é necessário realizar o contraventamento dos banzos superiores, normalmente feitos com treliças no plano dos banzos superiores, e dos banzos inferiores, podendo ser feitos com treliças verticais ou mãos-francesas. Os contraventamentos dos banzos superiores de vigas treliçadas aparecem em destaque na Figura 1.7.

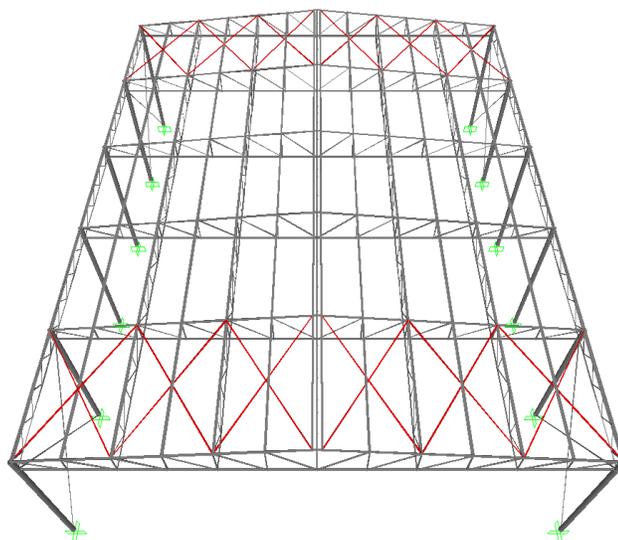


Figura 1.7 – Sistema de contraventamentos dos banzos superiores de vigas treliçadas

Dependendo do sistema estrutural adotado, também pode ser necessário realizar o contravento entre duas colunas adjacentes.

1.1.2 Terças Metálicas

Segundo Schulte [67], a utilização de vigas de alma cheia é mais racional para vãos pequenos, devido ao menor trabalho na sua execução e à maior simplicidade na sua manutenção. A medida que o vão aumenta, a utilização de vigas de alma cheia não representa a solução mais econômica.

Para vencer grandes vãos, os perfis das vigas de alma cheia necessários para resistir aos esforços atuantes são maiores, e tornam-se muito pesados a partir de certo comprimento, que depende da intensidade do carregamento aplicado na terça. A determinação da seção transversal dos perfis está relacionada com o momento fletor atuante na seção crítica da terça, que é proporcional ao quadrado do seu comprimento entre apoios. Assim, torna-se difícil prever até qual vão a utilização de perfis é vantajosa.

A partir do ponto em que os perfis abertos deixam de ser uma solução economicamente viável, passa-se a utilizar as terças treliçadas planas. Como alternativa, também podem ser utilizadas as terças treliçadas multiplanares, que são pouco aproveitadas nas coberturas metálicas atuais no Brasil, não havendo, portanto, um dado concreto sobre a partir de qual vão ou carregamento torna-se viável a sua utilização. Portanto, a idéia desse trabalho é investigar quais são esses pontos limites para a utilização dos tipos de terças citados acima, analisando-se vãos de até 40 metros.

Nos primeiros projetos de coberturas metálicas, as terças em perfil laminado foram bastante utilizadas. Porém, com o crescimento dos perfis formados a frio, estes acabaram substituindo as terças em perfil laminado, devido a possibilidade de obter perfis com as dimensões necessárias para resistir aos esforços atuantes, permitindo um melhor aproveitamento e conseqüente redução do peso da terça. Essa flexibilidade permitida pelos perfis formados a frio é possível devido a sua confecção a partir da dobragem de chapas finas, sendo possível regular as máquinas para fornecer perfis com as dimensões desejadas. A mesma flexibilidade não é obtida com os perfis laminados, pois as dimensões dos mesmos já são pré-definidas e os perfis são produzidos em larga escala nos processos de laminação a quente.

As seções mais utilizadas para as terças em perfil formado a frio e laminado são apresentados na Figura 1.8.

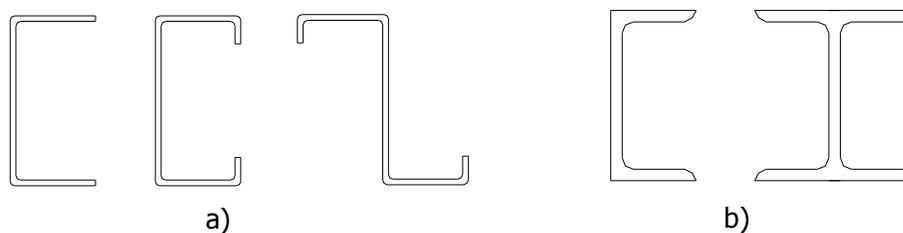


Figura 1.8 – Terças: a) em perfil formado a frio, b) em perfil laminado

Os perfis mais usuais para as barras das terças treliçadas planas são os perfis abertos, como cantoneiras ou perfis U, porém, a crescente utilização de perfis tubulares abriu uma nova

possibilidade de aplicação dos tubos nas barras de terças treliçadas, conforme pode ser observado na Figura 1.9. Os mesmos perfis utilizados para as terças treliçadas planas podem ser aplicados nas terças treliçadas multiplanares.

As terças podem ser consideradas biapoiadas ou contínuas, influenciando o seu dimensionamento, já que a distribuição do momento fletor ao longo da terça contínua é diferente da distribuição em uma terça biapoiada, conforme pode ser observado na Figura 1.10.

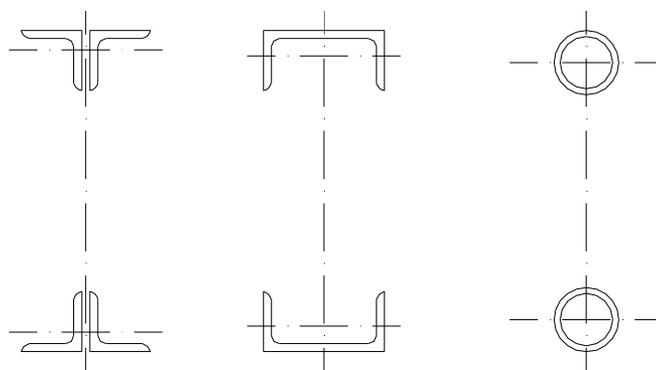


Figura 1.9 – Perfis utilizados nas terças treliçadas

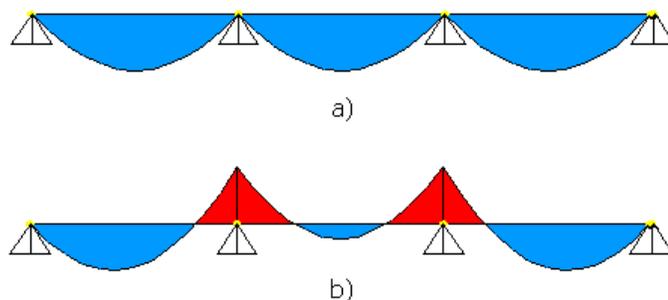


Figura 1.10 – Terça: a) biapoiada, b) contínua

Os momentos fletores no meio do vão e nas extremidades das terças contínuas com dois ou mais apoios internos são menores, em módulo, do que o momento fletor no meio do vão de uma terça biapoiada. Esse fato pode trazer benefícios no caso de terças em perfil, pois, como o

perfil da terça é o mesmo ao longo de todo o vão, pode-se obter um perfil menor para o caso de terça contínua.

A situação das terças treliçadas é um pouco diferente, pois em algumas situações pode ser viável variar os perfis utilizados na treliça ao longo do vão. Caso exista essa variação e a terça seja biapoiada, os perfis dos banzos serão maiores no meio do vão e menores nas extremidades, onde o momento fletor é muito pequeno. Ao levar em consideração a continuidade, será possível diminuir os perfis na região central do vão, porém, os perfis das extremidades estarão mais solicitados, podendo ser necessário utilizar perfis maiores. Portanto, a consideração da continuidade das terças treliçadas pode trazer ou não benefícios com relação ao peso final das mesmas, dependendo dos perfis que são utilizados para compor a treliça.

Para garantir que haja continuidade entre duas terças em perfil, é necessário que os seus elementos, como almas e mesas, estejam conectados. Isso pode ser feito através de solda executada em campo, o que não é muito recomendado, ou através de ligações parafusadas com chapas, conforme a Figura 1.11a.

Uma alternativa para a utilização das chapas pode ser conseguida com os perfis tipo Z simples ou enrijecidos, que podem ser encaixados sobre um outro perfil de iguais dimensões. Unindo-se esses perfis com parafusos, é possível obter a continuidade desejada, conforme a Figura 1.11b.

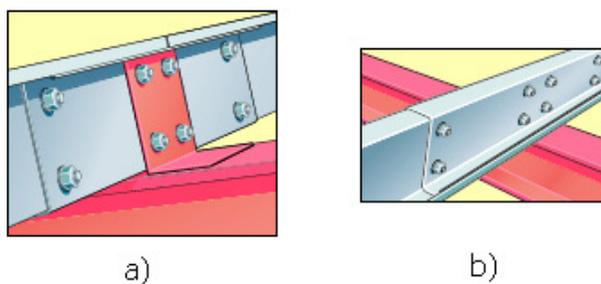


Figura 1.11 – Continuidade em terças em perfil: a) com chapa, b) sem chapa. Fonte: METFORM [47]

Para as terças treliçadas, a continuidade pode ser obtida com a ligação do banzo inferior na viga principal, permitindo o aparecimento de forças axiais nas extremidades dos banzos superior e inferior, ou seja, existe um binário de forças na extremidade da terça, que provoca um momento fletor. Assim, fica garantida a continuidade da terça, como apresentado na Figura 1.12.

Porém, a utilização dos métodos citados acima não garante uma total continuidade da terça. O ideal é realizar ensaios para saber qual o grau de engastamento provocado por cada tipo de ligação, possibilitando determinar quais os reais esforços atuantes ao longo da terça.

Como as terças em perfil laminado ou formado a frio são posicionadas de modo que os maiores carregamentos sejam perpendiculares ao eixo de maior inércia, existe a possibilidade de ocorrência de flambagem lateral com torção, que torna-se mais crítico quanto maior for o vão da terça.

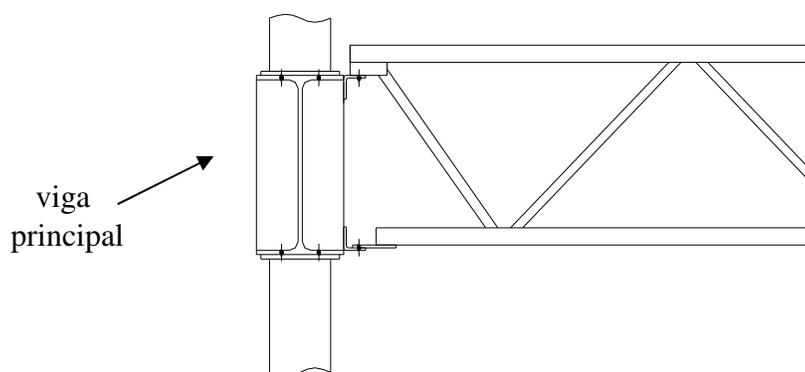


Figura 1.12 – Continuidade de terças treliçadas

Existem algumas telhas metálicas que ao serem conectadas às terças, garantem a estabilidade lateral das mesmas. Nesses casos devem ser feitas as devidas verificações para essa situação específica, sendo que a interação entre as telhas e as terças não é muito simples. A NBR 14762/2001 [9] propõe em seu anexo F um método de cálculo para levar em consideração essa interação para o caso de painéis conectados a mesa tracionada de um perfil, tendo a mesa comprimida livre.

Nos casos em que as telhas não garantem a estabilidade lateral das terças, existe a necessidade de utilizar travamentos, denominados linhas de corrente, contendo a terça lateralmente. A quantidade de linhas de corrente depende do vão que a terça está vencendo, podendo ser utilizados ferros redondos ou cantoneiras, conforme a Figura 1.13 que ilustra a fixação de linhas de corrente em terças em perfil.

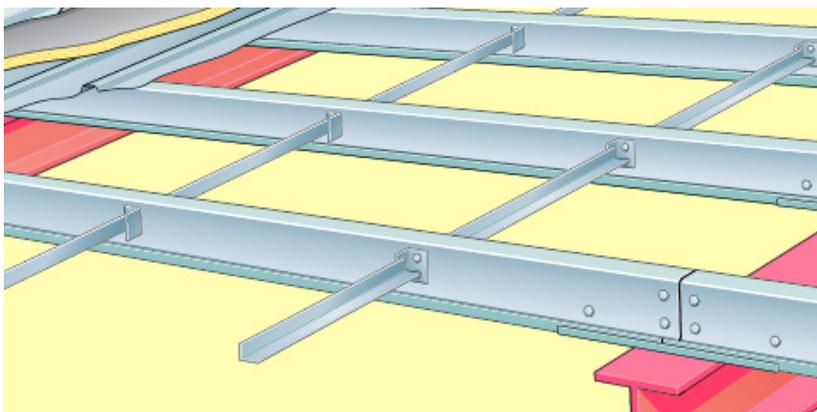


Figura 1.13 – Linhas de corrente em perfis. Fonte: METFORM [47]

Nos casos de terças treliçadas planas, também existe a necessidade da utilização das linhas de corrente, sendo necessário travar os banzos superior e inferior da treliça, pois no caso de um carregamento gravitacional, o banzo superior estará comprimido, enquanto que no caso de um carregamento de sucção, a compressão ocorrerá no banzo inferior. Esses travamentos das terças treliçadas planas podem ser feitos em cantoneiras ou ferros redondos, conforme a Figura 1.14.

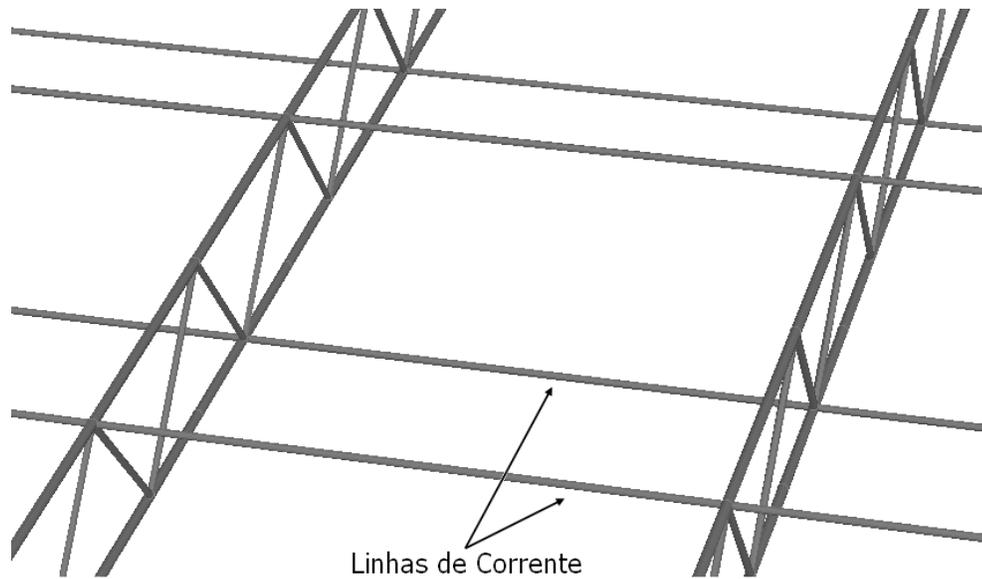


Figura 1.14 – Linhas de corrente em terças treliçadas planas

As terças treliçadas multiplanares dispensam a utilização de linhas de corrente, pois, o seu arranjo com os dois banzos superiores e o banzo inferior formando uma seção triangular, e a presença de montantes e diagonais de travamento entre os dois banzos superiores, proporcionam a rigidez necessária para a terça em todas as direções, como pode ser observado na Figura 1.15.

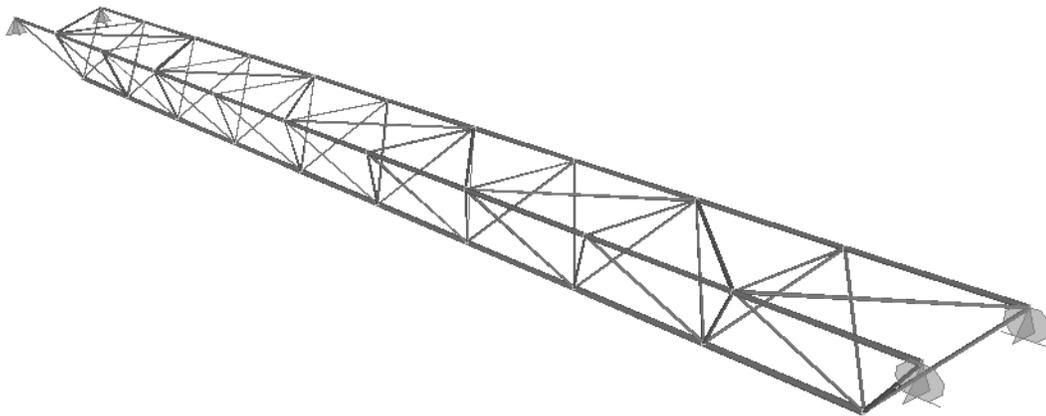


Figura 1.15 – Terça treliçada multiplanar

A utilização das terças treliçadas requer uma atenção especial para as ligações das diagonais e montantes com os banzos das treliças. Os banzos geralmente são compostos por perfis U, dupla cantoneira, T e tubos circulares ou retangulares. Já as diagonais e montantes normalmente são em dupla cantoneira ou perfis tubulares.

No caso de treliças compostas por perfis abertos, as ligações das diagonais e montantes com os banzos normalmente são feitas com a utilização de chapas de ligação, podendo ser soldadas ou parafusadas nos perfis. Porém, dependendo dos perfis utilizados, também existe a possibilidade de executar as ligações sem a presença das chapas, soldando ou parafusando diretamente um perfil ao outro.

Já para as treliças compostas por perfis tubulares, as ligações podem ser totalmente soldadas, sem a presença de chapas, realizando cortes retos nas diagonais e montantes, quando possível, ou utilizando máquinas específicas de corte a plasma que permitem um encaixe perfeito entre os tubos. Alternativas consistem em realizar a ligação com a presença de uma chapa soldada tanto no banzo quanto na diagonal ou montante, ou com duas chapas de ligação, sendo uma soldada no banzo e a outra na diagonal ou montante, unindo as duas através de parafusos. Ligações em que as pontas dos tubos das diagonais ou montantes são amassadas e ligadas por parafusos a uma chapa soldada no banzo são bastante utilizadas, principalmente em estruturas espaciais. Esse tipo de ligação é possível de ser executado, porém, devem ser tomados os cuidados necessários, já que estudos como o apresentado por Mistakidis [49] indicam a presença de um modo de falha relacionado com a plastificação excessiva na região próxima a ponta amassada, que pode conduzir, em alguns casos, a redução da capacidade de resistência a compressão do tubo.

1.2 Histórico

O conhecimento da produção e utilização do ferro é muito antigo, sendo amplamente aplicado na fabricação de armamentos, como espadas e armaduras, nos períodos dos impérios grego e romano. Segundo Eekhout [20], os primeiros relatos da utilização do ferro em uma

estrutura no ocidente datam também desta época, onde os gregos utilizaram barras de ferro como reforço em templos.

Não existem relatos da utilização do ferro para fins estruturais até a era medieval, onde alguns componentes de ferro eram ocasionalmente utilizados nas construções de catedrais. Porém, o ferro foi raramente incorporado como um elemento estrutural até o século 18.

O início da utilização do ferro em obras estruturais só foi possível com a descoberta do método de produção industrial do mesmo, no início do século 18, o que barateou o seu custo de produção, tornando a sua utilização mais viável. Nesse período, o ferro fundido foi muito empregado em colunas, como na House of Commons, em Londres, em 1706, proporcionando uma maior resistência ao fogo, quando comparado com as colunas de madeira utilizadas na época.

Entretanto, as primeiras obras que utilizaram o ferro como elemento estrutural principal datam da segunda metade do século 18. Conforme Pfeil [54], entre 1780 e 1820 foram construídas pontes em arco ou treliçadas, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão. A primeira ponte em ferro fundido foi a de Coalbrookdale, sobre o rio Severn, construída na Inglaterra em 1779, constituída por um arco de 30,0 m de vão. Posteriormente, por volta de 1780, o ferro foi empregado na construção da escadaria do Louvre e no Teatro de Palais Royal.

A revolução industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século 18, e que se expandiu para o mundo no século 19, assim como o advento do motor a vapor e das locomotivas, incentivaram a utilização do ferro, principalmente na confecção de trilhos para ferrovias.

Na primeira metade do século 19, ocorreu um aperfeiçoamento da construção metálica, conforme Schulte [67], com a utilização de esquemas estaticamente lógicos, o melhoramento da matéria prima com o início da laminação de perfis, e a construção de edifícios industriais metálicos.

Segundo Salmon [60], após 1840, o ferro laminado começou a substituir o ferro fundido, como por exemplo, na ponte Britannia Bridge, construída em 1850, no País de Gales.

O início do processo de produção de perfis em ferro fundido e laminado em escala industrial se deu por volta de 1780, com o início da produção de trilhos por volta de 1820. Essa produção se estendeu para a fabricação de perfis I em 1870.

Conforme menciona Pfeil [54], as obras mais importantes construídas entre 1850 e 1880 foram pontes ferroviárias em treliça de ferro laminado. Porém, o grande número de acidentes ocorridos nestas obras trouxe à tona a necessidade de novos estudos para encontrar um material com melhores características.

1.2.1 Perfis Laminados

O aço já era conhecido desde a Antiguidade, porém, não era utilizado devido a falta de um processo de produção industrial, o que elevava o seu preço. Foi então que o inglês Henry Bessemer inventou, em 1856, um forno para a produção do aço em larga escala, o que se deu por volta de 1870.

Novos fornos de maior capacidade foram então desenvolvidos, como feito em 1864, pelos irmãos Martin. Posteriormente surgiu o processo Siemens – Martin, em 1867, e por volta de 1880 foram introduzidos os laminadores de barras. Com esses novos desenvolvimentos, o aço substituiu o ferro laminado como o principal material da indústria de construção metálica.

No século 20, conforme Schulte [67], ocorreu um aperfeiçoamento das formas e teorias das estruturas, e com a invenção da solda elétrica, o aço foi largamente utilizado em construções industriais, civis e de pontes. A partir de 1940, a teoria das estruturas metálicas se desenvolveu, com a consideração da plasticidade do material e o aperfeiçoamento da matéria prima. Como resultado, os aços de maior resistência passaram a ser utilizados em maior escala a partir de 1950,

em contrapartida ao uso quase exclusivo, até então, do aço-carbono com resistência a ruptura de 370 MPa.

Segundo Bellei [11], o início da produção de ferro no Brasil aconteceu por volta de 1812, sendo que a primeira obra executada com ferro pudlado, fundido em território nacional, foi a Ponte de Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro, feita com ferro fundido no Estaleiro Mauá, em Niterói, RJ, apresentando cinco vãos de 30 metros, construída em 1857. Porém, nesse período, a maioria das obras de aço foram feitas com aço importado, sendo que a primeira que se tem notícia foi o Teatro Santa Izabel, em Recife, construído em 1850.

Com o crescimento do país e o aumento da produção do setor industrial, principal responsável pelo consumo de estruturas metálicas, foi implantada, em 1921, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, com o objetivo de produzir fio máquina, arame farpado e perfis leves. O desenvolvimento da indústria siderúrgica no país prosseguiu com a instituição da Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional, em 1940. No ano seguinte, foi fundada a Companhia Siderúrgica Nacional, entrando em operação em 1946, voltada para a produção de chapas, trilhos e perfis de bitolas americanas. Nessa época, as importações de aço no Brasil representavam mais de 60% do consumo do mercado nacional.

Até 1956, a CSN voltava a sua atenção para a produção de trilhos e acessórios, que chegava a ocupar 66,4% da sua capacidade, deixando de produzir perfis médios e pesados pelo fato desse ramo não apresentar grande desenvolvimento no país. Porém, a partir de 1956, ocorreu uma redução no consumo de trilhos, incentivando a produção e consumo de perfis estruturais.

A consolidação da indústria siderúrgica no Brasil ocorreu na década de 60, com a Usiminas e a Cosipa entrando em operação para a produção de chapas. Com isso, observou-se um crescimento da produção de aço no país, passando de país importador na década de 70, para exportador de aço. Dentre as obras de grande importância no país, podemos citar o Edifício Avenida Central, no Rio de Janeiro, construído em 1961, sendo o primeiro edifício alto em estrutura metálica no Brasil, e os vãos metálicos da Ponte Rio-Niterói, inaugurada em 1974, com vãos laterais de 200 m e vão central de 300 m.

Com o crescimento no uso de estruturas metálicas, também ocorreu um crescimento de demanda de tubos de aço, principalmente os sem costura, voltados para a indústria petrolífera nacional. Para suprir essa necessidade, foi fundada, na década de 50, a Companhia Siderúrgica Mannesmann, que atualmente opera com o nome de V&M do BRASIL. Nos dias de hoje, além da indústria petrolífera, a utilização de perfis tubulares cresce bastante com relação à aplicação estrutural, devido ao seu bom desempenho estrutural e ao fator estético.

No Brasil, os perfis laminados devem ser dimensionados segundo as recomendações da NBR 8800/2008 [8], que apresenta algumas diferenças com relação a sua antecessora, a NBR 8800/1986 [7]. Uma dessas diferenças diz respeito a adoção de apenas uma curva de flambagem para a análise dos perfis submetidos a compressão, em contrapartida às quatro curvas anteriormente utilizadas. Além disso, foram acrescentadas especificações referentes ao dimensionamento de estruturas mistas, como colunas, vigas e lajes. Como referências internacionais, os perfis laminados seguem os procedimentos das normas Americana, AISC [1], e Européia, Eurocode 3 Part 1-1 [21] e Eurocode 3 Part 1-8 [23].

Estudos referentes ao comportamento dos perfis laminados podem ser encontrados em Sophianopoulos [69], com a análise de perfis I submetidos à compressão e carga distribuída simultaneamente, e Kindmann [37], que realiza análises numéricas e experimentais para diversos perfis laminados.

Pesquisas sobre a utilização de seções menos convencionais também estão sendo desenvolvidas, como no trabalho de Chan [14], que busca determinar a resistência à compressão de perfis laminados de seção elíptica. Já Szalai [71] apresenta um trabalho sobre as tensões residuais em perfis I laminados, que ocorrem devido a mudança de temperatura durante o processo de fabricação do perfil.

Outra linha de pesquisa referente aos perfis laminados diz respeito ao estudo das ligas de aço, analisando os seus compostos, como no trabalho de Zhang [82].

1.2.2 Perfis Formados a Frio

Os perfis formados a frio começaram a ser utilizados nas construções metálicas por volta de 1850, nos Estados Unidos e na Inglaterra, segundo Yu [81]. Porém, a sua utilização não era muito comum, além de não existirem informações técnicas suficientes sobre o comportamento de tais perfis.

Os primeiros estudos sobre os perfis formados a frio iniciaram-se em 1939, na Universidade Cornell, nos Estados Unidos, sob a orientação do Professor George Winter. Em 1940, a utilização dos perfis formados a frio na construção civil começa a se popularizar nos Estados Unidos, sendo necessário o desenvolvimento de uma especificação técnica voltada para esses perfis, já que o seu comportamento é diferente dos perfis laminados.

A primeira especificação referente a perfis formados a frio foi publicada em 1946, nos Estados Unidos, pela AISI (American Iron and Steel Institute), e segundo Hancock [30], foi baseada nas pesquisas desenvolvidas por George Winter entre os anos de 1939 e 1946, com a supervisão de um Subcomitê Técnico da AISI. A partir de 1946, devido à publicação dessa especificação, ocorreu um aumento significativo na utilização dos perfis formados a frio na construção civil e nos demais setores que utilizam estruturas metálicas, sendo que nos anos 70 o seu uso foi consolidado nos Estados Unidos.

A medida que novos estudos foram realizados, demonstrando melhores métodos de dimensionamento dos perfis, a especificação foi revisada e atualizada, sendo publicadas diversas versões da mesma.

A última versão da especificação técnica da AISI referente a perfis formados a frio adotando somente o método das tensões admissíveis foi publicada em 1986, sendo a sétima edição da mesma. Em 1991 foi publicada a primeira versão contendo tanto o método das tensões admissíveis quanto o método dos estados limites.

Dentre as especificações internacionais de relevância no cenário mundial podemos citar a norma Australiana e da Nova Zelândia AS/NZS 4600, a Britânica BS 5950-Part 5, a Canadense CAN/CSA S136, e a Européia Eurocode 3 Part 1-3 [22].

Até a década de 60, as terças metálicas utilizadas no Brasil eram normalmente perfis U laminados, produzidos pela CSN. A utilização dos perfis formados a frio só teve início no final da década de 60, após algumas empresas adquirirem prensas dobradeiras e perfiladeiras, máquinas específicas para a fabricação dos perfis.

Com o aumento da utilização desses perfis, foi necessário o desenvolvimento de uma norma brasileira sobre esse assunto. Assim, foi publicada em 1967 a NB 143/1967 – “Cálculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves”, baseada na especificação da AISI de 1962.

Entretanto, a má divulgação feita para essa norma levou a sua pouca utilização, e a falta de revisões e atualizações tornou-a ultrapassada, obrigando os engenheiros e projetistas a adotarem as normas estrangeiras, como as especificações da AISI.

Essa prática provocava incompatibilidades principalmente quando eram utilizados simultaneamente os perfis formados a frio com os laminados ou soldados em um mesmo projeto, sendo necessária a adoção da norma NBR 8800/1986 [7]. A incompatibilidade se dava devido aos coeficientes de ponderação das ações e resistências dessa norma brasileira serem diferentes dos utilizados nas normas internacionais.

Além disso, a NB 143/1967, baseada no método das tensões admissíveis, era incompatível com a NBR 8800/1986 [7], baseada no método dos estados limites. Esses fatos evidenciaram a necessidade de desenvolver uma nova norma nacional voltada aos perfis formados a frio.

Em 1980, a publicação da NBR 6355/1980 – “Perfis estruturais de aço formados a frio”, apresentou definições, simbologias, tolerâncias e nomenclaturas referentes aos perfis formados a frio para fins estruturais, além de tabelas de perfis de séries comerciais, com dimensões e propriedades geométricas, buscando a padronização dos perfis existentes no mercado.

Em 1997, teve início a elaboração da nova norma de perfis formados a frio, com a participação de docentes de diversas universidades e empresas ligadas ao setor. Procurando adequar os procedimentos de dimensionamento a realidade brasileira, foi publicada em 2001 a nova norma NBR 14762/2001 – “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” [9], baseada em procedimentos da AISI [2], Eurocode 3 Part 1-3 [22], e da norma australiana AS/NZS 4600.

Em 2003, foi publicada a nova NBR 6355/2003 [5], adequando melhor as tolerâncias e a padronização dos perfis com a realidade brasileira.

Nos últimos anos, diversos pesquisadores no mundo todo se interessaram em desenvolver estudos relacionados aos perfis formados a frio. Em 2000, Davies [17] publicou um trabalho sobre os avanços mais recentes nas pesquisas de estruturas de perfis formados a frio, demonstrando uma tendência de seções com espessuras menores e mais enrijecidas, tornando-as mais propensas a flambagem local e por distorção. Conseqüentemente existe uma demanda de melhoria nos procedimentos de dimensionamento dos perfis formados a frio, com o desenvolvimento de novas técnicas e estudos de incorporação desses métodos nas normas existentes.

Em 2003, Hancock [29] apresentou uma revisão sobre os estudos referentes a perfis formados a frio entre os anos de 1999 e 2001, abordando diversos temas, como elementos comprimidos, flexionados, flambagem por distorção, conexões e estruturas mistas. Também é apresentada uma breve explicação sobre o novo método para determinação da resistência dos perfis formados a frio, denominado de Método da Resistência Direta.

O Método da Resistência Direta foi desenvolvido por Schafer [65], como uma alternativa ao mais amplamente utilizado, o Método da Largura Efetiva, proposto por von Karman [73] e calibrado por Winter [77], já que com seções cada vez mais complexas, torna-se complicado e trabalhoso determinar as larguras efetivas de todos os elementos de um perfil.

Segundo Carvalho [13], esse método consiste, basicamente, em utilizar curvas de resistência ajustadas experimentalmente para calcular as cargas de colapso através da carga de

flambagem de todo o perfil e não dos elementos isolados do mesmo, como é feito no Método da Largura Efetiva.

Rusch [59] apresenta uma comparação entre o Método da Resistência Direta, da Largura Efetiva, da Espessura Efetiva e das Tensões Reduzidas, indicando as limitações na aplicação do primeiro, e a necessidade de novos estudos.

Em 2008, Schafer [64] publicou uma revisão sobre o Método da Resistência Direta, apresentando todas as equações utilizadas para o dimensionamento segundo esse método, e fazendo uma breve comparação com o Método da Largura Efetiva.

Outro método que está sendo amplamente estudado atualmente em perfis formados a frio é a denominada Generalised Beam Theory (GBT), muito utilizado para a análise da flambagem global e por distorção. Davies [18] apresenta os princípios básicos dessa teoria, demonstrando o seu procedimento de cálculo. Utilizando essa mesma teoria, Schardt [66] apresenta um estudo sobre a flambagem lateral com torção e a flambagem por distorção.

Rendek [57] também aplica essa teoria no seu estudo sobre distorção, e Basaglia [10] a utiliza para a análise da flambagem global de estruturas planas e espaciais constituídas por perfis formados a frio.

Uma breve descrição dos métodos de determinação da resistência dos perfis formados a frio pode ser encontrada em Macdonald [42], que também apresenta os modos de falha que ocorrem nesses perfis, e uma explicação sobre a interação entre eles.

Em LaBoube [40], encontra-se um estudo sobre treliças constituídas por perfis formados a frio, apresentando um estudo experimental e computacional, visando uma melhor definição para o dimensionamento dessas treliças. Dubina [19] também apresenta um trabalho sobre treliças constituídas por perfis formados a frio, com ensaios em escala real, dando ênfase às ligações. Outras análises experimentais também podem ser encontradas em Hancock [31], onde foram feitos testes em colunas de seções I e tubular quadrada formada a frio, e Wang [75], que realizou análises numéricas e experimentais em perfis U formados a frio submetidos à flexão.

Muitos trabalhos sobre terças em perfil formado a frio estão sendo realizados, principalmente com relação ao estudo de perfis que apresentam restrição de rotação na sua mesa superior, devido a fixação de certos tipos de telhas. Podemos citar como exemplos os trabalhos de Gonçalves [26], Vraný [74], Georgescu [25] e Seek [68].

Outra linha de pesquisa referente as terças em perfil formado a frio diz respeito aos perfis Z utilizados em situações de múltiplos vãos, visando proporcionar a continuidade da terça ao longo de dois ou mais vãos. Trabalhos referentes ao comportamento dessas terças e da ligação entre dois perfis consecutivos podem ser encontrados em Ho [32] e Zhang [83].

Devido ao elevado grau de complexidade dos procedimentos de cálculo da resistência dos perfis formados a frio apresentados nas especificações e normas referentes ao assunto, o desenvolvimento de programas computacionais para efetuar os cálculos é uma boa alternativa, como pode ser verificado em Papangelis [53]. Também aproveitando-se dos métodos computacionais, Pala [52] utiliza a programação baseada no algoritmo genético para a obtenção de fórmulas que determinem a tensão de flambagem por distorção em perfis formados a frio.

1.2.3 Perfis Tubulares

Segundo Eekhout [20], a primeira pesquisa científica relativa a tubos de aço foi feita por Edmé Mariotte, em 1660, na França, para o projeto de tubulações de suprimento de água para o palácio de Versailles, efetuando testes para a determinação da resistência do material. No século 18, muitas fábricas de tecidos da Inglaterra utilizavam colunas de aço, e geralmente essas colunas eram ocas, constituindo tubos de aço, em uma busca pela redução do material utilizado e do peso da coluna.

O conhecimento da grande resistência das barras tubulares é antigo, porém, apenas no século 19 é que ocorreram mais avanços nas pesquisas relativas a esse assunto, analisando a resistência de diferentes seções transversais. Segundo Eekhout [20], William Fairbairn foi o primeiro engenheiro a utilizar barras tubulares de ferro de diversas seções transversais para

construir uma ponte ferroviária vencendo um grande vão. Seus estudos ajudaram o engenheiro Robert Stephenson a construir a ponte ferroviária Conway Bridge, também denominada Britannia Bridge, em 1850, no País de Gales. Essa ponte era composta por duas seções tubulares retangulares paralelas de 4,2 m de largura e 5,7 m de altura, vencendo um vão de 140,0 m.

Conforme Wardenier [76], a medida que o processo de laminação a quente se desenvolveu, novas estruturas tubulares foram construídas, como por exemplo a Firth of Forth Railway Bridge, no Reino Unido, finalizada em 1890, vencendo vãos de 500,0 m. Os tubos utilizados eram circulares, produzidos com a união de várias chapas através de rebites, já que na época não existia uma maneira de produzir perfis circulares com diâmetros de 3,7 m, como alguns utilizados nessa obra. Muitos dos perfis tubulares utilizados até o final do século 19 eram constituídos pela união de perfis abertos e chapas, com rebites, como por exemplo, o apresentado na Figura 1.16, e utilizado pela companhia francesa Zorès, em 1863.

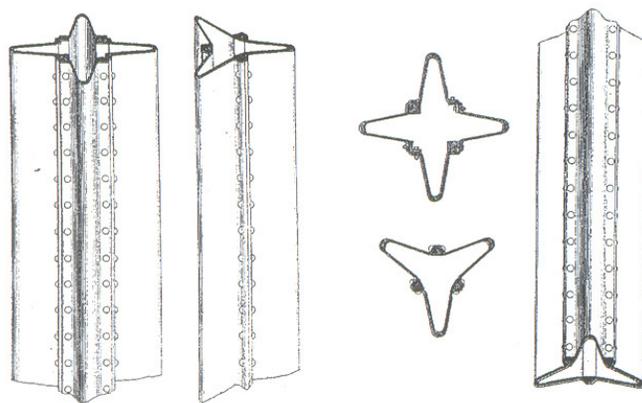


Figura 1.16 – Perfil tubular usado por Zorès. Fonte Eekhout [20]

Novos processos de laminação a quente permitiram a obtenção de perfis tubulares sem costura, como o processo desenvolvido pelos irmãos Mannesmann em 1886, ilustrado na Figura 1.17a, possibilitando a obtenção de perfis tubulares curtos com paredes finas. Alguns anos mais tarde, a utilização desse processo em conjunto com um novo procedimento denominado Pilger Process, apresentado na Figura 1.17b, tornou possível a obtenção de perfis tubulares de parede fina, longos e sem costura.

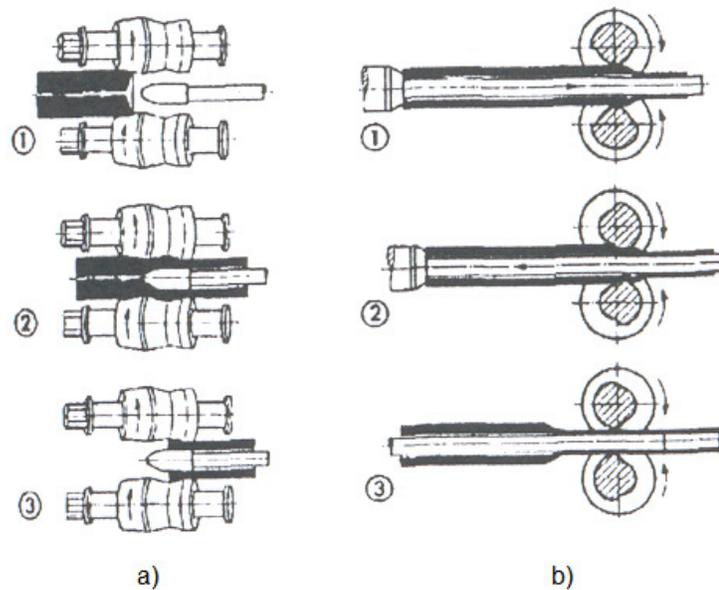


Figura 1.17 – Processos de laminação: a) Mannesmann, b) Pilger Process. Fonte: Wardenier [76]

Em 1907, Alexander Graham Bell desenvolveu, no Canadá, a primeira estrutura espacial de aço, utilizando perfis tubulares, com o objetivo de obter uma asa leve para um avião. Essa estrutura espacial acabou não sendo utilizada em aviões, mas a idéia foi aproveitada para a construção de uma torre para relógio. Com isso, começaram a surgir estruturas leves similares, como a torre para armazenamento de água construída em 1911, em Moscou. Apesar disso, a aplicação de perfis tubulares circulares em colunas, tubulações e andaimes continuavam a dominar.

Até 1920, as conexões das estruturas de aço eram todas feitas através de parafusos ou rebites. Só após 1920 é que a primeira treliça totalmente soldada foi construída. Novas pesquisas possibilitaram que em 1930, fosse desenvolvido o processo de soldagem contínua, pelo americano Fretz Moon, apresentado na Figura 1.18a. Após a Segunda Guerra Mundial, o processo de soldagem foi aperfeiçoado, possibilitando uma maior facilidade para a união de perfis tubulares.

Para facilitar a ligação de estruturas tubulares espaciais constituídas por muitos elementos repetitivos e pré-fabricados, com dimensões pequenas, foi desenvolvido em 1942 o conector Mero, na Alemanha, por Max Mengerhausen, apresentado na Figura 1.18b. Esse conector possibilitou a fabricação de grandes estruturas espaciais de uma maneira industrializada, e continua sendo utilizado até os dias de hoje.

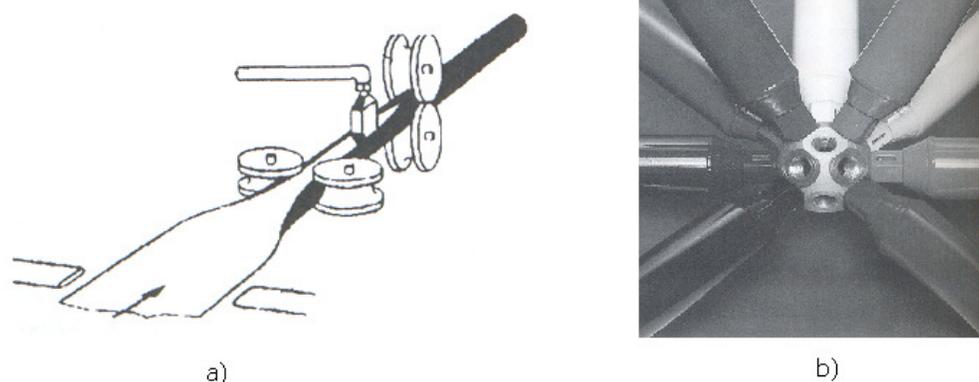


Figura 1.18 – Ligações em perfis tubulares a) processo de soldagem contínua b) conector Mero.
Fonte: Wardenier [76] e Eekhout [20]

Em 1952 os tubos retangulares foram desenvolvidos por Stewarts and Lloyds, apresentando propriedades semelhantes aos perfis circulares, porém possibilitando a confecção de ligações mais simples e permitindo uma união mais simples com os fechamentos externos, como as paredes.

O desenvolvimento da indústria petrolífera permitiu a utilização dos perfis tubulares em grandes estruturas como plataformas, tendo como vantagem com relação aos perfis abertos, a facilidade de manutenção e a menor área de superfície de proteção contra corrosão. A partir desse ponto, diversas obras foram construídas com a utilização de perfis tubulares, sendo desenvolvidas publicações com recomendações sobre as conexões entre perfis tubulares.

No Brasil, a NBR 8800/2008 [8], referente ao dimensionamento de estruturas de aço, traz poucos procedimentos para a análise de estruturas tubulares e suas ligações, sendo necessário

recorrer a publicações internacionais como CIDECT [16], Eurocode 3 Part 1-1 [21], Eurocode 3 Part 1-8 [23], Packer [51] e Rautaruukki [56].

Atualmente estão sendo desenvolvidos diversos estudos referentes a estruturas tubulares, sendo que um dos assuntos mais abordados diz respeito às conexões. São analisadas desde conexões soldadas do tipo K e N, como no trabalho de Kindmann [36], até conexões que utilizam chapas longitudinais soldadas em perfis tubulares, como o trabalho apresentado por Cao [12], no qual são realizados testes em colunas de perfis tubulares retangulares e análises computacionais pelo Método dos Elementos Finitos. Kostaski [39] também apresenta uma análise via Método dos Elementos Finitos para conexões soldadas do tipo T em perfis tubulares retangulares.

Outros trabalhos sobre ligações entre perfis tubulares utilizando chapas podem ser encontrados em Zhao [84], que apresenta um estudo paramétrico via Método dos Elementos Finitos para tubos retangulares e quadrados, e em Ling [41], que trata sobre ligações em tubos circulares. As ligações soldadas em estruturas treliçadas tubulares multiplanares também estão sendo estudadas, como no trabalho de Woghiren [78], que faz uma análise de ligações KK pelo Método dos Elementos Finitos.

Estudos de perfis tubulares circulares com as extremidades amassadas, muito utilizados para conexões em estruturas tubulares, podem ser encontrados em Mistakidis [49], com análises experimentais e modelagem computacional. Estudos sobre o comportamento desse tipo de ligação em treliças espaciais, com a realização de testes e propostas de reforços, podem ser encontrados em Andrade [3]. Uma análise teórica e experimental dessas ligações também pode ser observada em Maiola [44].

Outro tipo de conexão estudado diz respeito às ligações de placas de base, como no trabalho apresentado por Minchillo [48], onde são apresentadas análises do comportamento de tais ligações para pilares de perfis tubulares, com a utilização do Método dos Elementos Finitos.

Também existem diversos estudos referentes à utilização de colunas mistas, ou seja, colunas tubulares preenchidas com concreto, como por exemplo, nos trabalhos de Naguib [50] e Han [28]. Análises experimentais para a determinação da resistência a compressão de colunas

mistas submetidas a um pré-carregamento podem ser encontradas em Richard Liew [58]. Já estudos experimentais sobre a resistência ao cisalhamento de colunas mistas são apresentados por Xu [79].

Os perfis tubulares preenchidos com concreto também são analisados em situações de incêndio, como no trabalho de Kodur [38], onde é apresentado um método simplificado de dimensionamento para tal situação. Um estudo experimental realizado em colunas tubulares quadradas e retangulares preenchidas com concreto em situação de incêndio pode ser encontrado em Han [27]. Já o trabalho apresentado por Yang [80] dá uma ênfase maior ao comportamento das colunas mistas tubulares durante a fase de resfriamento e após o incêndio.

1.2.4 Terças Treliçadas

A utilização de treliças planas como apoio para coberturas e pisos é uma tecnologia recente e vem sendo muito aplicada em todo o mundo. Essa idéia teve início nos Estados Unidos, onde utiliza-se o termo *joist* para designar essas treliças planas leves.

O sistema de utilização de treliças leves nas coberturas metálicas consiste em diversas treliças planas padronizadas, dimensionadas para suportar uma cobertura de maneira biapoiada, sendo necessários travamentos laterais para garantir a estabilidade de cada treliça, conforme pode ser observado na Figura 1.19. Os perfis utilizados são variados, podendo ser perfis abertos ou tubulares. O baixo peso das treliças possibilita a utilização de pilares mais esbeltos e reduz as cargas nas fundações.

O primeiro emprego das treliças leves data de 1855, sendo aplicado em um banco na cidade de Nova Iorque, porém somente em 1923 é que as primeiras treliças foram disponibilizadas nos Estados Unidos. Essas primeiras unidades eram treliças do tipo Warren, com os banzos superior e inferior formados por barras redondas, e as diagonais constituídas por uma única barra redonda dobrada na forma senoidal.

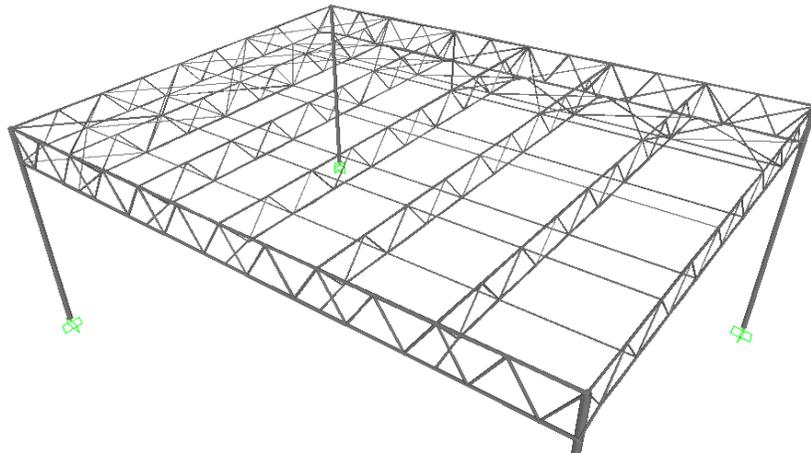


Figura 1.19 – Sistema de treliças leves

Após a produção da primeira treliça leve, diversos fabricantes de estruturas metálicas passaram a confeccionar as suas próprias unidades utilizando outros tipos de perfis e geometrias para a treliça. Isso dificultou a comparação entre a capacidade resistente de cada treliça, e a escolha de qual opção apresentava o melhor aproveitamento de material.

Portanto, em 1928, os fabricantes americanos fundaram o Steel Joist Institute (SJI), buscando padronizar os métodos de cálculo, projeto, fabricação e montagem, apresentando uma especificação técnica para a definição da capacidade resistente de cada tipo de treliça existente. A primeira especificação foi publicada ainda em 1928, sendo que um ano mais tarde foi apresentada a primeira tabela de cargas. Desde então, diversas atualizações foram feitas nas publicações do Steel Joist Institute [70], promovendo o aumento dos vãos vencidos pelas treliças e desenvolvendo novas tabelas de cargas para outros tipos de aço.

No Brasil, o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) apresentou em 2007 a publicação “Treliças Tipo Steel Joist” [34], buscando oferecer uma introdução a padronização do uso desse tipo de estrutura no Brasil. Os cálculos das treliças foram baseados nas normas americanas e brasileiras, sendo utilizados os perfis comumente encontrados no Brasil, como perfis U, T, cantoneiras, tubos circulares e quadrados.

Dentre os trabalhos mais recentes, Kim [35] desenvolveu um estudo tridimensional do comportamento dinâmico de estruturas compostas por treliças leves, onde são apresentadas análises experimentais e numéricas. Já Samarra [61] realizou um estudo numérico e experimental de treliças tubulares planas, comparando os resultados obtidos computacionalmente com os observados no ensaio de uma cobertura de 900m². As treliças leves também vêm sendo muito utilizadas como pisos, denominadas de vigas mistas, onde o banzo superior da treliça é substituído por uma faixa de concreto, formando uma treliça composta. Trabalhos referentes a esse assunto podem ser encontrados em Choi [15] e Machacek [43].

1.3 Proposta de Trabalho

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre os principais tipos de terças metálicas que podem ser utilizadas em coberturas de estruturas. Para tanto, foram analisados alguns tipos de terças: terças cuja utilização já é bastante difundida, como as em perfil laminado e formado a frio, terças cuja utilização tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, como as treliças planas, e terças inovadoras, como as treliças multiplanares.

Para este fim, foram realizados estudos sobre o comportamento e dimensionamento de terças em perfil e em treliças planas e multiplanares, baseando-se nas normas brasileiras NBR 14762/2001 [9], NBR 8800/1986 [7] e NBR 8800/2008 [8], além de normas e publicações internacionais como o Eurocode 3 Part 1-1 [21] e o AISC [1].

Para as análises dos perfis laminados, foram estudadas e aplicadas as normas vigente e anterior, respectivamente NBR 8800/2008 [8] e NBR 8800/1986 [7], com o intuito de verificar as suas principais diferenças, e analisar se as alterações ocorridas na norma geram grandes diferenças nos resultados dos dimensionamentos dos perfis laminados. Para facilitar a análise das terças em perfil, foi desenvolvido o programa AutoTerças que realiza a verificação e o dimensionamento desse tipo de terça, seguindo as recomendações das normas brasileiras para perfis formados a frio e perfis laminados, utilizando-se a linguagem Object Pascal, através do programa Delphi 2005.

Com este programa desenvolvido, foram verificadas as principais seções de perfis formados a frio utilizadas para telhas de coberturas metálicas, os perfis U e Z simples e enrijecidos, realizando-se processos iterativos, conforme recomendação da NBR 14762/2001 [9]. Também foram verificados os perfis laminados mais empregados em telhas metálicas, como os perfis U e I.

As telhas treliçadas planas em perfis abertos foram verificadas com a ajuda do programa de análise estrutural SAP2000 [63], seguindo recomendações dos manuais e publicações referentes ao dimensionamento das treliças leves, como os apresentados pelo Steel Joist Institute [70] e pelo CBCA [34], e obedecendo os procedimentos estabelecidos pelas normas brasileiras. Para a análise das telhas treliçadas tubulares planas e multiplanares, foi utilizado o programa AutoTruss 2.0, desenvolvido através do convênio de parceria entre a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp e a empresa V&M do Brasil S. A..

Foram testadas, com os programas citados acima, diversas situações de vãos para as cargas comumente atuantes nas telhas, obtendo-se as melhores geometrias e pesos para cada um dos tipos de telhas. Esses resultados foram então comparados para investigar qual o melhor tipo de telha a ser utilizado para cada situação analisada, e também qual a melhor geometria para as telhas treliçadas tubulares, planas e multiplanares.

Além de realizar uma comparação dos pesos de cada tipo de telha, também foi realizada uma análise dos seus custos, fornecidos por uma grande e conceituada empresa nacional. Essa análise permitiu chegar a resultados mais realistas, já que cada tipo de telha possui um custo diferente com relação aos seus materiais, processos de fabricação e montagem.

Os resultados obtidos com esse trabalho poderão servir de base para que os projetistas tenham uma idéia inicial de qual o melhor tipo de telha a ser empregado no seu projeto, além de analisar a viabilidade da utilização das telhas treliçadas tubulares multiplanares.

2. ESTUDOS PRELIMINARES

Durante o processo de análise das terças, já é esperado que dificilmente um tipo de terça terá um bom desempenho em todas as situações imaginadas, como por exemplo, para grandes e pequenos vãos. Ou seja, dependendo da situação, deverá ser encontrado um tipo de terça mais conveniente.

Uma terça com um bom desempenho significa eficiência e economia, isto é, uma terça leve, que resista aos esforços solicitantes com uma taxa de utilização dos perfis elevada, e que seja viável de ser fabricada e instalada na estrutura.

Para analisar o comportamento e a resistência aos esforços solicitantes de cada tipo de terça, foi necessária a realização de estudos preliminares sobre os processos de fabricação e montagem das terças, assim como sobre o método de determinação de suas resistências.

Existem basicamente três grupos de perfis de aço utilizados para a construção de estruturas: perfis laminados, perfis soldados e perfis formados a frio, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

O primeiro grupo é obtido através de laminação a quente em usinas siderúrgicas, sendo que a espessura do perfil pode ser constante ou variar ao longo da seção, como no caso dos perfis laminados de padrão americano, que apresentam abas com espessuras variáveis. Os perfis laminados têm como grande vantagem o seu baixo nível de tensões residuais, devido a laminação a quente, porém, a sua utilização fica inviabilizada em certos casos, devido a sua alta relação entre peso e momento de inércia.

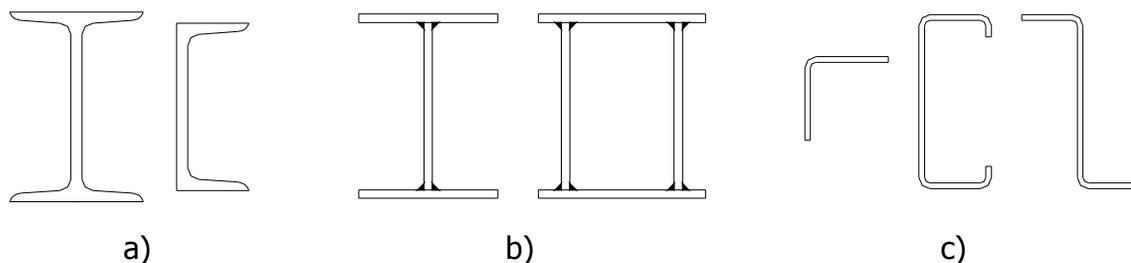


Figura 2.1 – Grupos de perfis de aço: a) laminados, b) soldados, c) formados a frio

Os perfis soldados são obtidos através da soldagem de duas ou mais chapas, podendo-se chegar a perfis que não existem em catálogos comerciais e que sejam a melhor solução para determinada estrutura. Porém, o alto custo do processo de soldagem e as altas tensões residuais introduzidas pela solda são algumas das desvantagens do uso desses perfis.

Por fim, os perfis formados a frio, também denominados de perfis formados a frio, são obtidos pelo dobramento a frio, ou seja, em temperatura ambiente, de chapas finas de aço. O processo de dobramento também introduz tensões residuais no perfil, porém, permite uma grande flexibilidade na obtenção de formato e dimensões da seção transversal.

Como os tipos de terças analisados são as terças em perfil laminado e formado a frio, as terças treliçadas planas, com perfis abertos e tubulares laminados, e as terças treliçadas multiplanares, com perfis tubulares laminados, foram estudadas com profundidade as normas brasileiras em vigor NBR 14762/2001 – “Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimentos” [9] e NRB 8800/2008 – “Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios” [8], além da norma NBR 8800/1986 – “Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios (Método dos Estados Limites)” [7], com o objetivo de analisar as principais mudanças referentes aos perfis laminados.

2.1 Terças em Perfil Laminado

Os perfis laminados são produzidos nas usinas siderúrgicas através do processo de laminação a quente do aço. O aço é um composto ferroso contendo carbono e quantidades pequenas de elementos como silício, fósforo, enxofre, níquel, cobre, dentre outros. O que diferencia o ferro fundido do aço é quantidade de carbono, sendo essa maior no primeiro, e correspondendo a menos de 0,12% neste último, segundo Santos [62]. Essa diferença torna o aço muito mais dúctil, podendo ser facilmente deformado no processo de laminação.

Para a obtenção do aço, são fundidas em um alto forno quantidades determinadas de minério de ferro, carvão coque e calcário, suas principais matérias-primas. Nesse processo, o ferro contido no minério é fundido, e o calcário liquefeito é combinado com as impurezas para formar a escória. O ferro, denominado nesse ponto de ferro gusa, é então separado da escória, que por ser menos densa fica flutuando.

O ferro gusa absorve de 3,5 a 4% de carbono do carvão coque durante a operação no alto forno, tornando-se um material muito quebradiço. Portanto, para possibilitar a sua aplicação em estruturas metálicas, é necessário fazer o seu refino, processo realizado nas aciarias em fornos elétricos, fornos básicos a oxigênio ou através do processo “Siemens-Martin”.

No processo de refinamento são adicionadas aparas de aço e calcário ao ferro gusa, e o excesso de carbono é retirado através de reações químicas que ocorrem com o oxigênio, gerando gases, ou através da absorção pelo calcário líquido, gerando escória. A retirada do excesso de carbono gera o aço, que é separado da escória, e colocado em moldes denominados de lingoteiras, adicionando-se elementos como manganês e silício. Após a solidificação, os moldes são então retirados para a obtenção dos lingotes, ainda sob elevada temperatura.

Os lingotes são reaquecidos a uma temperatura uniforme necessária para o processo de laminação, e transportados ao laminador desbastador. Neste estágio, a seção transversal do lingote é reduzida, aumentando o seu comprimento a medida que os rolos do laminador vão abaixando. Ao final do processo, são obtidos tarugos de seção transversal quadrada ou levemente

retangular, utilizados para a laminação de perfis estruturais, ou placas de seção transversal retangular, utilizadas para a laminação de chapas ou folhas.

A obtenção dos perfis estruturais é feita através da passagem dos tarugos ainda quentes em vários laminadores, sendo que cada um possui um conjunto de rolos ajustáveis às dimensões e seção transversal do perfil. Os rolos possuem ranhuras que através de vários passes moldam o aço conforme a necessidade. Um mesmo laminador é utilizado para a confecção de diversos tipos de perfis, bastando alterar os rolos empregados no processo. Ao final da laminação, os perfis são cortados nos tamanhos padrões.

Os principais tipos de perfis laminados existentes no mercado são as cantoneiras de abas iguais ou desiguais, perfis I, H e U, tubos circulares ou retangulares, barras redondas, e perfis T obtidos pelo corte de perfis I ou H. Essas seções transversais podem ser observadas na Figura 2.2.

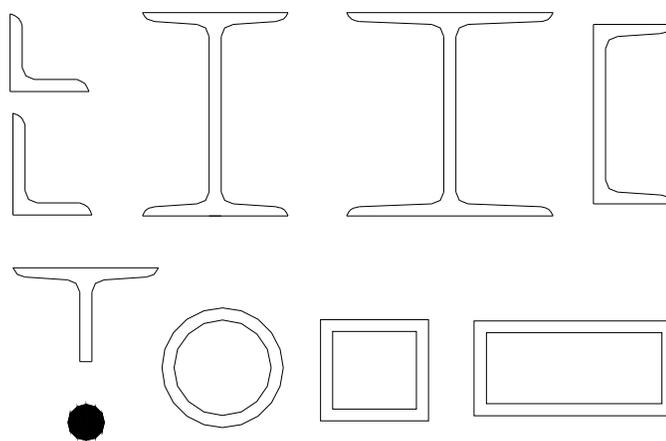


Figura 2.2 – Seções dos perfis laminados

Os perfis laminados são amplamente empregados na construção civil, como em edifícios industriais, pontes, torres, comportas, plataformas, edifícios de andares múltiplos, treliças e terças de coberturas, estruturas para transportadores e viadutos. Para as terças de coberturas metálicas, o mais utilizado é o perfil U, porém, também pode-se empregar o perfil I. As dimensões dos perfis laminados são padronizadas, independente da siderúrgica produtora.

No Brasil, os procedimentos para obtenção dos esforços resistentes dos perfis laminados são estabelecidos pela NBR 8800/2008 [8], que podem ser encontrados no anexo B1. Especificações internacionais muito utilizadas mundialmente são a AISC [1], o Eurocode 3 Part 1-1 [21] e o Eurocode 3 Part 1-8 [23].

A fim de comparar as principais diferenças entre a NBR 8800/2008 [8] e a NBR 8800/1986 [7], foram realizados estudos das duas versões da norma referente aos perfis laminados, focando na análise dos esforços resistentes.

Com relação às barras submetidas a esforços axiais de compressão, pode-se notar uma alteração importante nas curvas de flambagem, sendo que as quatro curvas anteriormente utilizadas conforme o tipo de perfil analisado, foram substituídas por apenas uma curva, igual para todos os tipos de perfis. Uma comparação entre as quatro curvas de flambagem da NBR 8800/1986 [7] e a curva única da NBR 8800/2008 [8] pode ser observada na Figura 2.3.

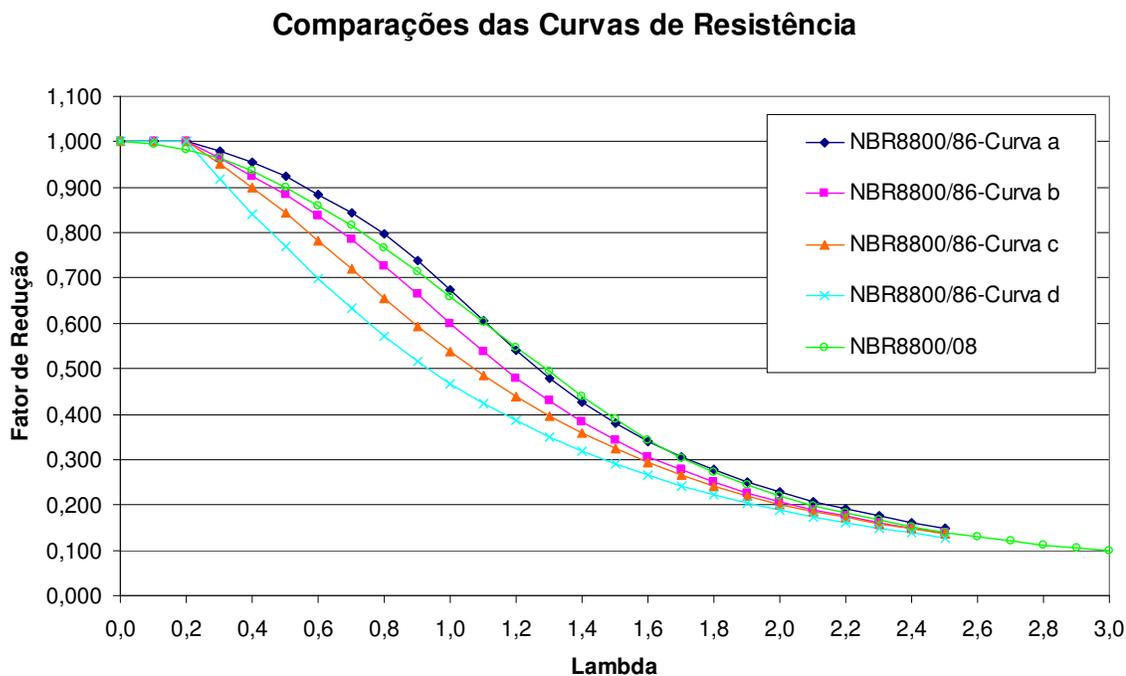


Figura 2.3 – Curvas de resistência para determinação do esforço resistente a compressão

A determinação do momento fletor resistente também sofreu algumas pequenas alterações com relação às formulações para a verificação da flambagem lateral com torção, flambagem local de mesa e flambagem local de alma. Na Tabela 2.1 podem ser observadas as diferenças na determinação do valor de λ_p . As alterações são muito pequenas, assim como para os demais valores apresentados nos anexos D e G da NBR 8800/1986 [7] e da NBR 8800/2008 [8], respectivamente. Uma alteração importante diz respeito ao valor do limite do momento fletor resistente de cálculo para assegurar a validade da análise elástica, conforme apresentado na Tabela 2.1.

| | NBR 8800/1986 | | NBR 8800/2008 | |
|--|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | λ | λ_p | λ | λ_p |
| FLT | $\frac{L_b}{r_y}$ | $1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $\frac{L_b}{r_y}$ | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| FLM | $\frac{b}{t}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $\frac{b}{t}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| FLA | $\frac{h}{t_w}$ | $3,50 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $\frac{h}{t_w}$ | $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| Limite do momento fletor resistente de cálculo para análise elástica | $\phi_b 1,25 W f_y$ | | $\frac{1,50 W f_y}{\gamma_{a1}}$ | |

Tabela 2.1 – Alterações na determinação do momento fletor resistente de cálculo

As alterações referentes ao momento fletor têm um impacto menor no dimensionamento dos perfis do que as alterações da determinação do esforço resistente a compressão. Os impactos das modificações são discutidos na seção 3.5.

2.2 Terças em Perfil Formado a Frio

Além de permitir a obtenção de perfis com as dimensões desejadas, outra vantagem dos perfis formados a frio é a sua facilidade de armazenamento, uma vez que pode-se estocar uma grande quantidade de chapas e produzir apenas os perfis que serão utilizados na estrutura.

O fato de os perfis formados a frio serem feitos a partir de chapas finas, conduz a perfis extremamente leves, reduzindo o peso final da obra e, conseqüentemente, o seu custo final.

Por esses motivos, os perfis formados a frio são, atualmente, os mais utilizados para a aplicação em terças de coberturas metálicas convencionais, sendo portanto, de extrema importância para esse trabalho, o estudo do seu comportamento e a sua aplicabilidade nas coberturas metálicas.

Para a obtenção dos perfis formados a frio, são dobradas chapas com espessuras a partir de 0,4 mm, sendo estabelecido um limite de norma de 8 mm. Porém, segundo Carvalho [13], é possível obter perfis formados a frio com chapas de espessuras superiores a esse limite, chegando a até 19 mm de espessura, desde que o equipamento disponível para executar as dobras seja apropriado para chapas dessa espessura. Outro ponto que deve ser levado em consideração diz respeito ao tipo de aço utilizado para a fabricação do perfil, que deve ser apropriado para a espessura da chapa utilizada, já que aços com elevada dureza poderão resultar em perfis com trincas nas regiões das dobras.

Existem basicamente dois métodos de produção de perfis formados a frio: através de perfiladeiras ou prensas dobradeiras.

A perfiladeira é constituída por uma série de cilindros que, com os ajustes adequados, produzem as dobras necessárias em uma chapa de aço para a obtenção do perfil desejado. A chapa de aço passa continuamente através desses cilindros, e cada par de cilindros produz uma dobra específica. Quanto maior o grau de complexidade da seção transversal do perfil, maior é a quantidade de dobras, e conseqüentemente de cilindros necessários para a obtenção do perfil

final. Esse processo de produção de perfis com a perfiladeira pode ser observado na Figura 2.4. Ao final do processo, o perfil é cortado automaticamente com o comprimento desejado, sem a necessidade de parar a perfiladeira. Os comprimentos mais usuais são 6,0 m e 12,0 m.

A prensa dobradeira é constituída por um punção que pressiona a chapa de aço contra uma mesa que possui o formato da dobra que deverá ser feita na chapa. Caso o perfil possua mais de uma dobra, a chapa é reposicionada para que a prensa aplique essa nova dobra. Quanto mais complexa a seção transversal do perfil, maior a quantidade de operações necessárias na prensa dobradeira. O posicionamento da chapa na prensa é feito manualmente.

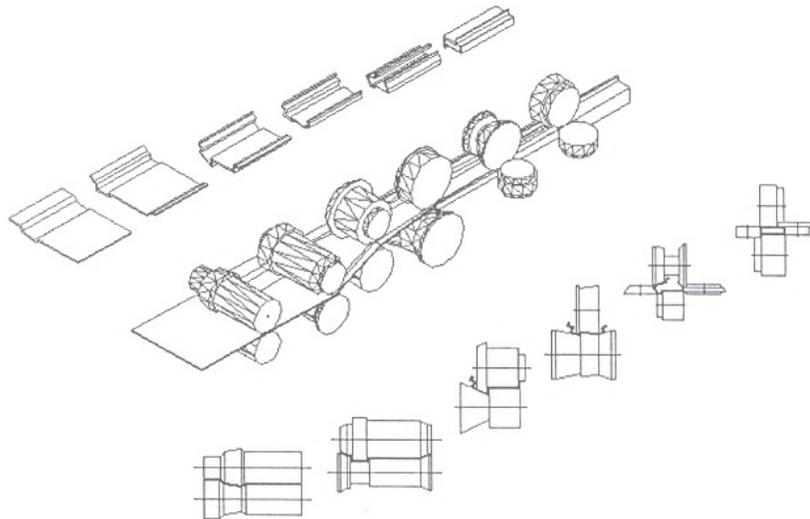


Figura 2.4 – Produção de perfil em perfiladeira. Fonte: Carvalho [13]

A Figura 2.5 apresenta o processo de utilização da prensa dobradeira, sendo importante destacar que todo o comprimento da chapa é dobrado ao mesmo tempo. Com isso, o máximo comprimento do perfil fica limitado ao comprimento da prensa. Os comprimentos mais usuais para a prensa dobradeira são 6,0 m e 3,0 m.

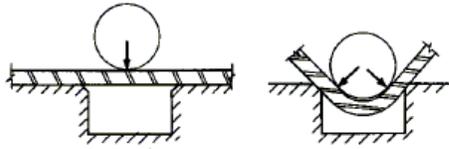


Figura 2.5 – Produção de perfil em dobradeira. Fonte: Yu [81]

Comparando os dois métodos de produção de perfis formados a frio, podemos notar vantagens e desvantagens em cada um deles. Para a produção de uma grande quantidade de perfis iguais, com as mesmas formas e dimensões, é recomendado o uso das perfiladeiras, por ser um processo mais rápido e que requer pouco trabalho manual, apesar de possuir um custo inicial mais alto. A utilização da prensa dobradeira possui um custo inicial menor, e é aconselhada para pequenas produções e quando existe grande variedade de formas e dimensões dos perfis a serem produzidos.

A principal razão para essa escolha é que a regulagem dos cilindros de uma perfiladeira para a produção de perfis de diferentes dimensões é complexa e demorada, encarecendo o valor final do perfil. Já a regulagem de uma prensa é bem mais simples.

A mão de obra utilizada em uma perfiladeira é menor, e a sua utilização permite a produção de perfis com qualquer comprimento necessário, enquanto que a prensa limita-se a produção de perfis com até 6,0 m de comprimento, além de utilizar mais mão de obra.

Conforme dito anteriormente, existe uma grande flexibilidade na produção de perfis formados a frio, sendo possível obter perfis com as mais variadas seções transversais, dependendo da necessidade de uso do perfil. Na Figura 2.6, são apresentadas algumas das principais seções de perfis formados a frio.

Os perfis formados a frio têm uma grande gama de aplicação, como por exemplo, as indústrias automobilística e aeronáutica, em estruturas de carros, caminhões e aviões, a agroindústria, em máquinas agrícolas e silos, setores de estocagem, com prateleiras e racks, além da construção civil.

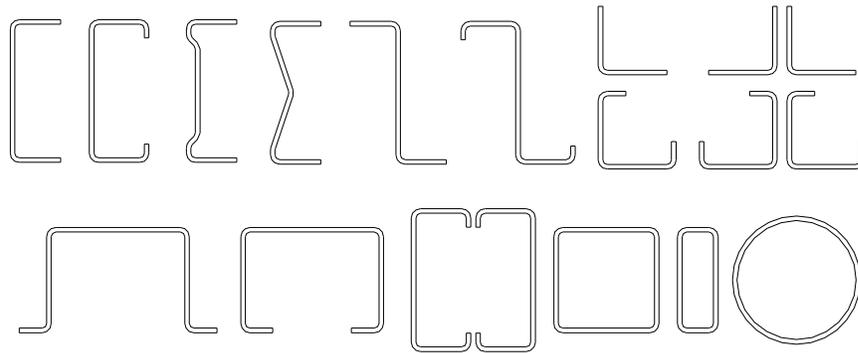


Figura 2.6 – Seções dos perfis formados a frio

Dentro da área de construção civil, podemos citar a sua aplicação em obras residenciais, comerciais e industriais, coberturas metálicas, telhas, formas para concreto, painéis de fechamento, estruturas mistas, como lajes, vigas e colunas mistas, estruturas de *steel frame* e membros de treliças planas e multiplanares.

A norma brasileira NBR 6355/2003 [5] padroniza os perfis estruturais de aço formados a frio, apresentando tabelas de perfis de séries comerciais, com dimensões e propriedades geométricas para os tipos de perfis mais utilizados na área de estruturas: cantoneira, perfil U simples e enrijecido, perfil Z enrijecido a 90° e a 45° e perfil cartola, conforme a Figura 2.7.

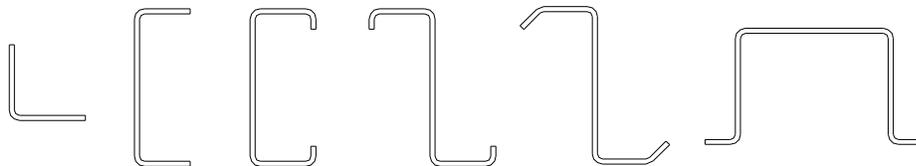


Figura 2.7 – Perfis estruturais presentes na NBR 6355/2003 [5]

O trabalho a frio influencia nas propriedades mecânicas do aço virgem, aumentando o seu limite de escoamento e a sua resistência a tração, e diminuindo a sua ductilidade, conforme pode

ser observado na Figura 2.8. A porcentagem do aumento da resistência a tração é menor que a porcentagem do aumento do limite de escoamento.

As regiões das dobras das seções dos perfis formados a frio sofrem uma maior influência do trabalho a frio do que as regiões planas. Portanto, as propriedades mecânicas do aço são diferentes em vários pontos de uma mesma seção, conforme exemplificado na Figura 2.9. Por esse motivo, o escoamento da seção transversal sempre se inicia na região plana, que possui um limite de escoamento menor, provocando uma redistribuição de tensões das regiões planas para as regiões curvas.

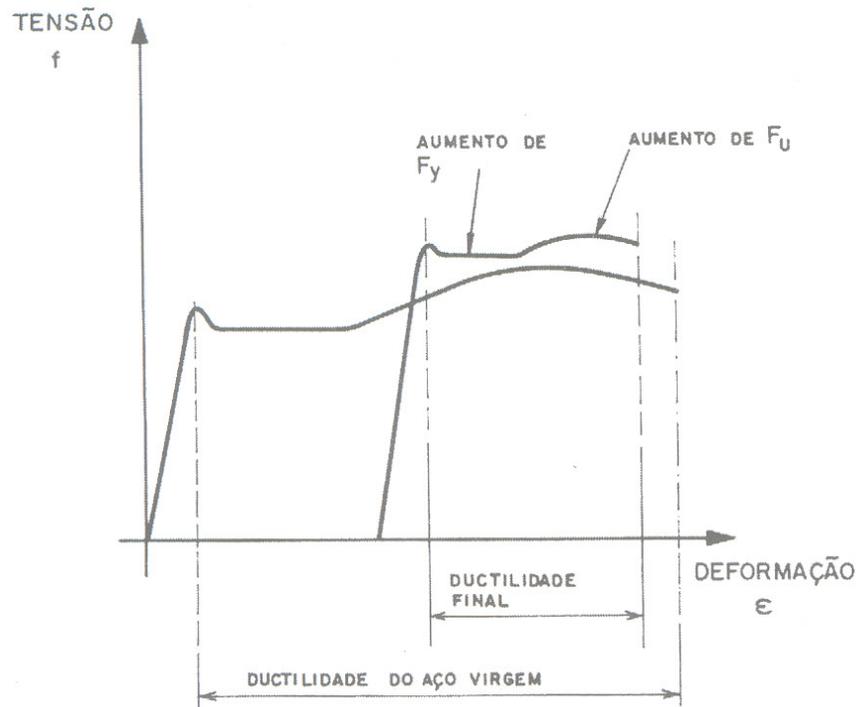


Figura 2.8 – Aumento da resistência e diminuição da ductilidade. Fonte: Malite [45]

As normas relacionadas aos perfis formados a frio, como a brasileira NBR 14762/2001 [9] e a americana AISI [2], permitem levar em consideração o aumento do limite de escoamento devido ao trabalho a frio, trocando a tensão de escoamento do aço virgem por uma tensão maior, determinada nas referidas normas. Porém, isso só é permitido em perfis sujeitos a tração, ou em

perfis não esbeltos sujeitos a compressão ou flexão, cujos elementos são espessos, o que normalmente não ocorre em perfis formados a frio. Portanto, é usual utilizar o limite de escoamento do aço virgem nos cálculos dos perfis formados a frio, sendo que o acréscimo existente funciona como uma reserva de resistência.

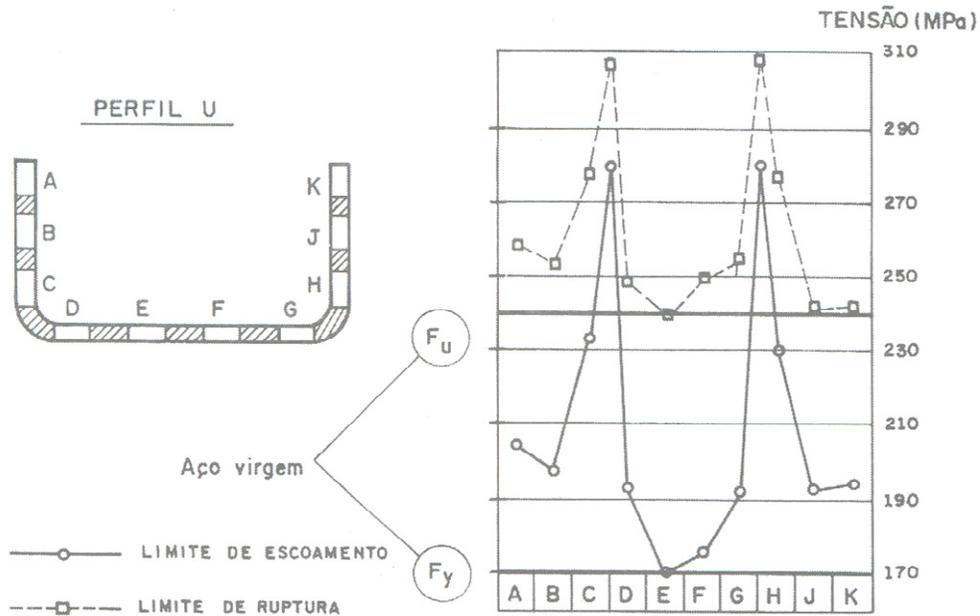


Figura 2.9 – Influência do trabalho a frio nas propriedades mecânicas do aço. Fonte: Malite [45]

Os perfis formados a frio possuem algumas definições e nomenclaturas que são importantes para o bom entendimento do comportamento desses perfis. Dentro dessas definições, encontram-se os elementos não enrijecidos e enrijecidos.

Elementos não enrijecidos são elementos planos (almas ou mesas) de um perfil que são apoiados em apenas uma extremidade paralela a direção das tensões, sendo que a outra extremidade é livre, conforme a Figura 2.10a. Elementos enrijecidos são elementos planos cujas duas extremidades paralelas a direção das tensões estão apoiadas, conforme a Figura 2.10b. Os apoios de um elemento podem ser os outros elementos do perfil, como almas e mesas, ou enrijecedores de borda ou intermediários, conforme a Figura 2.10c.

Também é importante definir que a largura de um elemento, que é usada no dimensionamento do perfil formado a frio, é tomada como a largura reta do elemento, sem considerar a parte curva, como apresentado na Figura 2.10d.

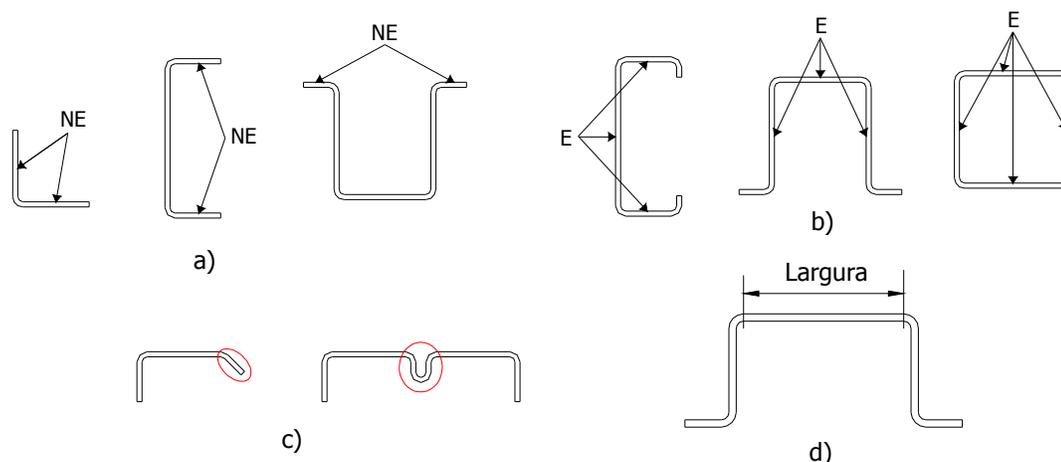


Figura 2.10 – Definições e nomenclaturas: a) elementos não enrijecidos, b) elementos enrijecidos, c) enrijecedores, d) largura do elemento

A utilização de perfis formados a frio requer uma maior atenção a certos problemas que não ocorrem com frequência em perfis laminados. O fenômeno mais comum de se constatar nos perfis formados a frio é a flambagem local de seus elementos. Esse fenômeno pode ocorrer isoladamente ou em conjunto com a flambagem global do perfil.

O fato de serem utilizadas chapas finas para a fabricação dos perfis formados a frio resulta em elementos dos perfis, como almas e mesas, com uma espessura bem menor que o seu comprimento. Assim, a flambagem local de um elemento do perfil formado a frio pode ocorrer antes do escoamento da seção.

Porém, a ocorrência da flambagem local não indica que a capacidade de resistência do perfil foi esgotada, já que um elemento enrijecido em sua extremidade por um outro elemento, consegue suportar tensões ainda maiores após a ocorrência da flambagem local. Esse fenômeno é denominado de resistência pós-flambagem.

Os conceitos de flambagem local e resistência pós-flambagem podem ser melhor compreendidos com a utilização da teoria da flambagem elástica de chapas, uma vez que tanto a norma brasileira, quanto as normas internacionais, consideram que um perfil formado a frio é formado por uma série de chapas, que servem como vinculação para as chapas vizinhas, nas regiões de encontro das mesmas.

Quando uma chapa é comprimida, ela pode entrar em colapso por escoamento ou por flambagem. O colapso por escoamento ocorre em chapas muito espessas, com uma relação pequena entre a largura da chapa e a sua espessura. Assim, a tensão de escoamento é atingida antes da flambagem da chapa. Para chapas cuja relação citada acima é grande, ou seja, para chapas esbeltas, a flambagem ocorre antes que a tensão atinja o limite de escoamento.

No caso de chapas quadradas apoiadas em suas quatro bordas, e submetidas a uma tensão de compressão uniforme em uma direção, a flambagem da chapa ocorre com uma curvatura simples nas duas direções, conforme pode ser visualizado na Figura 2.11a.

Porém, em perfis formados a frio, o comprimento dos elementos é muito maior que as suas respectivas larguras. Nesse caso, a flambagem da chapa apresenta uma série de ondas, cujo comprimento λ é aproximadamente igual à largura w da chapa, conforme apresentado na Figura 2.11b.

A tensão crítica de flambagem para a chapa retangular apresentada na Figura 2.11b, que possui as quatro extremidades apoiadas, pode ser determinada através da equação diferencial baseada na teoria de pequenos deslocamentos, onde o deslocamento transversal da chapa é da mesma ordem de grandeza que a sua espessura:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + \frac{f_x t}{D} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \quad (2.1)$$

Onde:

$$D = \frac{E t^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (2.2)$$

E = módulo de elasticidade;

t = espessura da chapa;

ν = coeficiente de poisson (0,3 para o aço);

ω = deslocamento perpendicular ao plano da chapa;

f_x = tensão de compressão na direção do eixo x .

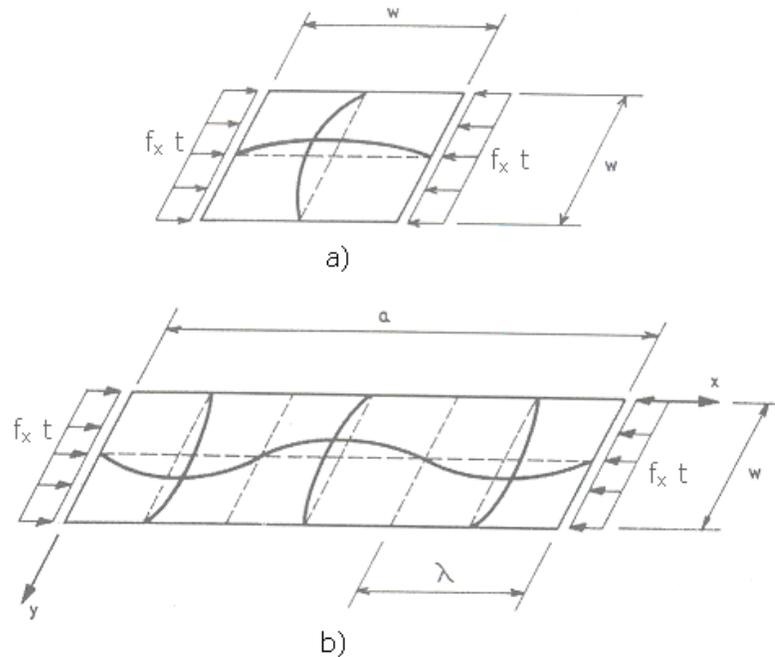


Figura 2.11 – Flambagem de chapas: a) chapa quadrada, b) chapa retangular. Fonte: Malite [45]

A resolução dessa equação diferencial pode ser encontrada em detalhes em Yu [81] e Malite [45], e conduz ao seguinte valor para a tensão crítica:

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) \left(\frac{w}{t}\right)^2} \quad (2.3)$$

Onde:

$$k = \left[m \left(\frac{w}{a}\right) + \frac{1}{m} \left(\frac{a}{w}\right) \right]^2 \quad (2.4)$$

m = número de meia onda na direção x ;

a = comprimento da chapa;

w = largura da chapa.

Os valores de k para diferentes relações de a/w podem ser encontrados na Figura 2.12.

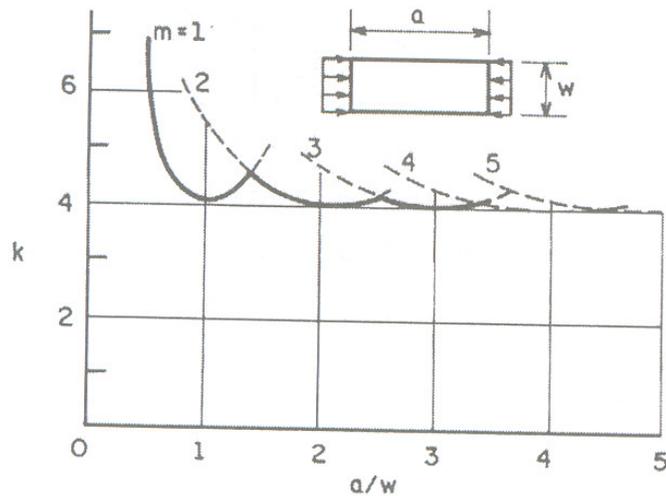


Figura 2.12 – Gráfico com valores de k . Fonte: Malite [45]

Pode-se notar que para as relações a/w que resultam em números inteiros, o valor de k é 4. Esse mesmo valor é válido para relações a/w grandes, maiores do que 4, que ocorrem normalmente em perfis formados a frio, já que os mesmos apresentam um comprimento muito maior que a largura de seus elementos.

Os valores de k para diversas situações de solicitação e condições de contorno podem ser observados na Tabela 2.2.

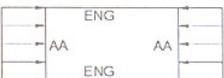
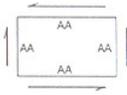
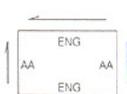
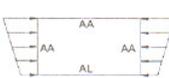
| Caso | Tipo de apoio (Condições de contorno) | Tipo de solicitação | Valor de k |
|------|---|---------------------------|----------------|
| 1 |  | Compressão | 4,0 |
| 2 |  | Compressão | 6,97 |
| 3 |  | Compressão | 0,425 0,675 |
| 4 |  | Compressão | 1,277 |
| 5 |  | Compressão | 5,42 |
| 6 |  | Corte | 5,34 9,35 |
| 7 |  | Corte | 8,98 |
| 8 |  | Flexão | 23,9 |
| 9 |  | Flexão | 41,8 |
| 10 |  | Compressão + Flexão | 7,81 |
| 11 |  | Compressão + Flexão | 0,57 |

Tabela 2.2 – Tabela com valores de k. Fonte: Carvalho [13]

Diferentemente do que se observa em elementos unidimensionais, como as barras, as chapas não sofrem colapso ao atingirem a tensão crítica de flambagem, devido as suas características bidimensionais, resistindo a um acréscimo de carga após a flambagem devido a redistribuição das tensões. Esse fenômeno é conhecido como resistência pós-flambagem, e pode ser melhor compreendido através da Figura 2.13, que representa um trecho de uma chapa uniformemente comprimida e apoiada em suas extremidades.

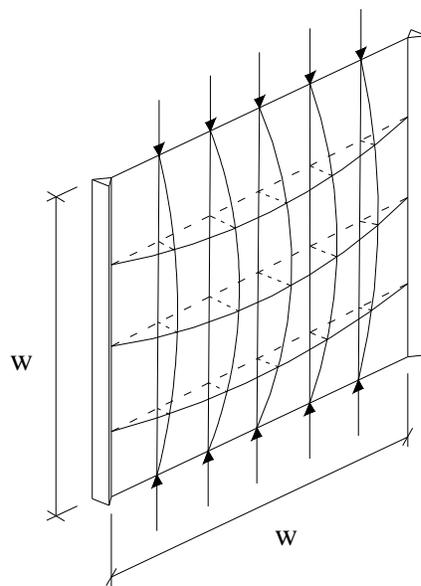


Figura 2.13 – Chapa comprimida

Essa chapa foi discretizada em barras verticais e horizontais, para facilitar a compreensão do mecanismo. As barras verticais são comprimidas, enquanto as barras horizontais funcionam como *cintas de amarração*, dificultando a sua flambagem. Pode-se perceber que longe dos apoios, as barras horizontais têm menor poder de amarração, fazendo com que as barras verticais centrais flambem com uma facilidade maior, enquanto que próximo aos apoios, a flambagem das barras verticais é menor.

Antes que seja atingida a tensão crítica de flambagem, a tensão é uniforme em toda a chapa, conforme a Figura 2.14a. Ao aumentar a tensão de compressão na chapa, atingindo a tensão crítica de flambagem, as barras verticais centrais sofrem deformações, enquanto que

próximo aos apoios elas permanecem com deformações menores, ou mesmo sem deformações. Nesse momento, ocorre uma redistribuição de tensões, observando-se uma diminuição da tensão na parte central da chapa, e um acréscimo de tensão nas laterais da chapa, conforme a Figura 2.14b.

O nível de tensão pode continuar a sofrer acréscimos, e a chapa continuará a resistir, definindo a resistência pós-flambagem, até que a tensão na região dos apoios atinja o valor da tensão de escoamento, ocorrendo o colapso da chapa, conforme a Figura 2.14c.

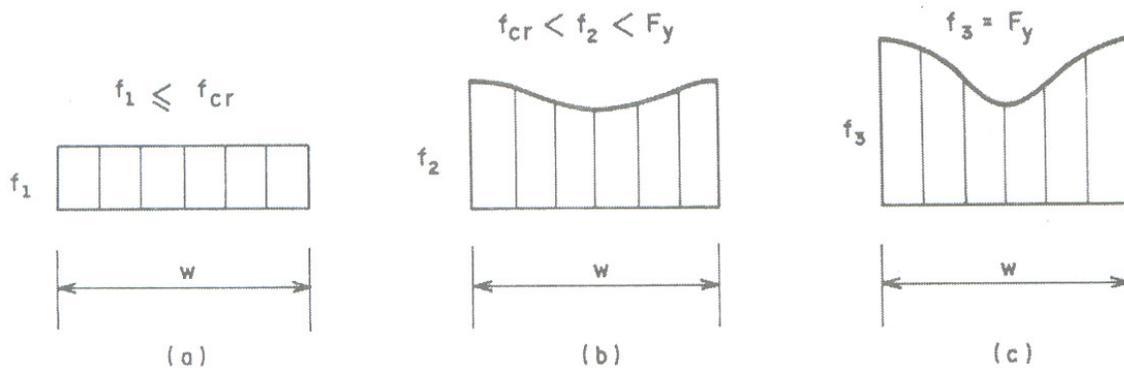


Figura 2.14 – Distribuição de tensões. Fonte: Malite [45]

Para facilitar a análise da resistência pós-flambagem e a ruína de chapas comprimidas, von Karman [73] propôs o conceito de largura efetiva. Esse conceito consiste em substituir a tensão não uniforme atuante ao longo de toda a largura w do elemento, por uma tensão uniforme, de valor igual a máxima tensão nas extremidades do elemento, atuando ao longo de uma largura b , inferior a largura w do elemento, conforme a Figura 2.15. Essa largura b é determinada de tal forma que a resultante provocada pela tensão uniforme atuando na largura b seja igual a resultante da tensão não uniforme atuando em toda a largura w . Ou seja:

$$\int_0^w f dx = b f_{\max} \quad (2.5)$$

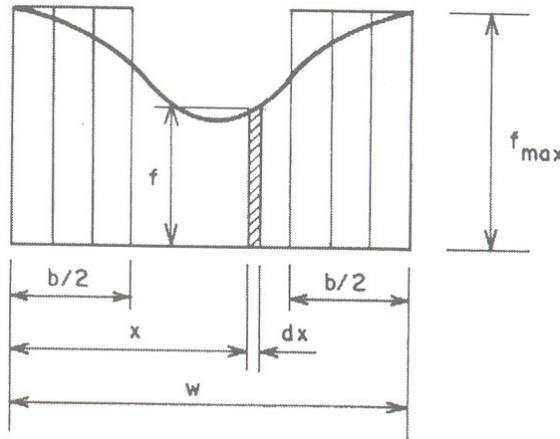


Figura 2.15 – Largura efetiva. Fonte: Malite [45]

A largura efetiva de um elemento representa uma largura que só entrará em colapso quando a tensão de compressão atingir a tensão de escoamento do material. Portanto, a determinação da largura efetiva de um elemento pode ser feita através da utilização da equação 2.3, fazendo-se $f_{cr} = f_y$, $\nu = 0,3$ (para o aço), $w = b$, $k = 4$ (para uma chapa apoiada nas duas extremidades paralelas a direção da tensão, ou seja, um elemento enrijecido), e isolando-se b :

$$f_y = 4 \frac{\pi^2 E}{12 (1 - 0,3^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$b = 1,9 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.7)$$

A equação 2.7 corresponde a fórmula de von Karman para a determinação da largura efetiva de elementos enrijecidos, proposta em 1932. Posteriormente, com a realização de diversos ensaios em perfis formados a frio, Winter [77] demonstrou que essa equação também pode ser utilizada para uma tensão f_{max} menor que a tensão de escoamento f_y .

Novos resultados experimentais obtidos por Sechler e Winter [77], e apresentados por Yu [81], concluíram que a largura efetiva de um elemento depende também da relação w/t . Com

esses resultados, Winter [77] propôs uma modificação para a equação 2.7, introduzindo fatores de correção empíricos e levando em consideração as imperfeições dos perfis:

$$b = 1,9 t \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \left[1 - 0,475 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \right] \quad (2.8)$$

Entre o período de 1946 e 1968, a equação 2.8 foi utilizada pela AISI [2] para a determinação da largura efetiva. Porém, devido a realização de novos ensaios e a experiência adquirida nesses cálculos, a equação 2.8 sofreu uma pequena adaptação, para se adequar melhor aos novos resultados obtidos:

$$b = 1,9 t \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \left[1 - 0,415 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \right] \quad (2.9)$$

Reescrevendo a equação 2.3, com os valores de $\nu = 0,3$ e $k = 4$, dividindo por f_{\max} e aplicando o operador raiz quadrada, temos:

$$\sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} = \frac{w}{1,9 t} \sqrt{\frac{f_{\text{cr}}}{f_{\max}}} \quad (2.10)$$

Substituindo a equação 2.10 em 2.9, obtemos:

$$b = w \sqrt{\frac{f_{\text{cr}}}{f_{\max}}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{f_{\text{cr}}}{f_{\max}}} \right) \quad (2.11)$$

A raiz quadrada da relação entre a máxima tensão atuante no elemento e a tensão crítica é denominada de índice de esbeltez reduzido da chapa:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_{\max}}{f_{cr}}} \quad (2.12)$$

Aplicando a equação 2.12 em 2.11, chegamos a equação para a determinação da largura efetiva de um elemento, utilizada pela norma brasileira NBR 14762/2001 [9]:

$$b = \frac{w \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \quad (2.13)$$

Desenvolvendo-se a equação 2.12, com a substituição da equação 2.3 e a utilização de $\nu = 0,3$, temos a equação para a determinação do índice de esbeltez reduzido, adotada pela NBR 14762/2001 [9]:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_{\max}}{f_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_{\max}}{k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) \left(\frac{w}{t} \right)^2}}} \Rightarrow \lambda_p = \frac{\frac{w}{t}}{0,95 \sqrt{\frac{k E}{f_{\max}}}} \quad (2.14)$$

A equação 2.9 aplica-se para elementos enrijecidos, ou seja, com $k = 4$. Porém, é possível determinar uma equação geral para diferentes valores de k , seguindo o mesmo raciocínio apresentado acima, bastando não substituir o valor de k por 4:

$$b = 0,95 t \sqrt{\frac{k E}{f_{\max}}} \left[1 - 0,208 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{k E}{f_{\max}}} \right] \quad (2.15)$$

Realizando-se os mesmos procedimentos já descritos, podemos chegar novamente a equação 2.13, partindo da equação 2.15. Portanto, a largura efetiva de um elemento é determinada com as mesmas equações, 2.13 e 2.14, seja ele enrijecido ou não, devendo-se utilizar

os valores de k apresentados nas tabelas 4 e 5 da NBR 14762/2001 [9], dependendo de como ocorre a distribuição de tensões no elemento.

Vale destacar que para valores de λ_p inferiores a 0,673, obtemos uma largura efetiva maior que a largura reta do elemento, o que não é possível. Portanto, concluímos que só para $\lambda_p > 0,673$ ocorre redução na largura do elemento. Para valores inferiores ou iguais a 0,673, a largura do elemento não sofre redução.

Conhecendo-se as tensões atuantes em cada elemento da seção do perfil, enrijecedores, mesas e alma, é possível determinar a largura efetiva desses elementos, através dos conceitos apresentados acima. Dessa forma encontra-se a área efetiva total do perfil, somando-se as larguras efetivas de todos os elementos, e multiplicando-se pela espessura do perfil. Com essa área efetiva são determinadas as resistências do perfil a compressão e a flexão, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 14762/2001 [9], que encontram-se no anexo B2.

2.3 Terças Treliçadas em Perfis Abertos

Durante muito tempo as terças em perfil, principalmente as formadas a frio, dominaram o mercado de coberturas metálicas. Porém, com a construção de obras cada vez maiores e a necessidade de obtenção de grandes espaços internos sem a presença de pilares, se fez necessário o desenvolvimento de novos sistemas de cobertura capazes de vencer grandes vãos, já que nesses casos os perfis simples tornam-se muito pesados e pouco econômicos. Surgiram então as terças treliçadas planas, que são treliças leves, amplamente empregadas nos Estados Unidos desde 1928, cuja utilização vem crescendo nos últimos anos no cenário nacional.

As treliças leves podem ser utilizadas para sistemas estruturais de cobertura, fechamentos laterais e pavimentos de edificações. A sua aplicação possibilita a adoção de arranjos estruturais leves com grandes vãos, diminuindo a quantidade de pilares no interior da construção e reduzindo as cargas nas fundações.

A utilização das treliças proporciona grandes áreas livres, e com a sua padronização, ocorre um aumento na velocidade e facilidade de montagem da estrutura. Além disso, existe a possibilidade de passagem de dutos e tubulações de ar condicionado e instalações elétricas através das treliças, permitindo um melhor aproveitamento do pé-direito da construção.

Os perfis utilizados para a composição das treliças podem ser os mais variados possíveis, sendo que o CBCA [34] apresentou em sua publicação soluções com os tipos de perfis de maior uso no Brasil, sendo eles perfis U laminados e formados a frio, T laminados, T eletrosoldados, cantoneiras laminadas e formadas a frio, tubos circulares e tubos quadrados, ambos sem costura. Alguns desses perfis são apresentados na Figura 2.16. Quando as treliças são compostas por perfis abertos nos banzos, geralmente são utilizadas cantoneiras duplas ou simples nas diagonais e montantes, existindo também a possibilidade da utilização de perfis U. Quando são adotados os perfis tubulares, eles são utilizados em toda a treliça, tanto nos banzos quanto nas diagonais e montantes.

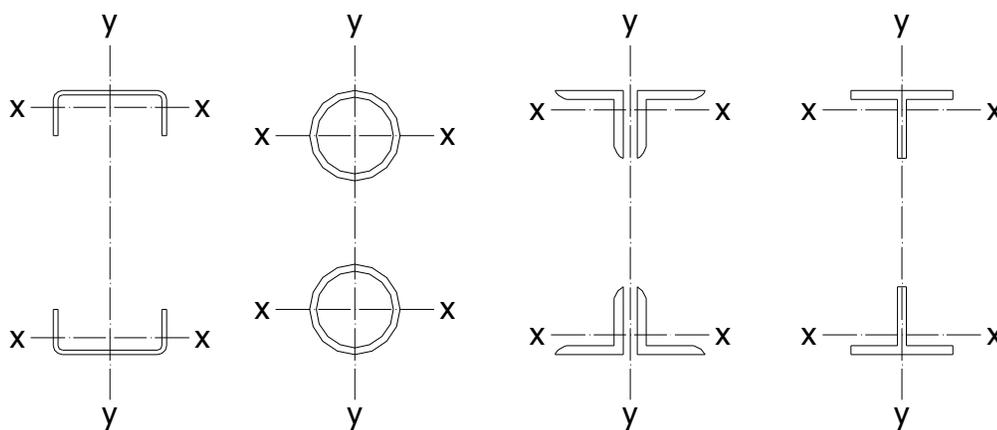


Figura 2.16 – Exemplos de perfis utilizados em treliças

Os manuais e publicações do SJI [70] e do CBCA [34] apresentam tabelas que possibilitam obter o peso final aproximado das treliças planas e a sua altura, em função da carga que a mesma deve suportar e do seu vão. Devido a padronização, os perfis utilizados nos banzos superior e inferior são os mesmos para uma determinada treliça, sendo utilizado apenas um perfil

para todas as diagonais. A geometria adotada para as treliças nessas publicações é do tipo Warren, com ou sem montante, conforme a Figura 2.17. Também são apresentadas recomendações sobre quais os comprimentos de flambagem a serem usados para as barras dos banzos das treliças.

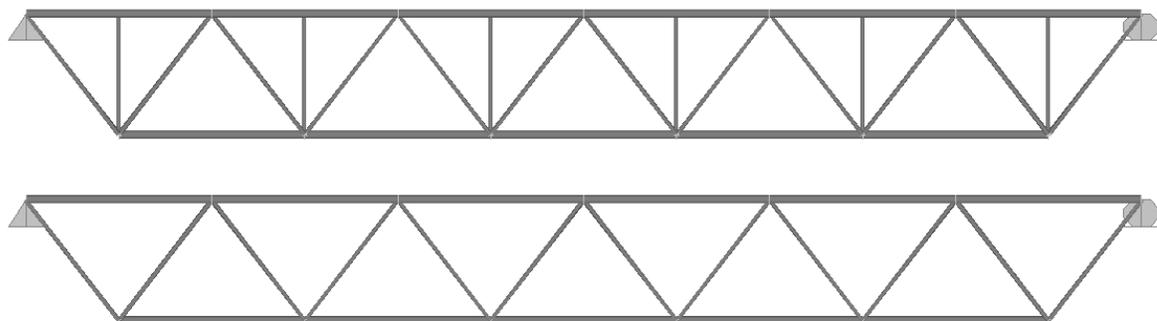


Figura 2.17 – Treliças Warren com e sem montantes

Informações sobre os apoios das treliças planas nas vigas principais ou colunas também são fornecidas nessas publicações, apresentando soluções para as mais diversas possibilidades de apoios, como colunas de concreto ou metálicas, vigas de alma cheia ou treliças. Algumas dessas soluções podem ser observadas na Figura 2.18.

Para limitar o comprimento de flambagem das barras dos banzos fora do plano da treliça, existe a necessidade da utilização de travamentos entre duas treliças planas adjacentes. Esses travamentos podem ser feitos horizontalmente ou em diagonal, conforme a Figura 2.19. Além de limitar o comprimento de flambagem, os travamentos também são importantes para o alinhamento e estabilização da treliça durante a montagem.

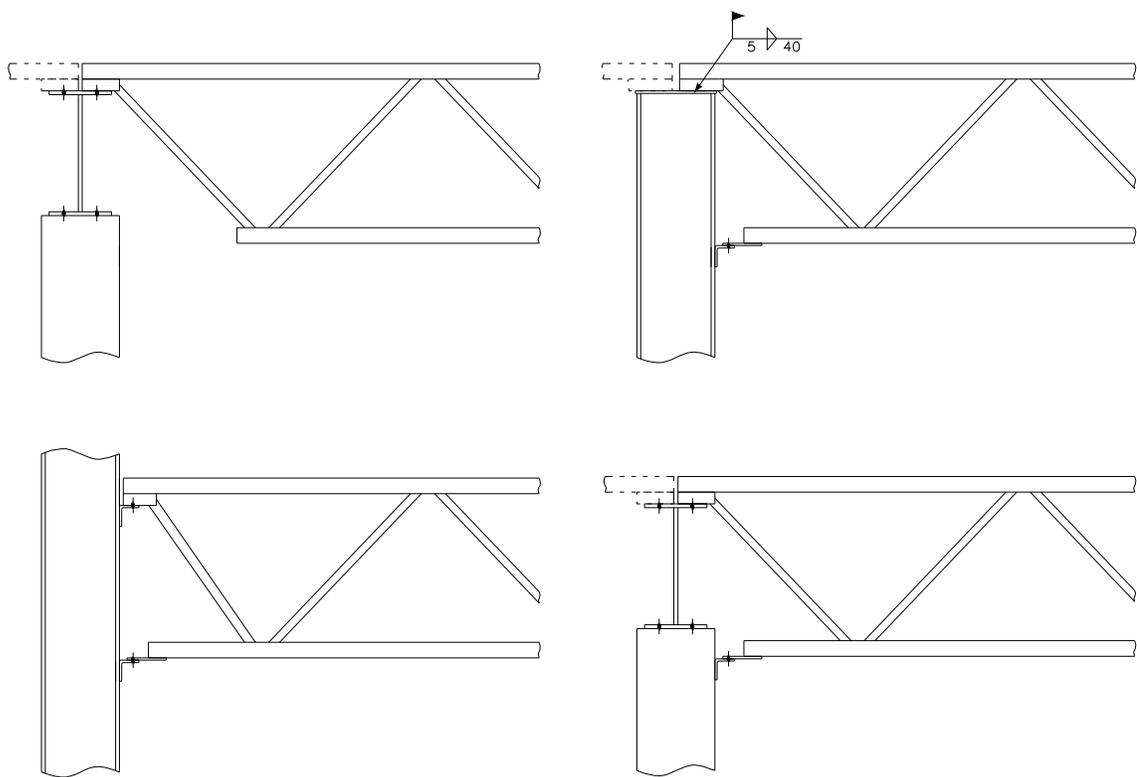


Figura 2.18 – Exemplos de apoios das treliças planas

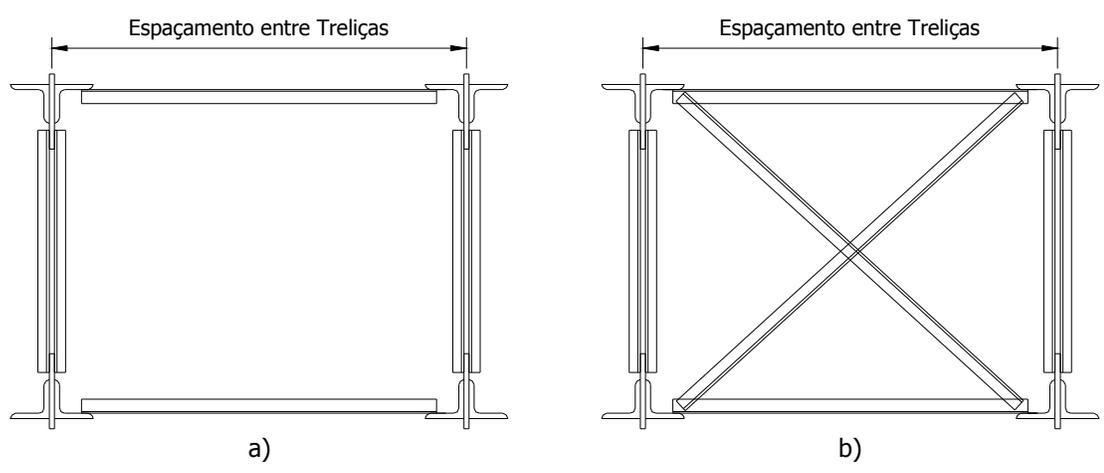


Figura 2.19 – Travamentos entre duas treliças planas: a) horizontal, b) diagonal

As cargas são aplicadas no banzo superior da treliça, podendo ser concentradas nos nós ou distribuídas linearmente ao longo das barras. Assim, o banzo superior das treliças está submetido a esforços combinados, ocorrendo força axial simultaneamente com flexão em relação

aos dois eixos principais de inércia. Considerando-se o peso próprio dos perfis como uma carga distribuída ao longo de todas as barras, os perfis do banzo inferior e as diagonais também estão submetidos a esforços combinados, sendo necessário efetuar o dimensionamento à flexão composta.

Como os perfis utilizados para compor as treliças podem ser laminados ou formados a frio, as verificações devem ser feitas de acordo com as normas específicas, como a NBR 8800/2008 [8], AISC [1], Eurocode 3 Part 1-1 [21] e Eurocode 3 Part 1-8 [23] para os perfis laminados e a NBR 14762/2001 [9], AISI [2] e Eurocode 3 Part 1-3 [22] para os perfis formados a frio. Os procedimentos adotados pelas normas brasileiras podem ser encontrados no anexo B.

2.4 Terças Treliçadas Tubulares

Conforme apresentado pelo CIDECT [16], ao comparar as propriedades de diferentes perfis com pesos por metro linear muito próximos, nota-se que os perfis tubulares apresentam uma resistência a torção muito maior que os perfis abertos, principalmente o perfil tubular circular, conforme pode ser observado na Figura 2.20. Devido a esse fato, Rautaruukki [56] cita que os perfis tubulares circulares não são passíveis de sofrer flambagem lateral com torção. Já nos perfis tubulares quadrados e retangulares, a flambagem lateral com torção não governa os cálculos na maioria dos casos, devendo ser levada em conta apenas para o caso de seções tubulares quadradas muito longas, e para seções tubulares retangulares longas com pequena relação b/h . Essa pode ser considerada uma grande vantagem dos perfis tubulares, já que nos perfis abertos, a flambagem lateral com torção comumente governa os cálculos.

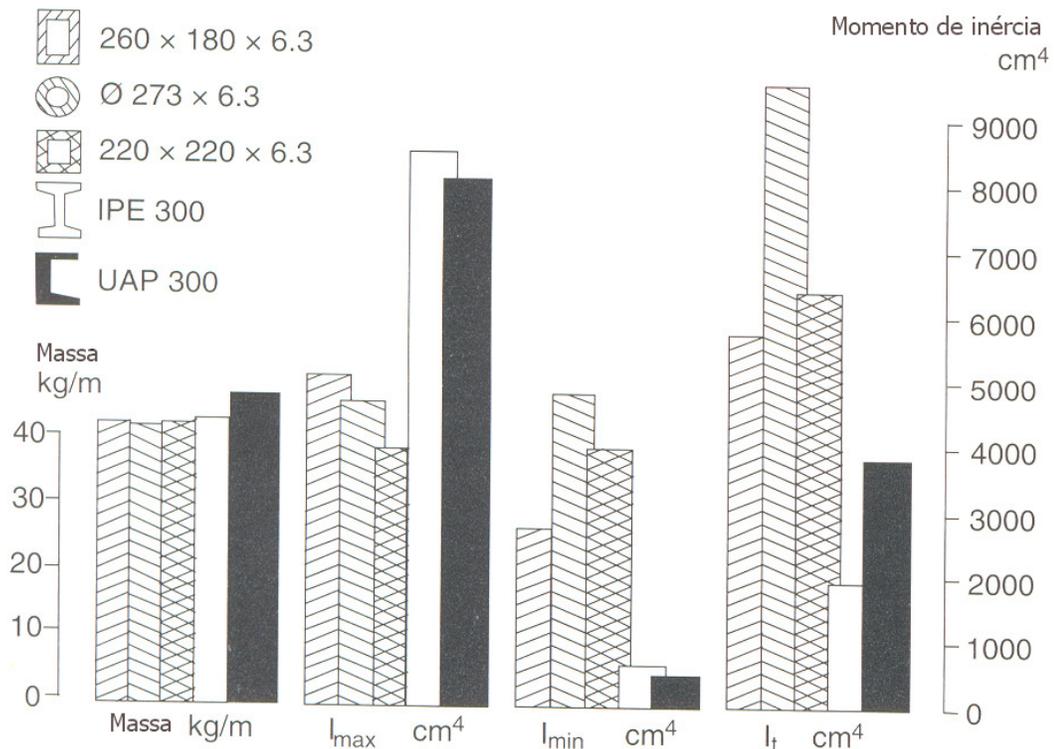


Figura 2.20 – Comparação das propriedades geométricas dos perfis. Adaptado de CIDECT [16]

Pode-se notar também a vantagem dos perfis tubulares quando submetidos à compressão simples, desde que a barra possua o mesmo comprimento de flambagem em ambos os planos, pois os perfis abertos apresentam um menor momento de inércia com relação ao eixo de menor inércia, quando comparados com os perfis tubulares. Com isso, a flambagem em relação a esse eixo governa o dimensionamento dos perfis abertos, reduzindo a sua resistência.

Para a flexão simples, os perfis abertos são mais vantajosos, pois possuem um maior momento de inércia com relação ao eixo de maior inércia do que os perfis tubulares. Porém, quando submetidos a flexão oblíqua ou composta, os perfis tubulares levam vantagem devido ao fato de possuírem ótima resistência a torção e boa resistência a flexão em relação aos dois eixos principais.

Nas treliças estudadas neste trabalho, os carregamentos foram considerados distribuídos linearmente nos seus banzos superiores, devido ao peso próprio dos perfis e a fixação das telhas

ao longo da treliça, e não somente nos seus nós, caracterizando a flexão composta, com a presença de esforços combinados. Dessa forma, a análise de treliças compostas por perfis tubulares, que apresentam elevada resistência aos esforços combinados, é justificada, apesar da sua pouca aplicação atualmente no cenário nacional.

Além das vantagens com relação a sua resistência, os perfis tubulares apresentam uma maior facilidade de manutenção, já que não possuem cantos e arestas que permitem o acúmulo de sujeira e poeira. Os perfis tubulares também apresentam menor área de pintura quando comparados com os perfis abertos, reduzindo o custo necessário para a execução da proteção contra a corrosão. Outro fator importante é a estética proporcionada pelos perfis tubulares, sendo muito requisitados pelos arquitetos, proporcionando maior harmonia com o restante do ambiente e permitindo que a estrutura fique exposta sem causar prejuízos à beleza da estrutura.

Dentre os perfis tubulares, existem os circulares, os quadrados e os retangulares. Os perfis tubulares circulares obtidos através do processo de laminação apresentam um nível de tensões residuais devido ao resfriamento muito pequeno. Já os perfis quadrados e retangulares, são obtidos, no Brasil, a partir dos perfis circulares, que são amassados para a obtenção do perfil desejado. Esse processo provoca o aparecimento de níveis de tensões residuais maiores nos perfis quadrados e retangulares. Por esse motivo, optou-se pela utilização dos perfis circulares nos estudos das terças treliçadas tubulares.

Além de analisar as treliças tubulares planas, também foram realizadas análises de um modelo de terça inovador: as treliças tubulares multiplanares. Por serem estruturas espaciais, esse tipo de treliça dispensa a presença de travamentos entre duas treliças adjacentes, como é necessário para as treliças planas. Esse fato deve ser levado em conta na escolha do tipo de terça a ser adotado na cobertura, já que o posicionamento dos travamentos é trabalhoso e demorado, encarecendo o sistema de cobertura.

Como os carregamentos foram considerados distribuídos ao longo das barras dos banzos superiores das treliças, todas as barras devem ser verificadas a flexão composta, podendo ser uma flexo-compressão ou uma flexo-tração. As barras do banzo inferior, diagonais e montantes também devem ser verificadas da mesma maneira, pois possuem o seu peso próprio distribuído

linearmente, provocando flexão em conjunto com uma compressão ou tração. Os procedimentos para a determinação dos esforços resistentes dos perfis tubulares circulares laminados podem ser encontrados nas especificações e normas nacionais e internacionais, sendo que os procedimentos da norma brasileira NBR 8800/2008 [8] podem ser encontrados no anexo B1.

As diferenças existentes entre a NBR 8800/1986 [7] e a NBR 8800/2008 [8] não provocam grandes alterações na determinação dos esforços resistentes dos perfis tubulares. Isso se deve ao fato de que, para a determinação do esforço resistente de compressão, a curva de flambagem utilizada na NBR 8800/1986 [7] para os perfis tubulares é a curva a, que é muito semelhante a curva adotada na NBR 8800/2008 [8], como pode ser observado na Figura 2.3. Uma comparação entre a norma vigente e sua antecessora é apresentada no item 4.1.

3. O PROGRAMA AUTOTERÇAS

Para a análise das terças em perfil laminado e em perfil formado a frio, foi desenvolvido o programa AutoTerças, que realiza a verificação e o dimensionamento desses perfis utilizando-se a linguagem Object Pascal, através do programa Delphi 2005. A seguir serão apresentados alguns dos procedimentos implementados no programa, além de uma breve explicação do funcionamento do mesmo. Maiores detalhes sobre o programa podem ser encontrados no anexo C.1.

3.1 Terças em Perfil Laminado

Os procedimentos implementados no programa, referentes à verificação e dimensionamento de perfis laminados, seguem as recomendações apresentadas pela NBR 8800/2008 [8] e NBR 8800/1986 [7], sendo que o usuário pode escolher se deseja realizar os cálculos segundo a norma vigente, ou conforme as recomendações da norma anterior. Essa opção foi adotada para possibilitar uma análise das principais mudanças ocorridas na norma referente aos perfis laminados.

Os tipos de perfis disponíveis para análise no programa são os perfis U e I, conforme a Figura 3.1, que são os laminados mais utilizados para terças de coberturas metálicas. As propriedades geométricas dos perfis são calculadas baseadas nas dimensões das seções transversais fornecidas pelo usuário, no caso da verificação de um perfil, ou obtidas por uma lista de perfis, no caso de um dimensionamento. Essa lista contém as dimensões dos perfis U e I

fabricados comercialmente, lembrando que essas dimensões são padronizadas no caso dos perfis laminados.

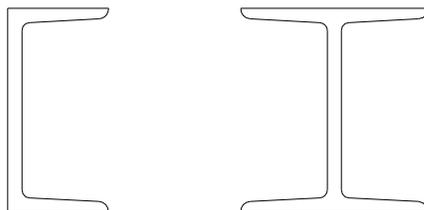


Figura 3.1 – Tipos de perfis laminados disponíveis no programa

Os perfis laminados de padrão americano possuem mesas não paralelas, com uma inclinação na sua face interna, e raios de curvatura que não são fornecidos nos catálogos comerciais. Dessa maneira, optou-se por considerar, no cálculo das propriedades geométricas, que os perfis possuem mesas paralelas e não apresentam raios de curvatura. Essas propriedades geométricas são utilizadas para o cálculo dos esforços resistentes do perfil, segundo os procedimentos da norma escolhida pelo usuário. Os esforços resistentes de tração, compressão e flexão são obtidos de maneira direta, ou seja, sem a necessidade de processos iterativos, como no caso dos perfis formados a frio.

Os esforços solicitantes de cálculo são determinados pelo programa, baseado nos carregamentos e combinações fornecidas pelo usuário. Os esforços solicitantes e resistentes são comparados conforme os procedimentos de norma, e os resultados são apresentados na tela do programa, e também em um relatório. Também é realizada a análise da flecha dos perfis, conforme os limites estabelecidos pelas normas.

Com a possibilidade de escolher entre a NBR 8800/2008 [8] e a NBR 8800/1986 [7], pôde-se efetuar uma comparação entre elas, analisando quais os impactos das alterações nos esforços resistentes dos perfis. Essa comparação é apresentada no item 3.5.

3.2 Terças em Perfil Formado a Frio

Para os perfis formados a frio foram seguidos os procedimentos apresentados pela NBR 14762/2001 [9] para a determinação dos esforços resistentes dos perfis. Os tipos de seções analisados são os perfis U e Z simples e enrijecidos, conforme a Figura 3.2, que são os quatro tipos de seções mais utilizados para terças metálicas em perfis formados a frio. As suas propriedades geométricas são calculadas pelo programa pelas dimensões fornecidas pelo usuário ou obtidas por uma lista de perfis. Essa lista contém as dimensões dos perfis existentes na NBR 6355/2003 [5].

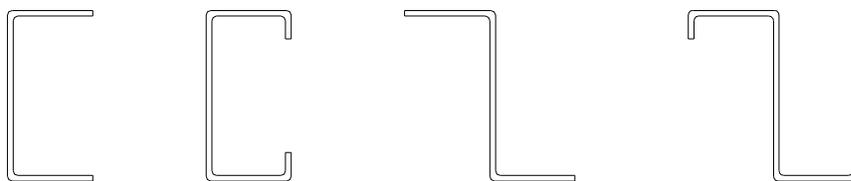


Figura 3.2 – Tipos de perfis formados a frio disponíveis no programa

Com as propriedades geométricas, são determinados os esforços resistentes de cálculo, e comparados com os esforços solicitantes de cálculo, calculados pelo programa com base nas combinações e carregamentos fornecidos pelo usuário. Os resultados das comparações entre os esforços solicitantes e resistentes são apresentados na tela e em forma de relatório. As análises das flechas também são feitas, seguindo o limite estabelecido pela norma.

No caso dos perfis formados a frio, diferentemente dos perfis laminados, a determinação de alguns esforços resistentes exige a utilização de processos iterativos, devido ao emprego do conceito das larguras efetivas. Assim, o desenvolvimento de um programa que efetue esses cálculos é de grande ajuda para os projetistas.

A obtenção da resistência à tração do perfil é simples, e como utiliza a área bruta, não é necessário realizar nenhum processo iterativo, uma vez que o conceito da largura efetiva só é

levado em consideração quando existem elementos (alma, mesa e enrijecedor) comprimidos no perfil, ocorrendo a flambagem local dos mesmos.

Já para a determinação da resistência à compressão, existe a necessidade de utilizar um processo iterativo, considerando que inicialmente a área efetiva do perfil corresponde a sua área bruta. Efetuam-se então os cálculos apresentados na NBR 14762/2001 [9] para encontrar a tensão atuante em cada elemento do perfil. Como trata-se apenas de compressão, a tensão será constante ao longo de toda a seção, ou seja, será a mesma para todos os elementos, e deve ser calculada por $\sigma = \rho \cdot f_y$, onde ρ corresponde ao fator de redução associado a flambagem, e é determinado segundo os procedimentos de norma, considerando que a área efetiva do perfil corresponde a área bruta.

Com essa tensão determinam-se as larguras efetivas de cada elemento do perfil, conforme os procedimentos apresentados no item 7.2 da NBR 14762/2001 [9], encontrando uma nova área efetiva, conforme a Figura 3.3.

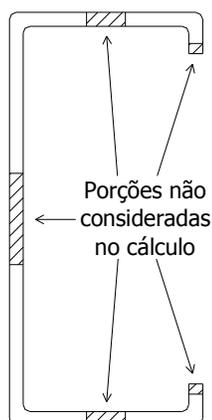


Figura 3.3 – Área efetiva de um perfil

Essa nova área efetiva é então adotada para iniciar uma nova iteração, repetindo o processo descrito acima, ou seja, determinando-se um novo valor de ρ , que conduz a uma nova tensão atuante nos elementos do perfil. Com essa tensão são calculadas novas larguras efetivas e

uma nova área efetiva. O processo iterativo repete-se até que a diferença entre as áreas efetivas de duas iterações consecutivas seja inferior a 0,5%.

Para encontrar a resistência a flexão simples do perfil, também é utilizado o conceito da largura efetiva, porém, diferentemente do fato observado na determinação da resistência a compressão dos perfis, onde toda a seção possui uma tensão de compressão constante, no caso da flexão a tensão varia ao longo da seção do perfil, sendo comum a presença de tensões de tração e compressão em uma mesma seção, como pode ser observado na Figura 3.4.

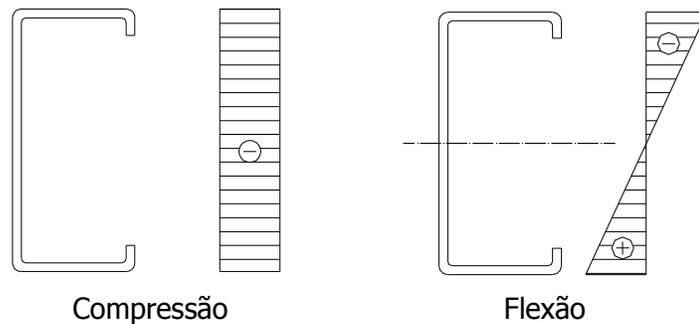


Figura 3.4 – Tensões em perfil comprimido e fletido

Devido a esse gradiente de tensões, as larguras efetivas obtidas em dois elementos simétricos de uma seção são diferentes, provocando um deslocamento do centro de gravidade da seção do perfil, conforme a Figura 3.5. Esse deslocamento do centro de gravidade interfere na determinação do momento resistente, pois ele depende do módulo de resistência elástico da seção efetiva, conforme a equação 3.1, que é uma razão entre o momento de inércia da seção efetiva e a distância entre o centro de gravidade e a borda comprimida do perfil, como apresentado na equação 3.2.

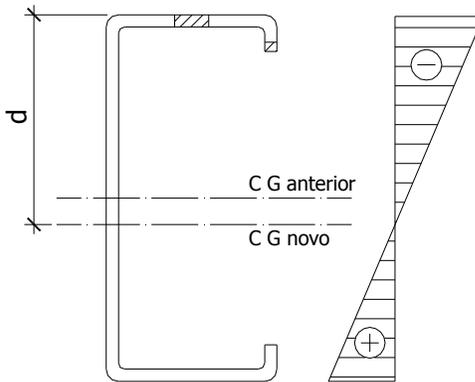


Figura 3.5 – Deslocamento do centro de gravidade

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \sigma}{\gamma} \quad (3.1)$$

$$W_{ef} = \frac{I_{ef}}{d} \quad (3.2)$$

Uma grande diferença entre o procedimento de determinação da normal resistente de compressão e do momento resistente está na obtenção da máxima tensão atuante na seção. Na compressão ela depende do fator de redução associado à flambagem (ρ), que por sua vez depende da área efetiva do perfil. Já na flexão, a tensão depende do fator de redução associado à flambagem lateral com torção (ρ_{FLT}), que depende do módulo de resistência elástico da seção bruta, e não da seção efetiva, conforme as equações 3.3 à 3.6.

Compressão

$$\sigma = \rho f_y \quad (3.3)$$

ρ é função de λ_0

$$\lambda_0 = \left[\frac{A_{ef} f_y}{N_e} \right]^{0,5} \quad (3.5)$$

Flexão

$$\sigma = \rho_{FLT} f_y \quad (3.4)$$

ρ_{FLT} é função de λ_0

$$\lambda_0 = \left[\frac{W_c f_y}{M_e} \right]^{0,5} \quad (3.6)$$

Portanto, o processo iterativo utilizado para a compressão não é utilizado para a flexão. Porém existe a necessidade da aplicação de iterações em uma outra etapa da determinação da resistência a flexão, conforme explicado a seguir.

Apesar de a máxima tensão atuante no perfil não depender do módulo de resistência elástico da seção efetiva, o momento resistente depende, conforme a equação 3.1. Portanto, deve-se encontrar a área efetiva do perfil, determinando as tensões atuantes em cada elemento da seção (enrijecedor, mesa e alma), que são diferentes entre si, podendo ser constantes ou apresentarem um gradiente de tensões. Essa determinação é feita com base no item 7.2 da NBR 14762/2001 [9]. Com essa área efetiva, calcula-se o momento de inércia da seção efetiva.

Um fator que dificulta esse cálculo, é que ao encontrar a largura efetiva de um elemento, como a alma, por exemplo, uma parcela desse elemento é desconsiderada no cálculo, mudando a posição do centro de gravidade da seção. Essa mudança altera as tensões atuantes no próprio elemento, sendo necessário recalculá-la sua largura efetiva. Esse fato pode ser compreendido através da Figura 3.6, onde pode-se notar que as tensões atuantes na alma antes e depois da determinação da largura efetiva desse elemento são diferentes. Apesar de a máxima tensão de compressão atuante na seção continuar com o mesmo valor σ , devido ao rebaixamento do centro de gravidade da seção, a tensão σ_1 sofre um pequeno aumento passando a valer σ_1' , já a tensão σ_2 sofre uma diminuição, passando para σ_2' . Como as tensões atuantes são diferentes, a largura efetiva da alma também será diferente.

Nesse ponto utiliza-se o processo iterativo, recalculando-se a tensão atuante nos elementos e a área efetiva, sempre que ocorre uma mudança na posição do centro de gravidade da seção do perfil. Novamente o processo iterativo é encerrado quando a diferença entre as áreas efetivas de duas iterações consecutivas é inferior a 0,5%.

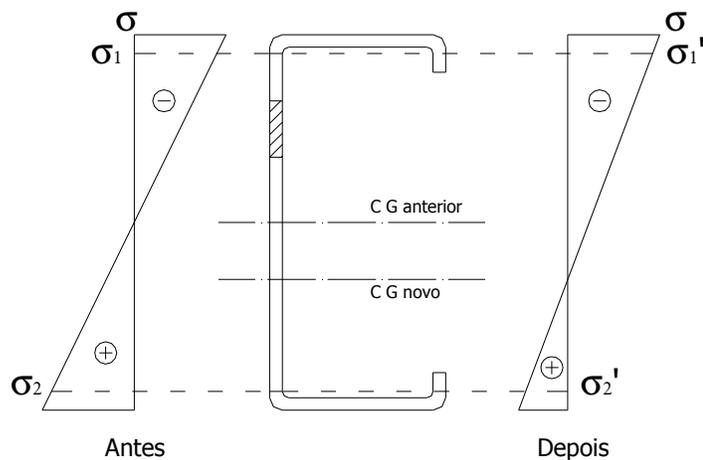


Figura 3.6 – Alteração nas tensões atuantes na alma

Devido à inclinação do telhado, os carregamentos aplicados na terça ocorrem em relação aos dois eixos da seção do perfil, caracterizando a flexão oblíqua. Portanto, o procedimento descrito acima para a determinação do momento resistente, foi implementado para os dois eixos principais.

A verificação da flambagem por distorção da seção transversal, para barras submetidas à compressão centrada ou à flexão, pode ser dispensada para perfis U e Z simples. Para os perfis enrijecidos, o cálculo foi realizado de acordo com o anexo D da NBR 14762/2001 [9].

3.3 Utilização do Programa

A seguir serão apresentados os procedimentos básicos para a utilização do programa, sendo que informações mais detalhadas podem ser encontradas no anexo C1. Na tela inicial do programa, apresentada na Figura 3.7, o usuário deve escolher o tipo de aço e o tipo de perfil. Também devem ser fornecidas as propriedades do aço, vão e número de linhas de corrente da terça. A seguir o usuário escolhe o tipo de análise desejada, se é uma verificação ou um dimensionamento. Caso opte pela verificação, as dimensões do perfil devem ser fornecidas, caso contrário as dimensões serão procuradas na lista de perfis do programa, que pode ser alterada manualmente.

O usuário pode montar o número de combinações que desejar, fornecendo o valor dos carregamentos e os coeficientes de ponderação. Os carregamentos são considerados distribuídos linearmente ao longo do perfil, e também existe a possibilidade de considerar ou não o peso próprio do perfil, e a inclinação do telhado.

Os resultados obtidos pelo programa, como propriedades geométricas, esforços resistentes, equações de interação e flecha são exibidos na tela e também fornecidos em um relatório gerado automaticamente. No caso de um dimensionamento, serão exibidos na tela apenas os resultados referentes ao perfil selecionado, ou seja, o perfil mais leve pertencente à lista que resiste aos carregamentos aplicados. As dimensões desse perfil também são exibidas na tela, e no relatório gerado pelo programa são exibidos os resultados de todos os perfis da lista.

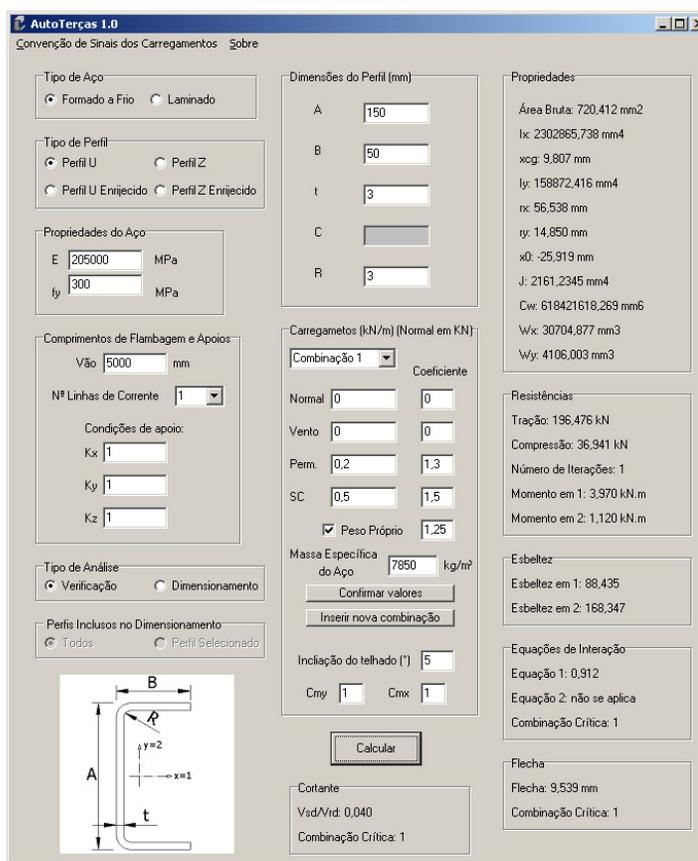


Figura 3.7 – Tela do programa AutoTerças

3.4 Validação do Programa

Foram realizadas algumas validações do programa AutoTerças, comparando-se os resultados obtidos com cálculos manuais e valores de norma. As validações foram feitas com relação às propriedades geométricas dos perfis e aos esforços resistentes.

- Propriedades Geométricas:

Para verificar se os cálculos das propriedades geométricas dos perfis estão sendo feitos corretamente pelo programa, os resultados obtidos com ele foram comparados com as propriedades geométricas das tabelas de perfis comerciais, para os perfis laminados, e das tabelas contidas na NBR 6355/2003 [5], para os perfis formados a frio. Algumas comparações são apresentadas nas Tabelas 3.1 a 3.7. Para os perfis laminados também foram realizadas análises com o programa AutoCAD. A nomenclatura utilizada ao longo deste trabalho corresponde a: altura x largura da mesa x espessura da alma x espessura da mesa, para os perfis laminados e altura x largura da mesa x espessura x largura do enrijecedor de borda, para os perfis formados a frio, considerando que o raio de dobramento interno é igual à espessura do perfil.

| Perfil U - 102x41,8x6,3x7,5 | | | | | | |
|-----------------------------|----------|------------|-----------|---------|------------|-----------|
| | Catálogo | AutoTerças | Diferença | AutoCAD | AutoTerças | Diferença |
| Área (cm ²) | 11,9 | 11,8 | 0,84% | 11,80 | 11,8 | 0,00% |
| Ix (cm ⁴) | 174,4 | 174,8 | 0,23% | 174,80 | 174,8 | 0,00% |
| Wx (cm ³) | 34,3 | 34,3 | 0,00% | - | 34,3 | - |
| Zx (cm ³) | 41,2 | 41,5 | 0,73% | - | 41,5 | - |
| rx (cm) | 3,84 | 3,86 | 0,52% | 3,86 | 3,86 | 0,00% |
| Iy (cm ⁴) | 15,5 | 15,62 | 0,77% | 18,50 | 18,5 | 0,00% |
| Wy (cm ³) | 5,1 | 6,3 | 23,53% | - | 6,3 | - |
| Zy (cm ³) | 10,2 | 12,8 | 25,49% | - | 12,8 | - |
| ry (cm) | 1,14 | 1,26 | 10,53% | 1,26 | 1,26 | 0,00% |
| xcg (cm) | 1,15 | 1,26 | 9,57% | 1,26 | 1,26 | 0,00% |

Tabela 3.1 – Propriedades geométricas do perfil U laminado

| Perfil I - 254x122x11,4x12,5 | | | | | | |
|------------------------------|----------|------------|-----------|---------|------------|-----------|
| | Catálogo | AutoTerças | Diferença | AutoCAD | AutoTerças | Diferença |
| Área (cm ²) | 56,9 | 56,6 | 0,53% | 56,6 | 56,6 | 0,00% |
| Ix (cm ⁴) | 5610 | 5591,9 | 0,32% | 5591,9 | 5591,9 | 0,00% |
| Wx (cm ³) | 442 | 440,3 | 0,38% | - | 440,3 | - |
| Zx (cm ³) | 515 | 517,7 | 0,52% | - | 517,7 | - |
| rx (cm) | 9,93 | 9,94 | 0,10% | 9,94 | 9,94 | 0,00% |
| Iy (cm ⁴) | 312,0 | 381,1 | 22,15% | 381,1 | 381,1 | 0,00% |
| Wy (cm ³) | 51,3 | 62,5 | 21,83% | - | 62,5 | - |
| Zy (cm ³) | 90,5 | 93 | 2,76% | - | 93 | - |
| ry (cm) | 2,34 | 2,59 | 10,68% | 2,59 | 2,59 | 0,00% |

Tabela 3.2 – Propriedades geométricas do perfil I laminado

Pode-se notar que as propriedades dos perfis laminados referentes ao eixo y obtidas com o programa apresentam uma diferença considerável das apresentadas no catálogo. Portanto, para validar as propriedades referentes ao eixo y, foram feitas comparações com o programa AutoCAD, considerando os perfis exatamente iguais aos do AutoTerças, conforme a Figura 3.8. Os resultados são apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, e demonstram que os valores das propriedades obtidas com o programa são os mesmos que os obtidos com o programa AutoCAD.

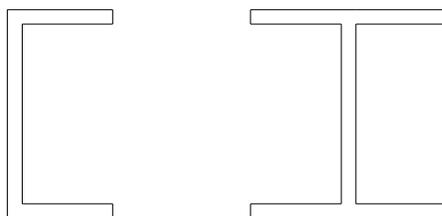


Figura 3.8 – Perfis laminados considerados pelo programa

A diferença entre as propriedades referentes ao eixo y contidas no catálogo e obtidas com o programa se deve ao fato de que no programa não foi considerada a inclinação das faces internas das mesas dos perfis e nem os raios de curvatura. Isso pode ser comprovado pelas Tabelas 3.3 e 3.4, que correspondem às propriedades geométricas dos mesmos perfis das Tabelas 3.1 e 3.2 considerando uma inclinação de 17% nas faces internas das mesas. Os valores das propriedades geométricas foram obtidas com o programa AutoCAD.

| Perfil U - 102x41,8x6,3x7,5 | | | |
|-----------------------------|----------|---------|-----------|
| | Catálogo | AutoCAD | Diferença |
| Área (cm ²) | 11,9 | 11,8 | 0,84% |
| Ix (cm ⁴) | 174,4 | 173,9 | 0,29% |
| rx (cm) | 3,84 | 3,85 | 0,26% |
| Iy (cm ⁴) | 15,5 | 15,5 | 0,00% |
| ry (cm) | 1,14 | 1,15 | 0,88% |
| xcg (cm) | 1,15 | 1,15 | 0,00% |

Tabela 3.3 – Propriedades geométricas do perfil U laminado com faces internas das mesas inclinadas

| Perfil I - 254x122x11,4x12,5 | | | |
|------------------------------|----------|---------|-----------|
| | Catálogo | AutoCAD | Diferença |
| Área (cm ²) | 56,9 | 56,6 | 0,53% |
| Ix (cm ⁴) | 5610 | 5573,2 | 0,66% |
| rx (cm) | 9,93 | 9,92 | 0,10% |
| Iy (cm ⁴) | 312,0 | 317,2 | 1,67% |
| ry (cm) | 2,34 | 2,37 | 1,28% |

Tabela 3.4 – Propriedades geométricas do perfil I laminado com faces internas das mesas inclinadas

Pode-se perceber que a diferença entre os valores do catálogo e os obtidos com o AutoCAD com uma inclinação de 17% são bem próximos. Porém, como o catálogo não fornece qual a inclinação de cada perfil e nem o raio de curvatura, para os cálculos efetuados pelo AutoTerças foram considerados os perfis conforme a Figura 3.8.

Nas Tabelas 3.5 a 3.7, referentes aos perfis formados a frio, os valores em destaque foram recalculados manualmente utilizando as fórmulas propostas pela NBR 6355/2003 [5], pois os valores tabelados não correspondiam aos encontrados pela formulação proposta pela própria norma. Não foram apresentadas comparações para o perfil Z simples, pois a NBR 6355/2003 [5] não possui este tipo de perfil tabelado.

As comparações demonstram que os resultados encontrados pelo programa são muito próximos aos apresentados pela NBR 6355/2003 [5], para os perfis formados a frio, com

diferenças inferiores a 1,00%. No caso dos perfis laminados foi encontrada uma diferença considerável com relação às propriedades referentes ao eixo y, pois o programa não considera a inclinação das faces internas das mesas dos perfis e nem os raios de curvatura, já que esses valores não são fornecidos nas tabelas dos catálogos de perfis laminados.

| Perfil U - 100x50x2.65 | | | |
|-------------------------|----------|------------|-----------|
| | NBR 6355 | AutoTerças | Diferença |
| Área (cm ²) | 5,07 | 5,07 | 0,00% |
| Ix (cm ⁴) | 79,42 | 79,31 | 0,14% |
| Wx (cm ³) | 15,88 | 15,86 | 0,13% |
| rx (cm) | 3,96 | 3,96 | 0,00% |
| Iy (cm ⁴) | 12,57 | 12,58 | 0,08% |
| Wy (cm ³) | 3,46 | 3,47 | 0,29% |
| ry (cm) | 1,57 | 1,58 | 0,64% |
| It (cm ⁴) | 0,119 | 0,119 | 0,00% |
| Cw (cm ⁶) | 211,18 | 211,18 | 0,00% |

Tabela 3.5 – Propriedades geométricas do perfil U formado a frio

| Perfil U enrijecido - 250x100x25x4.25 | | | |
|---------------------------------------|----------|------------|-----------|
| | NBR 6355 | AutoTerças | Diferença |
| Área (cm ²) | 20,06 | 20,06 | 0,00% |
| Ix (cm ⁴) | 1928,96 | 1925,70 | 0,17% |
| Wx (cm ³) | 154,32 | 154,06 | 0,17% |
| rx (cm) | 9,81 | 9,80 | 0,10% |
| Iy (cm ⁴) | 252,32 | 252,46 | 0,06% |
| Wy (cm ³) | 35,90 | 35,92 | 0,06% |
| ry (cm) | 3,55 | 3,55 | 0,00% |
| It (cm ⁴) | 1,207 | 1,208 | 0,08% |
| Cw (cm ⁶) | 32218,03 | 32218,03 | 0,00% |

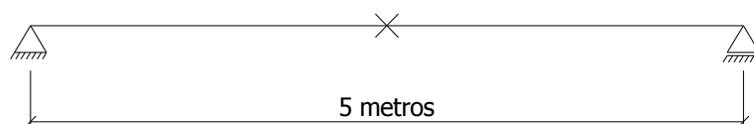
Tabela 3.6 – Propriedades geométricas do perfil U enrijecido formado a frio

| Perfil Z enrijecido - 50x25x10x1.20 | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------|-----------|
| | NBR 6355 | AutoTerças | Diferença |
| Área (cm ²) | 1,35 | 1,35 | 0,00% |
| I _x (cm ⁴) | 5,24 | 5,23 | 0,19% |
| W _x (cm ³) | 2,09 | 2,09 | 0,00% |
| r _x (cm) | 1,97 | 1,97 | 0,00% |
| I _y (cm ⁴) | 2,25 | 2,25 | 0,00% |
| W _y (cm ³) | 0,92 | 0,92 | 0,00% |
| r _y (cm) | 1,29 | 1,29 | 0,00% |
| I _{xy} (cm ⁴) | 2,61 | 2,61 | 0,00% |
| α (°) | 30,10 | 30,12 | 0,07% |
| I ₁ (cm ⁴) | 6,75 | 6,74 | 0,15% |
| I ₂ (cm ⁴) | 0,74 | 0,74 | 0,00% |
| I _t (cm ⁴) | 0,006 | 0,006 | 0,00% |
| C _w (cm ⁶) | 9,83 | 9,83 | 0,00% |

Tabela 3.7 – Propriedades geométricas do perfil Z enrijecido formado a frio

- Esforços Resistentes:

Os esforços resistentes foram calculados de duas maneiras: através de cálculo manual e utilizando-se o programa. Os resultados foram então comparados para validar os cálculos efetuados pelo programa.



| | Carga (kN/m) | Coeficiente | | | |
|-----------------|--------------|-------------|--------------|----------------------|-------|
| | | Favorável | Desfavorável | L _x (m) | |
| Permanente | 0,2 | 1,3 | 1,0 | 5,0 | |
| Sobrecarga | 0,5 | 1,5 | - | 2,5 | |
| Vento de Sucção | 1,3 | 1,4 | - | Inclinação (°) | 5,0 |
| | | | | f _y (Mpa) | 350,0 |

Figura 3.9 – Dados para validação dos esforços resistentes

Como o cálculo manual é muito extenso, os resultados foram apresentados tabelados. Os perfis analisados são um U laminado com dimensões 101,6x40,1x4,57x7,5, e um Z formado a

frio com dimensões 300x85x2. Os dados para a validação dos esforços resistentes encontram-se na Figura 3.9.

Os resultados comparativos entre os cálculos efetuados manualmente e com o programa AutoTerças podem ser observados nas Tabelas 3.6 e 3.7. Para o perfil laminado, os cálculos foram efetuados de acordo com a NBR 8800/2008 [8]. A comparação com a NBR 8800/1986 [7] é apresentada no item 3.5.

| | | Cálculo Manual | AutoTerças | Diferença |
|-----------------------|---------------------|----------------|---------------|-----------|
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 314,138 | 314,138 | 0,00% |
| Compressão | Tensão Máxima (Mpa) | 44,450 | 44,589 | 0,31% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 40,012 | 40,020 | 0,02% |
| Flexão em x | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | 6,885 | 6,887 | 0,03% |
| Flexão em y | $M_{y,Rd}$ (kN.m) | 2,731 | 2,731 | 0,00% |
| Equações de Interação | Equação 1 | 0,708 | 0,708 | 0,00% |
| | Equação 2 | não se aplica | não se aplica | - |

Tabela 3.8 – Esforços resistentes para o perfil laminado U 101,6x40,1x4,57x7,5

| | | Cálculo Manual | AutoTerças | Diferença |
|-----------------------|--|----------------|---------------|-----------|
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 294,907 | 294,907 | 0,00% |
| Compressão | Tensão Máxima (Mpa) | 181,410 | 181,401 | 0,00% |
| | Área Efetiva (cm ²) | 3,982 | 3,982 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 65,673 | 65,671 | 0,00% |
| Flexão em 1 | Tensão Máxima (Mpa) | 157,180 | 157,179 | 0,00% |
| | Área Efetiva (cm ²) | 8,438 | 8,438 | 0,00% |
| | Rebaixamento do CG (cm) | 1,555 | 1,554 | 0,06% |
| | Momento de Inércia Efetivo (cm ⁴) | 987,057 | 987,060 | 0,00% |
| | Módulo de Resistência Efetivo (cm ³) | 55,349 | 55,350 | 0,00% |
| | $M_{1,Rd}$ (kN.m) | 7,909 | 7,909 | 0,00% |
| Flexão em 2 | Tensão Máxima (Mpa) | 350,000 | 350,000 | 0,00% |
| | Área Efetiva (cm ²) | 7,149 | 7,149 | 0,00% |
| | Rebaixamento do CG (cm) | 0,432 | 0,432 | 0,00% |
| | Momento de Inércia Efetivo (cm ⁴) | 27,090 | 27,087 | 0,01% |
| | Módulo de Resistência Efetivo (cm ³) | 4,545 | 4,544 | 0,02% |
| | $M_{2,Rd}$ (kN.m) | 1,446 | 1,446 | 0,00% |
| Equações de Interação | Equação 1 | 0,765 | 0,765 | 0,00% |
| | Equação 2 | não se aplica | não se aplica | - |

Tabela 3.9 – Esforços resistentes para o perfil formado a frio Z 300x85x2

Pela comparação observada acima, nota-se que as diferenças entre o cálculo manual e o efetuado com o programa são muito pequenas, inferiores a 0,50%, demonstrando o bom funcionamento do programa.

3.5 Comparações entre a NBR 8800/1986 e a NBR 8800/2008

Como foram implementados os procedimentos de cálculo utilizando a NBR 8800/1986 [7] e a NBR 8800/2008 [8], pôde-se realizar uma comparação entre elas, analisando quais os impactos que as alterações da norma de perfil laminado causam nos esforços resistentes. Para essa comparação foram realizadas análises, com o programa AutoTerças, de dois perfis U e dois perfis I segundo a norma vigente e a sua antecessora. Os carregamentos utilizados foram os mesmos da Figura 3.9, e os resultados podem ser observados nas Tabelas 3.8 à 3.11.

| | | Perfil U 101,6x40,1x4,57x7,5 | | |
|-------------|--------------------|------------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 314,138 | 314,138 | 0,00% |
| Compressão | curva de flambagem | c | única | - |
| | λ | 2,624 | 2,624 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 39,113 | 40,020 | 2,32% |
| Flexão em x | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | 6,916 | 6,887 | 0,42% |
| Flexão em y | $M_{y,Rd}$ (kN.m) | 2,276 | 2,731 | 19,99% |

Tabela 3.10 – Perfil laminado U 101,6x40,1x4,57x7,5

| | | Perfil I 76x61x6,4x6,6 | | |
|-------------|--------------------|------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 380,243 | 380,243 | 0,00% |
| Compressão | curva de flambagem | b | única | - |
| | λ | 2,280 | 2,280 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 63,742 | 64,147 | 0,64% |
| Flexão em x | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | 8,170 | 8,202 | 0,39% |
| Flexão em y | $M_{y,Rd}$ (kN.m) | 3,241 | 3,868 | 19,35% |

Tabela 3.11 – Perfil laminado I 76x61x6,4x6,6

| | | Perfil U 381x86,9x10,7x16,5 | | |
|-------------|--------------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 2076,260 | 2076,260 | 0,00% |
| Compressão | curva de flambagem | c | única | - |
| | λ | 1,304 | 1,304 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 823,831 | 1019,194 | 23,71% |
| Flexão em x | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | 207,262 | 204,325 | 1,42% |
| Flexão em y | $M_{y,Rd}$ (kN.m) | 19,708 | 25,378 | 28,77% |

Tabela 3.12 – Perfil laminado U 381x86,9x10,7x16,5

| | | Perfil I 305x136x14,4x16,7 | | |
|-------------|--------------------|----------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 2662,834 | 2662,834 | 0,00% |
| Compressão | curva de flambagem | b | única | - |
| | λ | 1,137 | 1,137 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 1371,513 | 1549,970 | 13,01% |
| Flexão em x | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | 250,969 | 251,586 | 0,25% |
| Flexão em y | $M_{y,Rd}$ (kN.m) | 40,932 | 48,649 | 18,85% |

Tabela 3.13 – Perfil laminado I 305x136x14,4x16,7

Para os esforços resistentes de flexão, as alterações na norma não foram muito grandes, sendo que com relação ao eixo x foram encontrados valores muito próximos. Com relação ao eixo y as diferenças foram maiores, pois ocorreu uma alteração no limite superior do momento resistente: na NBR 8800/1986 [7] o momento resistente de cálculo não pode ser superior à $\phi_b 1,25 W f_y$, enquanto que na NBR 8800/2008 [8] o momento resistente de cálculo não pode superar o valor de $1,50 W f_y / \gamma_{at}$. Essa alteração é válida para os dois eixos de flexão, porém,

como em relação ao eixo x existe a flambagem lateral com torção, o valor do momento resistente não supera o limite imposto pela norma, não ocorrendo grande alteração no esforço resistente. Já em relação ao eixo y não ocorre a flambagem lateral com torção, e o valor do momento resistente supera o limite imposto pela norma com uma frequência maior, provocando uma diferença maior entre os esforços resistentes para a NBR 8800/1986 [7] e a NBR 8800/2008 [8].

4. O PROGRAMA AUTOTRUSS

A análise das terças treliçadas tubulares planas e multiplanares foi feita com a utilização do programa AutoTruss 2.0, desenvolvido através do convênio firmado entre a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP e a empresa V&M do Brasil S.A, tendo como autores os engenheiros Tiago Luís Duarte Forti, Gustavo Camargo Longhin, Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo e o Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena. Este programa tem como finalidade a otimização do projeto de coberturas planas e tridimensionais em aço, com a utilização dos perfis tubulares produzidos pela V&M do Brasil S.A. Maiores detalhes sobre o AutoTruss podem ser encontrados no anexo C.2.

Mediante o fornecimento de alguns dados de entrada, o programa analisa uma grande quantidade de geometrias de treliças, fornecendo o peso de cada uma delas. Dessa forma, caso os dados de entrada sejam fornecidos corretamente, é apresentado ao usuário uma série de casos, dentre os quais certamente estará ou a solução mais econômica ou soluções muito próximas a mais econômica. Nesse ponto, cabe ao usuário decidir qual é a melhor alternativa para o problema proposto, e também verificar se existe a necessidade de realizar novas análises para a obtenção de melhores soluções.

Pela Figura 4.1, pode-se notar que dentre os dados fornecidos pelo usuário estão o vão da treliça, a sua largura de influência, sua altura, o número de intervalos de altura que devem ser analisados, o tamanho de cada intervalo, os limites dos ângulos das diagonais, o tipo e modelo de treliça e as possíveis inclinações das mesmas. Nos menus do programa o usuário deve indicar o tipo de aço utilizado, assim como os carregamentos e combinações atuantes na treliça.

Para cada altura de treliça analisada, são geradas cinco geometrias diferentes, variando-se o ângulo das diagonais entre os limites superior e inferior. Os pesos de todos os casos são apresentados na tela, e os perfis utilizados podem ser verificados através de uma exportação para o programa AutoCAD. Assim, é gerada uma grande quantidade de casos, sendo possível encontrar qual a melhor geometria para a condição desejada.

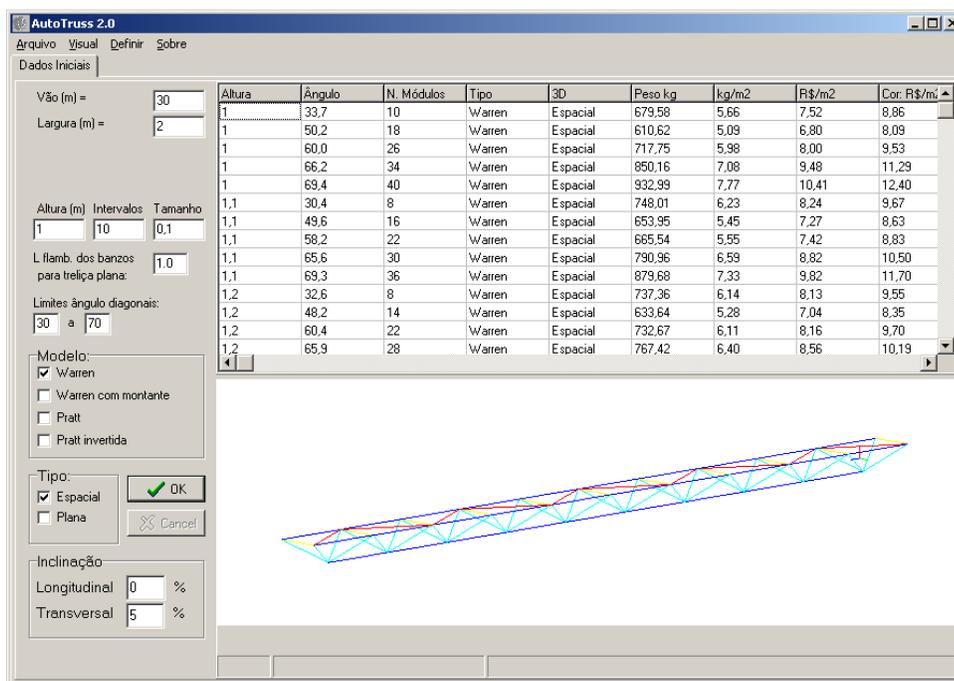


Figura 4.1 – Tela do programa AutoTruss 2.0

O programa permite considerar os banzos como elementos de pórtico e as diagonais como elementos de treliça, aproximando-se do comportamento real da estrutura. As treliças são consideradas isostáticas, apoiadas nas extremidades de seus banzos superiores, tendo os seus banzos inferiores livres. O apoio de uma extremidade é considerado fixo e o da outra extremidade é considerado livre para o deslocamento horizontal.

Como a finalidade das treliças analisadas é a aplicação em coberturas, sendo que as telhas serão apoiadas sobre elas, não pode ocorrer alteração no diâmetro das barras ao longo dos banzos superiores, porém, pode-se alterar a espessura do tubo. Para que não seja selecionada uma

espessura de tubo para cada barra do banzo, foi definido um número máximo de grupos de barras para o banzo, dependendo do vão da treliça. Essa definição está relacionada com o transporte da treliça, já que uma carreta convencional permite transportar peças com um comprimento máximo de 12 m. A Tabela 4.1 e a Figura 4.2 exemplificam o número máximo de grupos de barras para uma treliça, sendo adotada tanto para os banzos superiores, quanto para os banzos inferiores.

| Vão da Treliça (m) | Nº Máximo de Grupos | Grupo de Extremidade | Grupo Intermediário | Grupo Central |
|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------|
| 12 – 15m | 1 | L/2 | — | — |
| 16 – 25m | 2 | 2 trechos de L/3 | — | L/3 |
| 26 – 40m | 3 | 2 trechos de 3L/16 | 2 trechos de 3L/16 | L/4 |

Tabela 4.1 – Número máximo de grupos de barras



Figura 4.2 – Disposição dos grupos

As diagonais também são agrupadas de maneira semelhante aos banzos, chegando-se a um número máximo de três grupos, pois a utilização de uma quantidade muito grande de perfis inviabiliza a execução da treliça. Porém, no caso das diagonais, é possível variar o diâmetro dos tubos entre um grupo e outro, e não apenas a espessura. A Figura 4.3 apresenta uma treliça obtida com o programa AutoTruss 2.0 que contém dois grupos para os banzos e para as diagonais. Cada cor corresponde a um grupo de perfil.

Os perfis disponíveis para análise são os circulares e quadrados presentes no Catálogo Técnico de Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular [72], da V&M do Brasil, sendo que na composição das treliças deste estudo foram utilizados apenas os perfis tubulares circulares. Como esses perfis são laminados a quente, o programa realiza os cálculos segundo a norma brasileira de perfis laminados. Porém, como o programa já foi desenvolvido há algum tempo, os procedimentos seguem a norma NBR 8800/1986 [7].



Figura 4.3 – Treliça com dois grupos de perfis

A seguir será apresentada uma comparação dos resultados obtidos para os esforços solicitantes de perfis tubulares circulares utilizando-se a NBR 8800/1986 [7] e a NBR 8800/2008 [8], permitindo verificar se as diferenças são muito grandes.

4.1 Comparações entre a NBR 8800/1986 e a NBR 8800/2008

Pela Figura 2.3 apresentada anteriormente, pode-se esperar que, para os perfis tubulares circulares, as mudanças promovidas pela NBR 8800/2008 [8] não afetam muito o esforço resistente à compressão, pois a curva “a” de flambagem que era utilizada para os perfis tubulares é muito próxima à curva única apresentada na NBR 8800/2008 [8]. Esse fato é comprovado pelos resultados apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, utilizando perfis com limite de escoamento de 350 MPa, módulo de elasticidade de 205000 MPa, comprimento de dois metros e com esquema estático bi-apoiado.

As maiores diferenças para os esforços resistentes de compressão ocorrem para perfis com valor de λ entre 0,5 e 0,9, onde a curva de flambagem para perfis tubulares circulares da NBR 8800/1986 [7] está mais distante da curva única da NBR 8800/2008 [8]. O perfil da Tabela

4.2 se enquadra nessa situação, e mesmo assim a diferença é pequena, menor que 5%. Para perfis com valor de λ maior, como no caso da Tabela 4.3, essa diferença é ainda menor.

| | | Perfil Tubular 101,6x5,7 | | |
|------------|-----------------|--------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 544,95 | 544,95 | 0,00% |
| Compressão | λ | 0,774 | 0,774 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 441,41 | 424,09 | 3,92% |
| Flexão | M_{Rd} (kN.m) | 15,44 | 16,63 | 7,71% |

Tabela 4.2 – Comparação do perfil tubular 101,6x5,7

| | | Perfil Tubular 60,3x5,5 | | |
|------------|-----------------|-------------------------|---------------|-----------|
| | | NBR 8800/1986 | NBR 8800/2008 | Diferença |
| Tração | $N_{t,Rd}$ (kN) | 300,20 | 300,20 | 0,00% |
| Compressão | λ | 1,350 | 1,350 | 0,00% |
| | $N_{c,Rd}$ (kN) | 135,99 | 139,89 | 2,87% |
| Flexão | M_{Rd} (kN.m) | 4,73 | 5,26 | 11,21% |

Tabela 4.3 – Comparação do perfil tubular 60,3x5,5

A diferença no valor do esforço resistente à flexão é um pouco maior, devido a alteração no limite superior do momento resistente, conforme já mencionado no item 3.5, uma vez que o perfil tubular circular não sofre flambagem lateral com torção. Porém, como o limite superior do momento resistente é maior na NBR 8800/2008 [8] do que na NBR 8800/1986 [7], a utilização desta última está a favor da segurança para a determinação do esforço resistente a flexão, resultando em valores resistentes menores, como pode ser observado nas Tabelas 4.2 e 4.3. Além disso, nas treliças tubulares analisadas neste estudo, os esforços predominantes nas barras são de tração e compressão, havendo apenas cargas distribuídas nos banzos superiores.

Como os esforços resistentes à compressão não sofrem grandes alterações, e os momentos resistentes normalmente são maiores na NBR 8800/2008 [8], o programa AutoTruss 2.0 permanece seguindo os procedimentos de cálculo da NBR 8800/1986 [7], já que ele foi

desenvolvido dessa maneira, e uma alteração nos procedimentos de cálculo implementados no programa não acarretaria em grandes modificações nos resultados.

5. ANÁLISES DAS TERÇAS

Para permitir uma comparação entre as terças estudadas foi necessário submetê-las às mesmas condições, ou seja, foram definidas algumas premissas adotadas para todos os tipos de terças:

- As terças fazem parte de estruturas que utilizam coberturas metálicas, como galpões de uso geral com telhados com duas águas, cujos carregamentos são apresentados no item 5.1;

- Como nas coberturas metálicas geralmente utilizam-se telhas de aço, podendo ser trapezoidais, onduladas ou zipadas, adotou-se uma inclinação de 5% para o telhado, que respeita as condições mínimas para evitar empoçamento de água na cobertura, e é uma inclinação muito utilizada nesse tipo de estrutura;

- O aço utilizado possui módulo de elasticidade de 205000 MPa e limite de escoamento de 250 MPa;

- Todas as terças são biapoiadas, já que não se pode afirmar que a continuidade será garantida totalmente na prática. Dessa forma, as terças dos vãos extremos e intermediários estão submetidas aos mesmos esforços solicitantes;

- A distância entre terças foi fixada em dois metros para todos os tipos analisados. Esse valor foi adotado por ser compatível com o vão suportado pela maioria das telhas metálicas existentes no mercado brasileiro, para os carregamentos utilizados neste estudo;

- Foram analisadas terças com vãos de até 40 metros;

- Valor da aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s².

5.1 Carregamentos Atuantes nas Terças

Para a composição dos carregamentos foram consideradas as ações permanentes e variáveis que frequentemente atuam nas terças de coberturas de galpões para uso geral, que apresentam um sistema de iluminação simples e não precisam de isolamento térmico e ar condicionado. Para tanto, a edificação deve possuir dispositivos que permitam o aproveitamento da iluminação natural e a circulação de ar. Os valores das ações apresentados a seguir foram definidos seguindo-se orientações normativas e catálogos de fabricantes dos componentes utilizados.

- Ações Permanentes:

- Peso próprio da terça: obtido diretamente pelo programa de análise;
- Telha de aço com espessura de 0,65mm: $7,0 \text{ kgf/m}^2 = 68,67 \text{ N/m}^2$;
- Sistema de iluminação simples: $2,0 \text{ kgf/m}^2 = 19,62 \text{ N/m}^2$;
- Contraventamentos: $1,0 \text{ kgf/m}^2 = 9,81 \text{ N/m}^2$;
- TOTAL: $10,0 \text{ kgf/m}^2 = 98,10 \text{ N/m}^2$ + peso próprio.

- Ações Variáveis:

- Sobrecarga: $250,0 \text{ N/m}^2$;
- Vento: velocidade básica de 35,0 m/s.

O valor da sobrecarga segue a recomendação do anexo B da NBR 8800/2008 [8] em seu item B.5.1. Foi adotada a velocidade básica do vento de 35 m/s por abranger boa parte do território nacional, conforme pode ser observado na Figura 5.1. Para o cálculo do carregamento de vento foram seguidas as recomendações da NBR 6123/1988 [4], fazendo as considerações apresentadas a seguir.

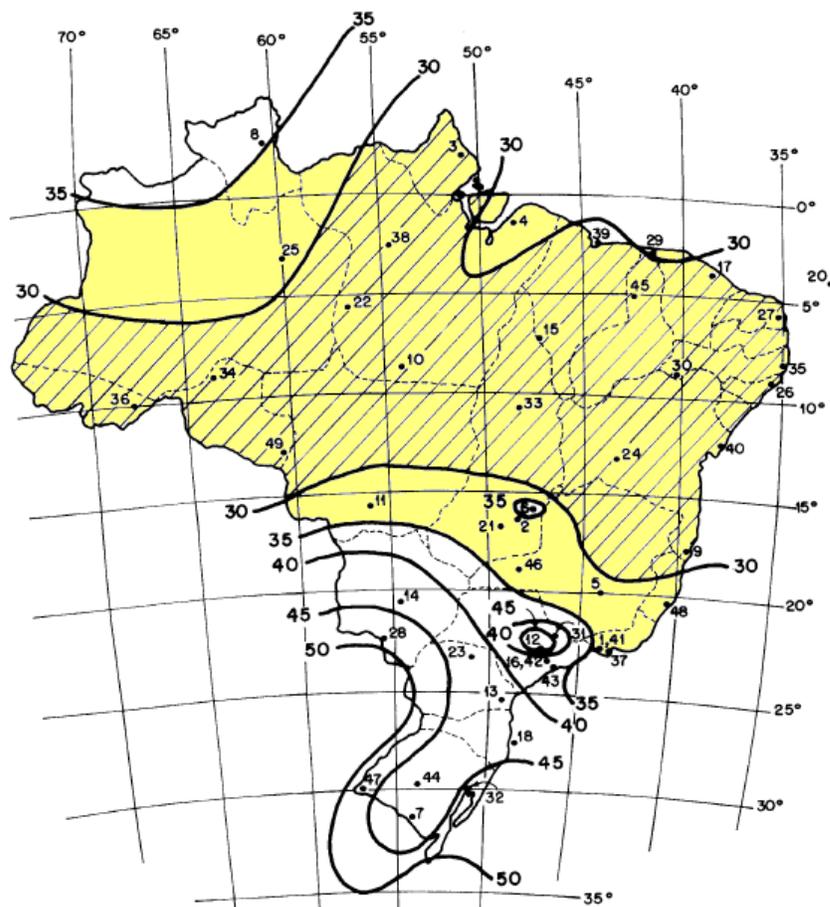


Figura 5.1 – Mapa de isopletas. Adaptado de NBR 6123/1988 [4]

- Fator topográfico – S_1 :

Leva em consideração as variações do relevo do terreno, e para este trabalho foi considerado terreno plano ou fracamente acidentado, que é um tipo de terreno muito utilizado para a construção de galpões. Portanto $S_1 = 1,0$.

- Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno – S_2 :

Considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Para encontrar o valor desse fator, é necessário definir a altura da edificação, que varia dependendo do projeto analisado. Dessa forma, optou-se por adotar um valor próximo aos mais comumente adotados em projetos de galpões, chegando-se ao valor de 12,5 metros. Outra consideração feita diz respeito a rugosidade do terreno, adotado como um terreno da Categoria III, já que boa parte desses galpões são executados em subúrbios, fora dos grandes centros urbanos, apresentando obstáculos como muros e edificações baixas. Também foi considerado que, como o vão das terças estudadas chega a 40 metros, a maior dimensão horizontal da edificação excede 50 metros, sendo, portanto considerada Classe C. Assim chega-se ao fator $S_2 = 0,905$ por interpolação linear na Tabela 5.1.

| | | Fator S_2 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--|-------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | | Categoria | | | | | | | | | | | | | | |
| | | I | | | II | | | III | | | IV | | | V | | |
| z | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | |
| (m) | | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| ≤ 5 | | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,94 | 0,92 | 0,89 | 0,88 | 0,88 | 0,82 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,74 | 0,72 | 0,67 |
| 10 | | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,94 | 0,92 | 0,88 | 0,86 | 0,83 | 0,80 | 0,74 | 0,72 | 0,67 |
| 15 | | 1,13 | 1,12 | 1,09 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,90 | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,76 | 0,72 |
| 20 | | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,91 | 0,88 | 0,82 | 0,80 | 0,76 |
| 30 | | 1,17 | 1,17 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,87 | 0,85 | 0,82 |
| 40 | | 1,20 | 1,19 | 1,17 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,08 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,91 | 0,89 | 0,86 |
| 50 | | 1,21 | 1,21 | 1,19 | 1,15 | 1,13 | 1,12 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,94 | 0,93 | 0,89 |
| 60 | | 1,22 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,07 | 1,04 | 1,02 | 0,97 | 0,95 | 0,92 |
| 80 | | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,01 | 1,00 | 0,97 |
| 100 | | 1,26 | 1,26 | 1,25 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,18 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,05 | 1,03 | 1,01 |
| 120 | | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,07 | 1,06 | 1,04 |
| 140 | | 1,29 | 1,29 | 1,28 | 1,25 | 1,24 | 1,24 | 1,22 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,10 | 1,09 | 1,07 |
| 160 | | 1,30 | 1,30 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,12 | 1,11 | 1,10 |
| 180 | | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,28 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,14 | 1,14 | 1,12 |
| 200 | | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,21 | 1,20 | 1,16 | 1,16 | 1,14 |
| 250 | | 1,34 | 1,34 | 1,33 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,30 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,25 | 1,23 | 1,20 | 1,20 | 1,18 |
| 300 | | - | - | - | 1,34 | 1,33 | 1,33 | 1,32 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,23 | 1,23 | 1,22 |
| 350 | | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,33 | 1,32 | 1,30 | 1,29 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| 400 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,29 | 1,29 |
| 420 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,35 | 1,35 | 1,33 | 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| 450 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,32 | 1,32 | 1,32 |
| 500 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,34 |

Tabela 5.1 – Tabela para determinação do fator S_2 . Fonte: NBR 6123/1988 [4]

- Fator Estatístico – S_3 :

Considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Como as edificações em estudo são destinadas ao uso geral, como comércio ou indústria com alto fator de ocupação, elas se enquadram do Grupo 2, ou seja, $S_3 = 1,0$.

Assim, é possível encontrar a velocidade característica (V_k) a partir da velocidade básica $V_0 = 35$ m/s adotada, e obter a pressão de obstrução (q):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 = 35 \cdot 1,0 \cdot 0,905 \cdot 1,0 = 31,68 \text{ m/s}$$

$$q = 0,613 V_k^2 = 0,613 \cdot 31,68^2 = 615,03 \text{ N/m}^2$$

Para finalizar o cálculo do carregamento de vento, é preciso encontrar os valores dos coeficientes aerodinâmicos externos e internos da edificação.

- Coefficientes de forma externos:

Como o objeto de análise deste trabalho são as terças de cobertura, serão determinados apenas os coeficientes de forma externos referentes à cobertura, conforme a tabela 5 da NBR 6123/1988 [4].

Pela hipótese de utilização das terças para grandes vãos, a menor dimensão “b” da estrutura, na qual fica posicionada a viga principal, normalmente será maior que o vão da terça. Com isso, para uma altura “h” de 12,5 metros, a relação h/b geralmente será menor que 1/2, já que na maioria dos casos o vão principal da viga será maior que 25,0 metros.

Assim, para uma inclinação do telhado de 5%, que corresponde a 2,86°, chega-se aos seguintes coeficientes de forma externos, conforme a Figura 5.2:

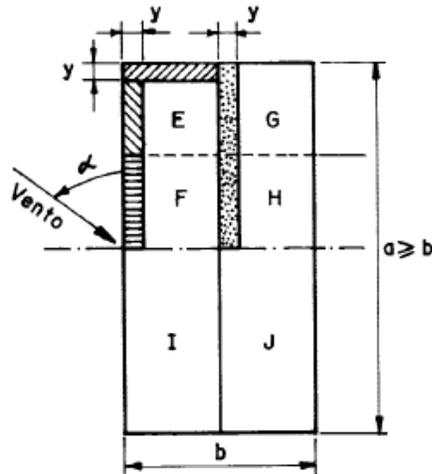


Figura 5.2 – Coeficientes de forma externos. Fonte: NBR 6123/1988 [4]

Vento a 90°: Zonas EF, $C_e = -0,86$

Zonas GH, $C_e = -0,4$

Vento a 0°: Zonas EG, $C_e = -0,8$

Zonas FH, $C_e = -0,4$

Zonas IJ, $C_e = -0,2$

Valores extremos dos coeficientes de pressão externos: $-0,86$ e $-0,2$

- Coeficientes de forma internos:

Devido a presença dos dispositivos para a circulação de ar, como venezianas de aberturas fixas, foi considerado que as estruturas não apresentam abertura dominante a barlavento e a sotavento, pois considerou-se que as venezianas de abertura fixa possuem uma permeabilidade de área equivalente às áreas das aberturas basculantes, como janelas e portões.

Assim, os coeficientes de pressão internos obtidos são $C_i = +0,2$ e $-0,3$ para duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis, e $C_i = -0,3$ e 0 para quatro faces igualmente permeáveis. Portanto, os valores críticos são $C_i = +0,2$ e $C_i = -0,3$.

- Coefficientes de pressão resultantes:

$$C_e - C_i = -0,86 - (+0,2) = -1,06$$

$$C_e - C_i = -0,2 - (-0,3) = +0,1$$

Portanto, as cargas de vento são:

$$\text{Vento de Sucção: } 1,06 q = 1,06 \cdot 615,03 \cong 650,0 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Vento de Pressão: } 0,1 q = 0,1 \cdot 615,03 \cong 61,5 \text{ N/m}^2$$

Com os valores de todas as cargas atuantes nas terças foi possível montar as combinações para análise dos estados limites últimos, seguindo os procedimentos da NBR 8681/2003 [6]. Foram utilizados os procedimentos dessa norma, referente a ações e segurança nas estruturas, pois os valores dos coeficientes de ponderação da norma que trata dos perfis formados a frio são diferentes dos coeficientes da norma dos perfis laminados. Os valores dos coeficientes de ponderação utilizados neste estudo são apresentados na Tabela 5.2. Foram determinadas duas combinações, sendo uma somente com as cargas de pressão, e outra combinando as cargas de pressão e de sucção.

| Tipo de Ação | Coeficiente de Ponderação | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------|----------|----------|
| | γ | | ψ_0 | ψ_2 |
| | Favorável | Desfavorável | | |
| Peso Próprio de Estruturas Metálicas | 1,25 | 1,00 | - | - |
| Demais Ações Permanentes | 1,30 | 1,00 | - | - |
| Sobrecarga | 1,50 | - | 0,80 | 0,60 |
| Vento | 1,40 | - | 0,60 | 0,00 |

Tabela 5.2 – Coeficientes de ponderação das combinações

- Combinação 1:

Nessa combinação foram consideradas apenas as cargas de pressão:

Peso Próprio: definido automaticamente pelo programa utilizado;

Carga Permanente: 98,1 N/m²;

Sobrecarga: 250,0 N/m²;

Vento de Pressão: 65,0 N/m².

Deve-se utilizar o maior valor dentre as combinações a seguir:

1,3 Permanente + 1,5 Sobrecarga + 1,4 (0,6) Vento Pressão

1,3 Permanente + 1,5 (0,8) Sobrecarga + 1,4 Vento Pressão

Cujos resultados são:

$$1,3 \cdot 98,1 + 1,5 \cdot 250,0 + 1,4 \cdot (0,6) \cdot 65,0 = 557,13 \text{ N/m}^2$$

$$1,3 \cdot 98,1 + 1,5 \cdot (0,8) \cdot 250,0 + 1,4 \cdot 65,0 = 518,53 \text{ N/m}^2$$

Portanto, para a Combinação 1 temos o valor crítico de 557,13 N/m² (pressão). Deve-se ressaltar que o peso próprio da estrutura deve entrar nas combinações multiplicado pelo coeficiente de ponderação 1,25. Como esse peso próprio é obtido pelo programa de dimensionamento, o seu valor foi computado automaticamente pelo mesmo.

- Combinação 2:

Nesse caso foram combinadas as cargas de pressão e de sucção:

Peso Próprio: definido automaticamente pelo programa utilizado;

Carga Permanente: 98,1 N/m²;

Vento de Sucção: 650,0 N/m².

Nesse caso, a combinação a ser considerada é:

1,0 Permanente – 1,4 VentoSucção

Cujo resultado é:

$$1,0 \cdot 98,1 - 1,4 \cdot 650,0 = -811,9 \text{ N/m}^2$$

Portanto, para a Combinação 2 temos o valor de 811,9 N/m² (sucção). Nesse caso, o peso próprio da terça deve ser multiplicado pelo coeficiente de ponderação 1,0, e seu valor foi computado automaticamente pelo programa utilizado.

Em nenhuma das combinações foi levado em consideração o esforço axial atuante nas terças que participam do sistema de contraventamento, pois apenas uma pequena quantidade das terças de toda a cobertura estão submetidas a essa situação, devendo ser dimensionadas como um caso particular, para evitar que as demais terças fiquem superdimensionadas.

Para a análise dos estados limites de serviço também foram seguidos os procedimentos da NBR 8681/2003 [6]. Esses estados limites são caracterizados por deformações excessivas que comprometam o aspecto estético ou a durabilidade da estrutura ou afetem a utilização da construção, e vibrações excessivas ou desconfortáveis. No caso das terças as deformações também podem provocar o empoçamento de água na cobertura.

Como neste estudo apenas as telhas estão conectadas às terças, as deformações não afetam a utilização da estrutura e nem causam danos a outros elementos não estruturais. Além disso, pelo fato de as ações de vento atuarem na estrutura durante um período muito curto de sua vida útil, elas não contribuem para as deformações que provocam empoçamento ou comprometam a estética da estrutura, além de não causar vibrações excessivas. Assim, foram consideradas apenas as combinações quase-permanentes para a análise dos estados limites de serviço, que atuam durante grande parte do período de vida útil da estrutura:

$$\text{Permanente} + 0,6 \text{ Sobrecarga} = 98,1 + 0,6 \cdot 250 = 248,1 \text{ N/m}^2$$

Assim como nas combinações dos estados limites últimos, o valor do peso próprio da terça foi computado automaticamente pelo programa utilizado, multiplicado pelo coeficiente de ponderação 1,0.

5.2 Análise das Terças em Perfil

A análise das terças em perfil foi realizada através do programa AutoTerças. Foram utilizados os carregamentos e premissas definidos acima, analisando-se terças com vãos variando a cada dois metros, com um limite máximo de 40 metros. O número de linhas de corrente

utilizado em cada terça foi definido de modo que se obtenha o perfil mais leve possível com um espaçamento entre linhas de corrente entre 2,0 e 2,7 metros, que é o valor normalmente adotado para o dimensionamento de terças. O valor de C_b foi adotado como 1,0, a favor da segurança.

5.2.1 Terças em Perfil Laminado

As análises foram feitas tanto para a NBR 8800/1986 [7] quanto para a NBR 8800/2008 [8]. Porém, os perfis obtidos foram os mesmos, já que para perfis submetidos apenas à flexão, as alterações na norma de perfis laminados não provoca grandes mudanças nos esforços resistentes, conforme discutido no item 3.5.

Os resultados obtidos para as terças em perfil U e I laminados são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4. Para tornar a análise das terças realista, a massa das linhas de corrente para contenção lateral foi somada à taxa final do perfil. Foi considerada a utilização de barras redondas com diâmetro de 9,5 mm, sendo que o comprimento de cada barra é de dois metros, já que esse é o valor da largura de influência da terça. A Figura 5.3 representa os resultados das terças em perfil laminado em forma de gráfico.

Não foi possível realizar análises até o vão limite de 40 metros, pois não foram encontrados perfis que respeitem os estados limites último e de serviço na lista de perfis laminados comerciais.

| Terças em Perfil U Laminado | | | |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m ²) |
| 2 | 0 | 76,2x35,8x4,32x6,9 | 3,00 |
| 4 | 1 | 76,2x35,8x4,32x6,9 | 3,14 |
| 6 | 2 | 101,6x41,8x6,27x7,5 | 4,78 |
| 8 | 2 | 152,4x48,8x5,08x8,7 | 6,16 |
| 10 | 3 | 203,2x57,4x5,59x9,9 | 8,65 |
| 12 | 4 | 203,2x57,4x5,59x9,9 | 8,67 |
| 14 | 5 | 254x66x6,1x11,1 | 11,50 |
| 16 | 5 | 304,8x74,7x7,11x12,7 | 15,42 |
| 18 | 6 | 304,8x74,7x7,11x12,7 | 15,43 |
| 20 | 7 | 381x86,4x10,2x16,5 | 25,32 |

Tabela 5.3 – Terças em perfil U laminado

| Terças em Perfil I Laminado | | | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m ²) |
| 2 | 0 | 76,2x59,2x4,32x6,6 | 4,14 |
| 4 | 1 | 76,2x59,2x4,32x6,6 | 4,27 |
| 6 | 2 | 101,6x67,6x4,83x7,4 | 5,76 |
| 8 | 2 | 127x76,2x5,33x8,3 | 7,41 |
| 10 | 3 | 152,4x84,6x5,84x9,1 | 9,29 |
| 12 | 4 | 203,2x101,6x6,86x10,8 | 13,69 |
| 14 | 5 | 203,2x101,6x6,86x10,8 | 13,70 |
| 16 | 5 | 254x118,4x7,87x12,5 | 18,87 |
| 18 | 6 | 304,8x133,4x11,7x16,7 | 30,14 |
| 20 | 7 | 304,8x133,4x11,7x16,7 | 30,15 |
| 22 | 8 | 381x140x10,4x15,8 | 31,83 |
| 24 | 8 | 381x140x10,4x15,8 | 31,81 |
| 26 | 9 | 457,2x152x11,7x17,6 | 40,57 |
| 28 | 10 | 457,2x152x11,7x17,6 | 40,58 |
| 30 | 10 | 508x178x15,2x23,3 | 60,27 |

Tabela 5.4 – Terças em perfil I laminado

Pela Figura 5.3 é possível notar que o perfil U apresentou resultados mais leves em todos os vãos analisados. Porém, a utilização desse perfil só permitiu realizar análises até 20 metros de vão, pois acima desse valor não existe um perfil comercial que resista aos esforços solicitantes e atenda o limite de flecha. Já com o perfil I foi possível chegar a um vão de 30 metros, mas sempre com taxas superiores ao perfil U.

Terças em Perfil Laminado

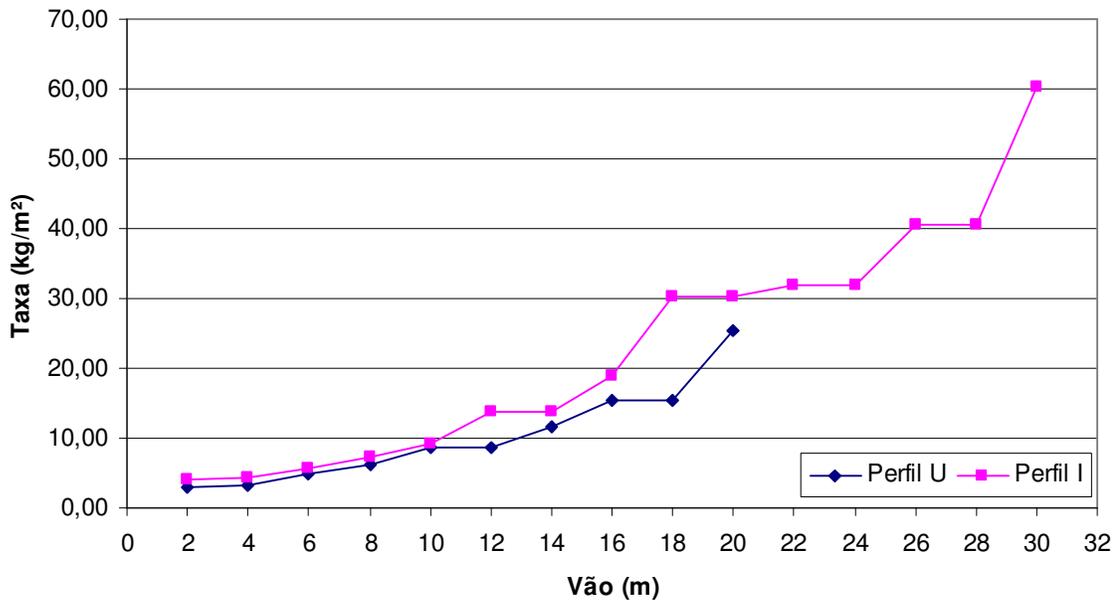


Figura 5.3 – Gráfico das terças em perfil laminado

5.2.2 Terças em Perfil Formado a Frio

Os resultados das terças em perfil U e Z simples e enrijecidos formados a frio são apresentados nas Tabelas de 5.5 a 5.8, e em forma de gráfico na Figura 5.4. Assim como foi feito para as terças em perfil laminado, a massa das linhas de corrente foi somada à taxa das terças.

Os perfis contidos na NBR 6355/2003 [5] só permitiram realizar análises até vãos em torno de 14 metros. Assim, foram criados perfis maiores para atender um número superior de vãos, já que uma das vantagens dos perfis formados a frio é a liberdade que o projetista tem em definir as dimensões dos perfis. Esses perfis criados encontram-se em destaque nas tabelas, e com eles foi possível realizar análises para vãos de até 32 metros.

| Terças em Perfil U Formado a Frio | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m ²) |
| 2 | 0 | 100x50x1,2 | 0,92 |
| 4 | 1 | 150x50x2,25 | 2,28 |
| 6 | 2 | 150x75x3 | 3,60 |
| 8 | 2 | 250x100x2,65 | 4,73 |
| 10 | 3 | 300x100x3 | 5,94 |
| 12 | 4 | 300x100x3,75 | 7,36 |
| 14 | 5 | 300x100x4,75 | 9,23 |
| 16 | 6 | 350x125x4,25 | 9,98 |
| 18 | 6 | 400x175x4,25 | 12,46 |
| 20 | 7 | 450x225x4,25 | 14,97 |
| 22 | 7 | 550x250x4,25 | 17,46 |
| 24 | 8 | 550x250x4,75 | 19,47 |
| 26 | 9 | 500x250x6,3 | 24,41 |
| 28 | 10 | 550x250x6,3 | 25,65 |
| 30 | 10 | 650x275x6,3 | 29,35 |
| 32 | 10 | 600x275x8 | 35,46 |

Tabela 5.5 – Terças em perfil U formado a frio

| Terças em Perfil U Enrijecido Formado a Frio | | | |
|--|------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m ²) |
| 2 | 0 | 75x40x1,2x15x1,2 | 0,83 |
| 4 | 1 | 125x50x2x17x2 | 2,07 |
| 6 | 2 | 200x75x2x20x2 | 3,14 |
| 8 | 2 | 250x85x2x25x2 | 3,73 |
| 10 | 3 | 250x100x2,65x25x2,65 | 5,19 |
| 12 | 4 | 300x100x3x25x3 | 6,43 |
| 14 | 5 | 350x125x3x30x3 | 7,74 |
| 16 | 5 | 400x200x2,65x50x2,65 | 9,35 |
| 18 | 6 | 400x200x3x50x3 | 10,55 |
| 20 | 7 | 450x225x3,35x50x3,35 | 13,05 |
| 22 | 7 | 450x225x3,75x50x3,75 | 14,53 |
| 24 | 8 | 550x250x3,75x50x3,75 | 16,75 |
| 26 | 9 | 650x275x3,35x75x3,35 | 17,65 |
| 28 | 10 | 650x275x3,75x75x3,75 | 19,71 |
| 30 | 10 | 650x275x4,25x75x4,25 | 22,24 |
| 32 | 10 | 650x275x4,75x75x4,75 | 24,76 |

Tabela 5.6 – Terças em perfil U enrijecido formado a frio

| Terças em Perfil Z Formado a Frio | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------|--------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m²) |
| 2 | 0 | 150x60x2 | 2,07 |
| 4 | 1 | 200x75x2 | 2,83 |
| 6 | 2 | 250x85x2 | 3,43 |
| 8 | 3 | 300x85x2,65 | 5,01 |
| 10 | 4 | 300x85x3,35 | 6,26 |
| 12 | 5 | 300x85x4,75 | 8,70 |
| 14 | 6 | 350x100x4,25 | 9,18 |
| 16 | 6 | 400x175x3,75 | 11,07 |
| 18 | 6 | 400x150x4,75 | 12,94 |
| 20 | 7 | 500x225x4,25 | 15,81 |
| 22 | 7 | 550x225x4,75 | 18,53 |
| 24 | 8 | 600x250x4,75 | 20,40 |
| 26 | 9 | 550x225x6,3 | 24,41 |
| 28 | 10 | 600x250x6,3 | 26,89 |

Tabela 5.7 – Terças em perfil Z formado a frio

| Terças em Perfil Z Enrijecido Formado a Frio | | | |
|--|------------------------------|----------------------|--------------------|
| Vão (m) | Número de Linhas de Corrente | Perfil | Taxa Total (kg/m²) |
| 2 | 0 | 100x50x2x17x2 | 1,73 |
| 4 | 1 | 150x60x2x20x2 | 2,47 |
| 6 | 2 | 200x75x2x20x2 | 3,14 |
| 8 | 2 | 300x85x2x25x2 | 4,12 |
| 10 | 3 | 300x85x2,65x25x2,65 | 5,39 |
| 12 | 5 | 300x85x3,35x25x3,35 | 6,78 |
| 14 | 5 | 350x125x3x30x3 | 7,74 |
| 16 | 5 | 400x175x2,65x50x2,65 | 8,83 |
| 18 | 6 | 400x175x3x50x3 | 9,96 |
| 20 | 7 | 400x175x3,75x50x3,75 | 12,34 |
| 22 | 7 | 550x225x3,35x50x3,35 | 14,35 |
| 24 | 8 | 550x225x3,75x50x3,75 | 16,01 |
| 26 | 9 | 650x250x3,35x75x3,35 | 17,00 |
| 28 | 10 | 650x250x3,75x75x3,75 | 18,97 |
| 30 | 10 | 650x250x4,25x75x4,25 | 21,40 |
| 32 | 10 | 600x250x6,3x75x6,3 | 30,06 |

Tabela 5.8 – Terças em perfil Z enrijecido formado a frio

Terças em Perfil Formado a Frio

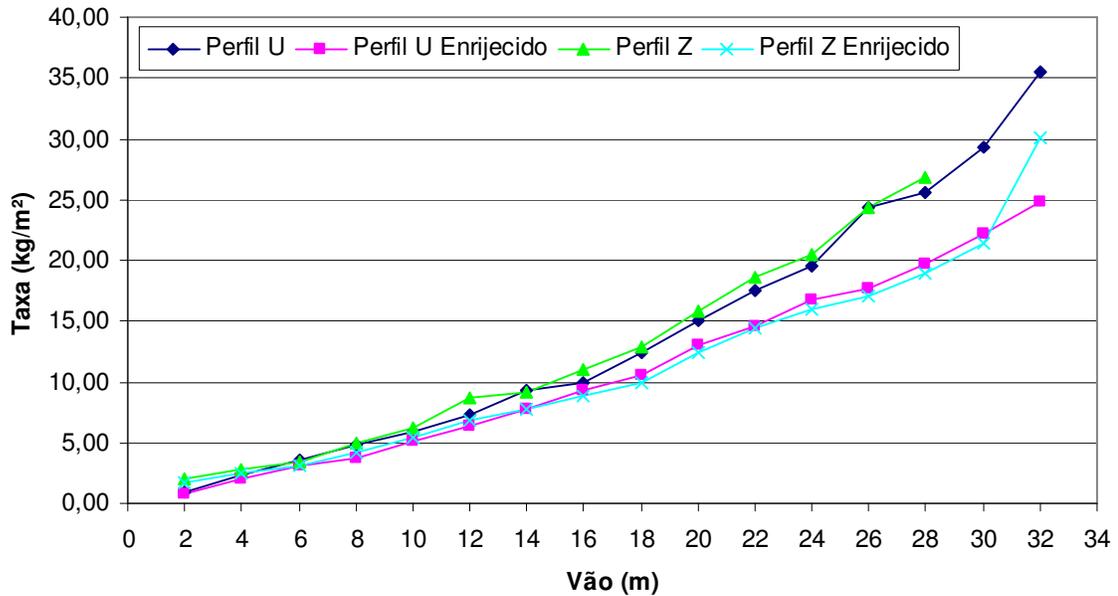


Figura 5.4 – Gráfico das terças em perfil formado a frio

Os perfis U e Z simples apresentam um comportamento parecido, com taxas muito próximas, e uma ligeira vantagem do perfil U para a grande maioria dos vãos. De maneira semelhante, os perfis U e Z enrijecidos também apresentam taxas próximas, com vantagem para o primeiro em vãos inferiores a 14 metros, onde foram utilizados apenas os perfis padronizados pela NBR6355/2003 [5]. Já a utilização de perfis não padronizados, nos vãos superiores a 14 metros, favoreceu o perfil Z enrijecido. Esse fato demonstra que a liberdade dada aos projetistas em definir o tamanho da seção transversal dos perfis formados a frio, permite obter seções que favoreçam ora o perfil U enrijecido e ora o perfil Z enrijecido, dependendo das dimensões adotadas. Também é possível notar que os perfis enrijecidos sempre resultam em taxas menores que os perfis simples, demonstrando a eficácia dos enrijecedores presentes nas bordas das mesas.

5.3 Análise das Terças Treliçadas Tubulares

A análise das terças treliçadas tubulares foi realizada com o programa AutoTruss 2.0, e foi dividida em duas etapas: análise das treliças planas e análise das treliças multiplanares. Foram estudados vãos com variação de 4 metros, até o limite de 40 metros.

5.3.1 Terças Treliçadas Tubulares Planas

As treliças planas são compostas por um banzo superior e um banzo inferior, podendo ser paralelos ou não, além de diagonais e/ou montantes, sendo que todas as barras estão contidas no mesmo plano. A Figura 5.5 apresenta as treliças mais comuns dentre os tipos existentes.

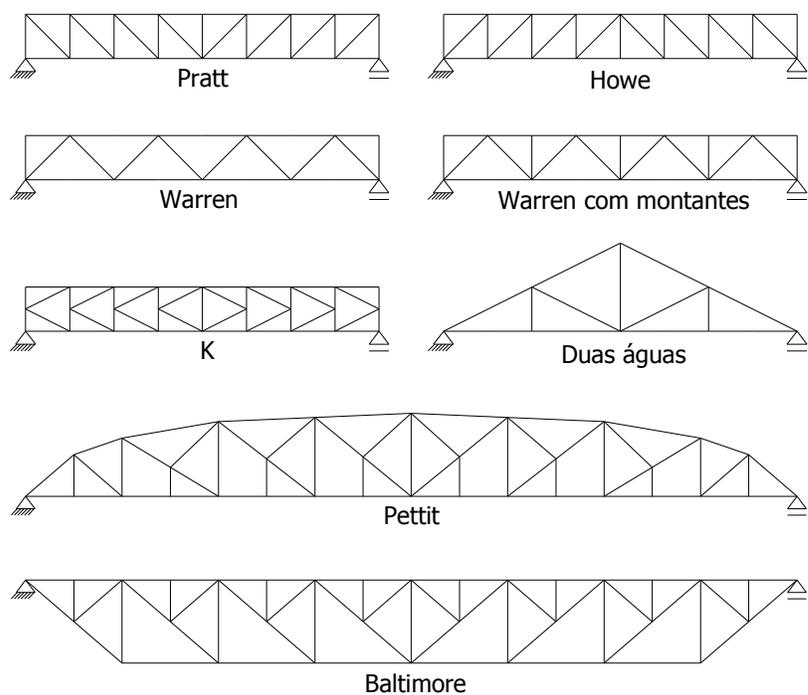


Figura 5.5 – Tipos de treliças

Primeiramente deve-se definir qual o melhor tipo de treliça a ser adotado para as terças treliçadas tubulares. Levando-se em consideração a finalidade da treliça, ela deve possuir uma configuração em banzos paralelos, já que o banzo superior da mesma deve ser reto para a fixação das telhas. Assim, ficam excluídas as treliças em tesoura de duas águas e a Pettit.

Além disso, segundo Pugliesi [55], para vãos superiores a 40 metros são consideradas preferíveis as treliças do tipo Pettit, Baltimore e K. Já para vãos inferiores a esse limite, são empregadas as treliças Pratt, Warren com e sem montantes intercalados e Howe. Como os vãos analisados neste trabalho são inferiores a 40 metros, um dos últimos quatro tipos citados deve ser o ideal para as terças. A única diferença com relação as treliças da Figura 5.5 é que o apoio das terças deve ser feito no banzo superior das treliças, resultando nas geometrias apresentadas na Figura 5.6, já que elas devem estar apoiadas no banzo superior da viga principal, no caso de uma viga treliçada, para que as telhas possam ser fixadas na cobertura.

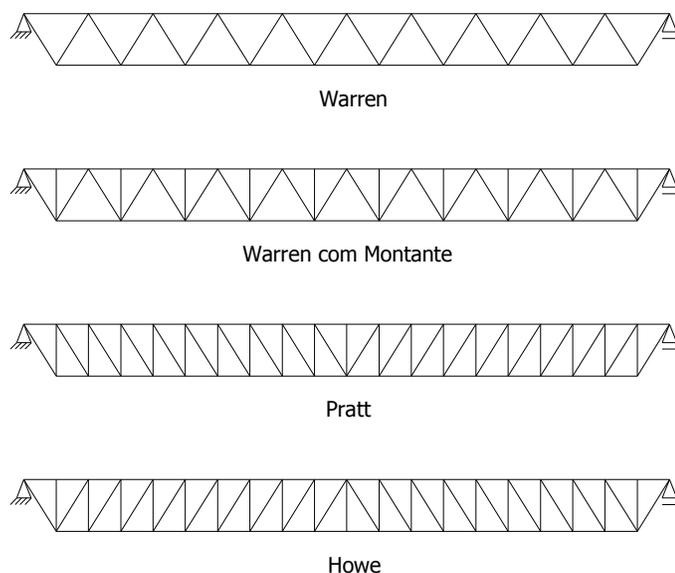


Figura 5.6 – Tipos de treliças planas estudadas

Analisando a Figura 5.6, nota-se que a treliça Warren é a que apresenta a menor quantidade de ligações e de barras e, portanto a sua montagem é mais simples. O tipo Warren com montante apresenta uma quantidade maior de barras e de ligações, porém menor que as

treliças do tipo Pratt e Howe. Entretanto, essas vantagens da treliça tipo Warren não significam que ela é a melhor solução, devendo-se analisar todas as hipóteses em diferentes condições.

Para definir qual tipo de treliça é o mais adequado para este estudo foram realizadas as análises de alguns vãos para os quatro tipos de treliças, através do programa AutoTruss 2.0. Em todos os casos os resultados foram semelhantes aos apresentados na Tabela 5.9, ou seja, as treliças do tipo Warren sempre são a maioria dentre as mais leves. Além disso, as treliças dos outros três tipos que figuram entre as mais leves possuem uma quantidade muito maior de barras e ligações, e as suas conexões entre diagonais (ou montantes) e banzos são muito mais complexas. Dessa forma, a treliça do tipo Warren foi definida como o tipo padrão para as treliças tubulares planas deste estudo.

Uma variável importante na análise das terças treliçadas é a altura da treliça, que também afeta diretamente a geometria da mesma, pois alterando-se a sua altura, também são alterados os comprimentos das diagonais e dos montantes, além de modificar os esforços atuantes nas barras. Na tentativa de obter a altura ideal da terça, foram gerados diversos modelos com variação da altura a cada 0,05 m, procurando-se encontrar a terça mais leve para cada vão, e consequentemente, a altura ideal. Os limites superior e inferior de variação da altura foram escolhidos dependendo do vão analisado, com o objetivo de encontrar terças com alturas maiores para vãos maiores e com alturas menores para vãos menores.

Wardenier [76] menciona que a altura de uma treliça está relacionada com o vão vencido pela mesma, e a relação entre essas duas grandezas fica aproximadamente entre $1/10$ e $1/16$. No estudo desenvolvido, essa relação foi estendida até valores próximos a $1/20$, para possibilitar a análise de treliças ainda menores, que podem vir a ser econômicas.

| Treliça Plana com Vão de 20 metros | | | | |
|------------------------------------|------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de Módulos | Tipo | Taxa Total (kg/m ²) |
| 1,05 | 59,2 | 16 | Warren | 5,99 |
| 1,30 | 61,2 | 14 | Warren | 6,02 |
| 1,10 | 60,4 | 16 | Warren | 6,05 |
| 1,20 | 59,2 | 14 | Warren | 6,08 |
| 1,00 | 58,0 | 16 | Warren | 6,08 |
| 1,25 | 60,3 | 14 | Warren | 6,13 |
| 1,35 | 58,3 | 12 | Warren | 6,15 |
| 1,00 | 50,2 | 12 | Warren | 6,16 |
| 1,20 | 50,2 | 10 | Warren c/ Mon. | 6,17 |
| 0,95 | 59,7 | 18 | Warren | 6,20 |
| 1,20 | 65,2 | 18 | Warren | 6,22 |
| 1,35 | 65,2 | 16 | Warren | 6,22 |
| 1,25 | 66,0 | 18 | Warren | 6,23 |
| 1,15 | 66,5 | 20 | Warren | 6,26 |
| 1,15 | 49,0 | 20 | Pratt Inv. | 6,28 |
| 1,10 | 65,6 | 20 | Warren | 6,29 |
| 1,30 | 66,9 | 18 | Warren | 6,33 |
| 1,10 | 47,7 | 20 | Pratt Inv. | 6,34 |
| 0,90 | 58,3 | 18 | Warren | 6,36 |
| 1,20 | 50,2 | 20 | Pratt Inv. | 6,38 |
| 1,25 | 68,2 | 20 | Warren | 6,40 |
| 1,20 | 50,2 | 10 | Warren | 6,42 |
| 1,05 | 66,6 | 22 | Warren | 6,45 |
| 1,15 | 68,4 | 22 | Warren | 6,47 |
| 1,15 | 49,0 | 20 | Pratt | 6,48 |
| 1,10 | 47,7 | 10 | Warren | 6,49 |
| 1,00 | 65,6 | 22 | Warren | 6,49 |
| 1,20 | 69,3 | 22 | Warren | 6,49 |

Tabela 5.9 – Análise inicial para escolha do tipo de treliça

Mais uma variável existente que interfere na geometria da treliça e na quantidade de peças e ligações, é o ângulo de inclinação das diagonais com relação ao banzo. Uma alteração nesse valor também provoca uma alteração no comprimento dos módulos dos banzos, sendo que ângulos menores resultam em comprimentos de módulos maiores, e uma quantidade de ligações menores, não significando, porém, que menores ângulos de diagonais resultarão em melhores soluções, devendo-se analisar todos os casos. Inicialmente, o ângulo entre as diagonais foi limitado entre 30° e 60°, porém, com o início das análises, pôde-se notar que quanto maior o vão da treliça, maior é o ângulo de inclinação da diagonal das treliças mais leves. Para treliças com 12 metros de vão, o ângulo ótimo ficou em torno de 45° e 50°. Esse valor aumenta gradativamente com o vão, chegando a ultrapassar o valor de 60° para 40 metros de vão. Assim, optou-se por

limitar o ângulo das diagonais entre 30° e 70°. Na Figura 5.7 é possível visualizar e entender melhor essas variáveis citadas acima.

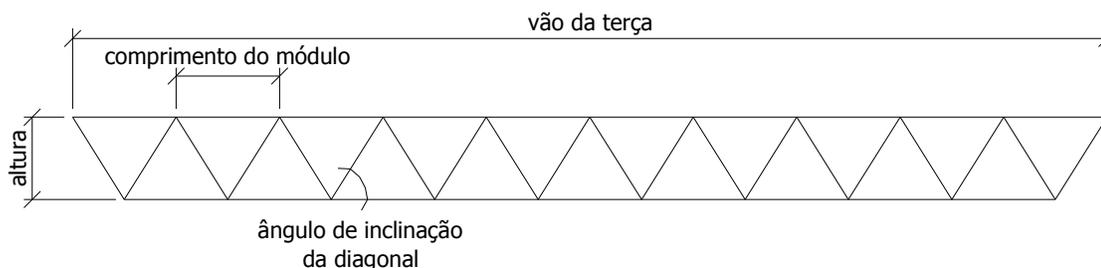


Figura 5.7 – Variáveis consideradas na treliça

A largura de influência da terça, juntamente com o vão da mesma, definem sua área de influência, ou seja, a área de contribuição do carregamento atuante na terça, conforme apresentado na Figura 5.8. Essa largura de influência depende da distância entre terças, que foi fixado em dois metros.

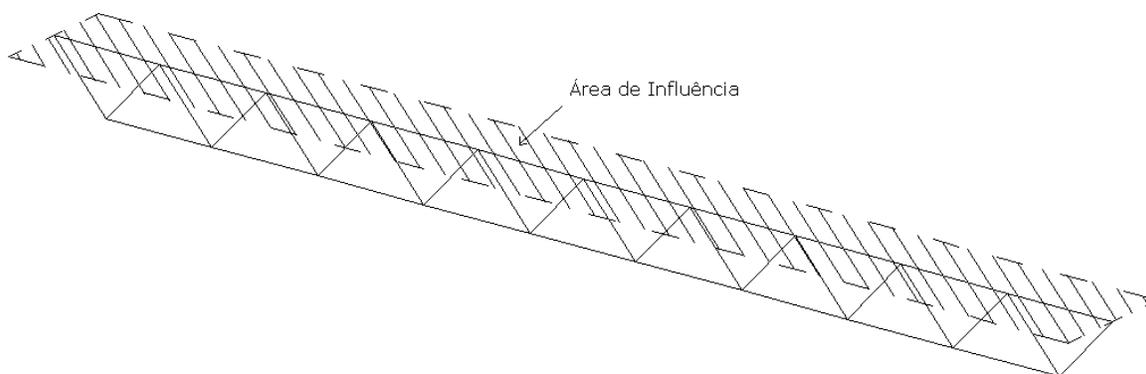


Figura 5.8 – Área de influência da treliça plana

As análises das treliças feitas através do programa AutoTruss 2.0, considerou que todos os nós da treliça plana estão impedidos de se deslocarem fora do plano da mesma. Isso significa que em cada um dos nós foi considerada a presença de um travamento com uma linha de

corrente, conforme pode ser observado na Figura 5.9. Dessa forma, quanto maior o comprimento dos módulos dos banzos, menor a quantidade de travamentos necessários, o que facilita a montagem da estrutura. Esse fato foi levado em consideração quando da escolha das melhores treliças para cada vão.

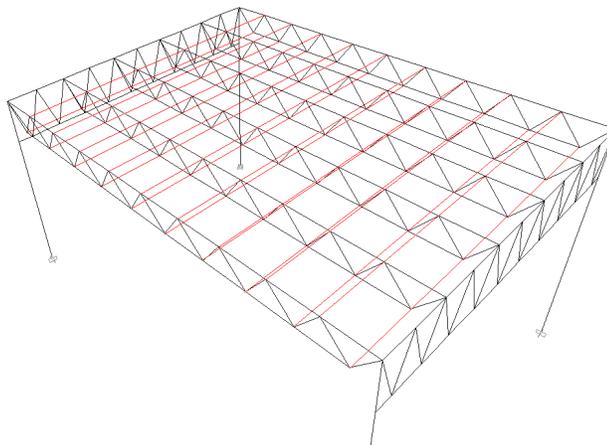


Figura 5.9 – Travamentos dos nós das treliças planas

Com a definição dos carregamentos e das variáveis, iniciou-se a análise das terças treliçadas planas com o programa AutoTruss 2.0. Os limites superior e inferior de variação da altura das treliças para cada vão encontra-se na Tabela 5.10.

| Terças Treliçadas Tubulares Planas | |
|------------------------------------|------------------|
| Vão (m) | Limite de altura |
| 4 | 0,25m - 0,40m |
| 8 | 0,40m - 0,80m |
| 12 | 0,50m - 1,20m |
| 16 | 0,70m - 1,50m |
| 20 | 0,90m - 2,00m |
| 24 | 1,10m - 2,20m |
| 28 | 1,30m - 2,30m |
| 32 | 1,40m - 2,40m |
| 36 | 1,60m - 2,50m |
| 40 | 1,80m - 2,70m |

Tabela 5.10 – Limites das alturas das treliças planas

As tabelas com a listagem de todos os casos calculados pelo AutoTruss 2.0 foram salvas para analisar qual a melhor solução. Não pode-se dizer de imediato que a melhor solução é a que apresenta o menor peso, pois deve-se levar em consideração a quantidade de barras e de ligações que cada treliça apresenta. Maior quantidade de barras e de ligações, presentes nas treliças com maior quantidade de módulos, representa maior dificuldade de montagem e encarecimento da treliça. Além disso, maior quantidade de ligações, ou seja, maior quantidade de nós, também significa maior quantidade de linhas de corrente travando a treliça plana, que além de dificultar a montagem da estrutura, também aumenta o seu peso final.

Para facilitar na escolha da melhor solução, a massa das linhas de corrente foi somada à massa da treliça plana, sendo que todos os nós estão contidos lateralmente com linhas de corrente, exceto os dois nós extremos do banzo superior, conforme a Figura 5.9. Dessa maneira, foram elaboradas as tabelas de todos os vãos contendo a taxa de todos os casos, semelhantes à Tabela 5.9, porém somente com treliças do tipo Warren, que foi definido como o melhor tipo.

Dentre todas as alternativas geradas pelo AutoTruss foi selecionada a opção considerada como a melhor. Foi dada preferência para as treliças com menor número de módulos, que resultam em treliças mais fáceis e rápidas de serem montadas, reduzindo o seu custo final. Um segundo critério de escolha diz respeito a altura da treliça, dando-se preferência para as de menor altura, por questões estética e de compatibilidade com a viga principal, já que o ideal é que a terça seja menor que a viga. Para cada vão analisado foi elaborada uma tabela contendo de quatro a cinco opções consideradas como as melhores, sendo que em destaque encontra-se a opção escolhida. Essas tabelas podem ser encontradas no anexo A. Como exemplo, é apresentada a Tabela 5.11, com as melhores alternativas para o vão de 20 metros.

| Treliza Plana com vão de 20 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,30 | 61,2 | 14 | 1,429 | 6,04 |
| 1,20 | 59,2 | 14 | 1,429 | 6,09 |
| 1,35 | 58,3 | 12 | 1,667 | 6,16 |
| 1,00 | 50,2 | 12 | 1,667 | 6,17 |
| 1,20 | 50,2 | 10 | 2,000 | 6,42 |
| 1,10 | 47,7 | 10 | 2,000 | 6,49 |

Tabela 5.11 – Melhores alternativas

A solução escolhida como a melhor para um determinado vão pode não ser a ideal para todos os projetos que necessitam de terças desse mesmo vão, já que, dependendo da situação, pode ser necessário utilizar uma treliça com uma altura maior ou menor. Porém, existe uma grande probabilidade da solução de um projeto específico ser bem próxima a escolhida neste trabalho, ou estar contida nas tabelas apresentadas no anexo A.

Os resultados finais para todos os vãos analisados são apresentados na Tabela 5.12, e também estão contidos no gráfico da Figura 5.13. Os perfis utilizados para a composição das treliças foram os tubos circulares laminados disponíveis no Catálogo Técnico de Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular [72], da V&M do Brasil.

| Terças Treliçadas Tubulares Planas | | | |
|------------------------------------|------------|-------------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Altura (m) | Número de Módulos | Taxa Total (kg/m ²) |
| 4 | 0,30 | 4 | 3,53 |
| 8 | 0,50 | 6 | 3,92 |
| 12 | 0,85 | 8 | 4,82 |
| 16 | 1,00 | 10 | 5,45 |
| 20 | 1,20 | 10 | 6,42 |
| 24 | 1,20 | 12 | 7,12 |
| 28 | 1,65 | 14 | 7,79 |
| 32 | 1,65 | 16 | 8,58 |
| 36 | 1,65 | 18 | 9,35 |
| 40 | 2,15 | 20 | 10,34 |

Tabela 5.12 – Terças treliçadas tubulares planas

5.3.2 Terças Treliçadas Tubulares Multiplanares

As treliças multiplanares utilizadas neste estudo possuem dois banzos superiores e um banzo inferior, resultando em uma seção transversal triangular, além das diagonais e/ou montantes. Conforme já mencionado, as melhores opções de treliças para terças são as do tipo Pratt, Warren com ou sem montantes intercalados e Howe, com apoios nos banzos superiores. Pelas vantagens da treliça tipo Warren já citadas anteriormente, e pelo fato de que nas análises das treliças multiplanares, assim como ocorreu nas treliças planas, esse tipo de treliça sempre esteve entre as soluções mais leves, foi adotada a treliça tipo Warren também para as terças treliçadas multiplanares, conforme a Figura 5.10.

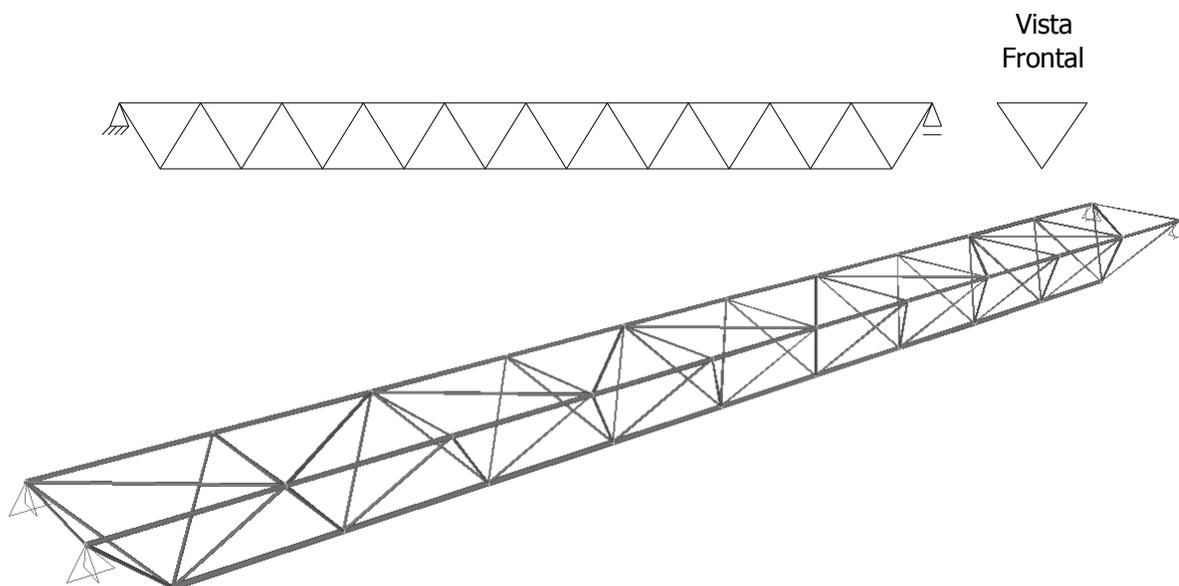


Figura 5.10 – Treliça multiplanar tipo Warren

Diferente da treliça plana, a multiplanar não precisa de linhas de corrente para a contenção lateral, já que pelo fato de ser uma estrutura espacial, ela já possui rigidez suficiente. Porém, para garantir um bom comportamento da treliça multiplanar, são necessários montantes e diagonais no plano que contém os banzos superiores, conforme apresentado na Figura 5.11. Para os montantes e diagonais superiores foram utilizados perfis tubulares circulares soldados,

enquanto que para os demais perfis da treliça foram utilizados os tubos circulares laminados disponíveis no Catálogo Técnico de Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular [72], da V&M do Brasil.

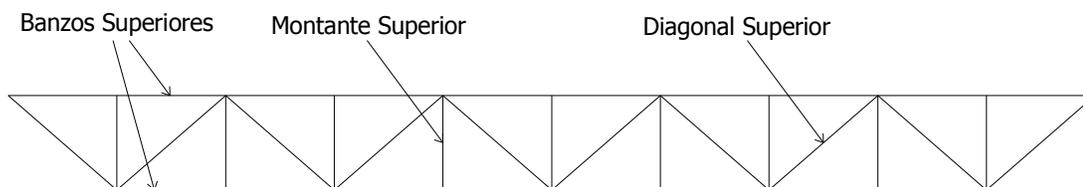


Figura 5.11 – Travamentos do plano que contém os banzos superiores da treliça multiplanar

As análises das treliças multiplanares foram feitas de maneira análoga às análises das treliças planas, sendo que a maior diferença entre elas diz respeito a largura de influência da treliça multiplanar. Como foi definido nas premissas das análises, foi adotada a distância de dois metros entre terças adjacentes. Assim, para que a largura de influência de cada banzo superior da treliça multiplanar tenha dois metros, foi adotada uma distância entre banzos superiores também de dois metros. Dessa forma, a área de influência das treliças multiplanares é o dobro da área de influência das treliças planas, conforme apresentado na Figura 5.12.

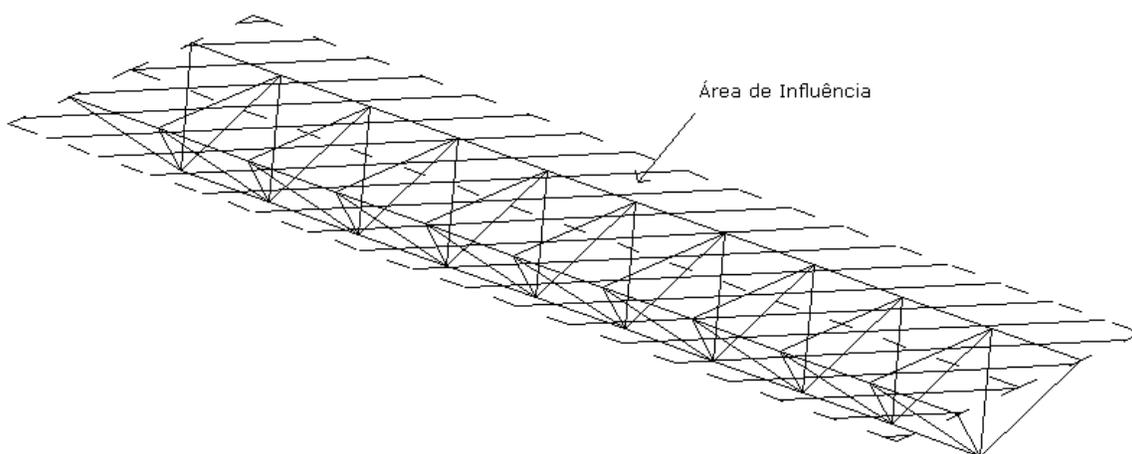


Figura 5.12 – Área de influência da treliça multiplanar

Os limites superior e inferior de variação da altura das treliças multiplanares para cada vão encontram-se na Tabela 5.13. Essas alturas foram analisadas pelo programa AutoTruss 2.0, sendo que os resultados das melhores treliças multiplanares são apresentados na Tabela 5.14. A escolha da melhor solução para cada vão seguiu o mesmo critério adotado no caso das treliças planas, e as tabelas com as melhores alternativas pode ser encontrada no anexo A. Os resultados obtidos para as terças treliçadas tubulares multiplanares também são apresentados no gráfico da Figura 5.13, juntamente com os resultados das terças treliçadas tubulares planas.

| Terças Treliçadas Tubulares Multiplanares | |
|---|------------------|
| Vão (m) | Limite de altura |
| 4 | 0,25m - 0,50m |
| 8 | 0,40m - 0,80m |
| 12 | 0,50m - 1,20m |
| 16 | 0,80m - 1,60m |
| 20 | 0,90m - 2,00m |
| 24 | 1,10m - 2,20m |
| 28 | 1,30m - 2,30m |
| 32 | 1,40m - 2,40m |
| 36 | 1,60m - 2,50m |
| 40 | 1,90m - 2,70m |

Tabela 5.13 – Limites das alturas das treliças multiplanares

| Terças Treliçadas Tubulares Multiplanares | | | |
|---|------------|-------------------|---------------------------------|
| Vão (m) | Altura (m) | Número de Módulos | Taxa Total (kg/m ²) |
| 4 | 0,50 | 3 | 4,02 |
| 8 | 0,50 | 6 | 4,55 |
| 12 | 1,10 | 6 | 5,52 |
| 16 | 1,10 | 8 | 6,35 |
| 20 | 1,25 | 10 | 6,95 |
| 24 | 1,60 | 12 | 7,69 |
| 28 | 1,65 | 14 | 8,35 |
| 32 | 1,65 | 16 | 9,28 |
| 36 | 1,75 | 18 | 10,24 |
| 40 | 2,30 | 20 | 11,28 |

Tabela 5.14 – Terças treliçadas tubulares multiplanares

Terças Treliçadas Tubulares

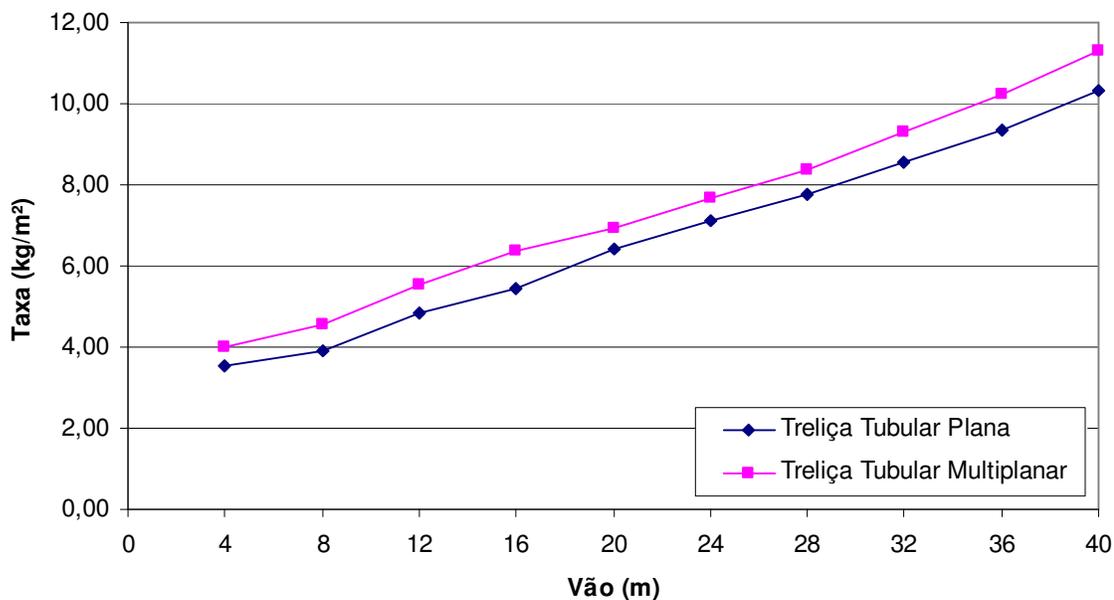


Figura 5.13 – Gráfico das terças treliçadas tubulares planas e multiplanares

Entre as treliças tubulares, a plana apresenta taxas menores, mesmo com a consideração do peso das linhas de corrente, que não são necessárias nas treliças multiplanares. Porém, essa diferença não é muito grande, ficando abaixo de 1,0 kg/m².

5.4 Análise das Terças Treliçadas em Perfis Abertos

Como o uso das treliças planas em perfil aberto já é bastante difundido, optou-se por adotar o tipo de treliça mais utilizado no mercado, que é a treliça Warren, que já demonstrou ser a melhor solução para as treliças tubulares. Foram analisadas treliças compostas por perfis dupla cantoneira laminada e U simples formado a frio, tanto para os banzos quanto para as diagonais, conforme a Figura 5.14, que são muito utilizadas no mercado brasileiro. Para as treliças em dupla cantoneira foram empregados os perfis padronizados e utilizados comercialmente, enquanto que para as treliças em perfis U foram empregados os perfis da NBR 6355/2003 [5].

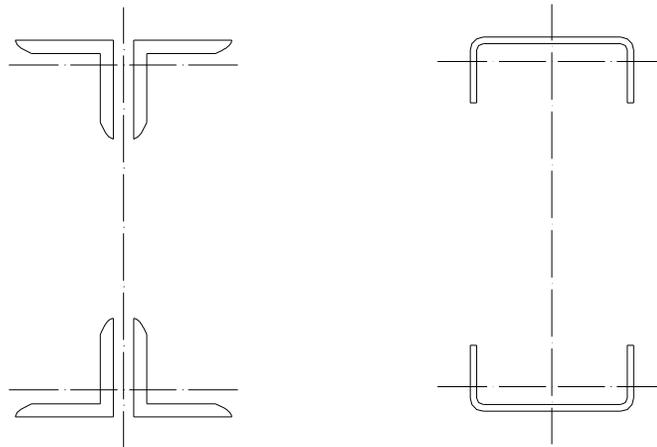


Figura 5.14 – Tipos de terças treliçadas em perfis abertos

Foram analisados vãos com variação de quatro metros, até um limite de 40 metros. Assim como nas treliças tubulares planas, foi considerada a presença de linhas de corrente em todos os nós dos banzos superior e inferior para possibilitar uma melhor comparação entre os tipos de terças. Seus apoios estão localizados nas extremidades do banzo superior, e a área de influência é a mesma das treliças tubulares planas, conforme a Figura 5.8.

Como na análise das terças treliçadas em perfil aberto foi utilizado o programa de análise estrutural SAP2000 [63], e não o programa AutoTruss 2.0 que só permite a análise de treliças tubulares, não foi possível varrer uma gama de alturas para cada vão com o objetivo de encontrar a melhor geometria da treliça. Assim, foi necessário definir uma altura fixa para cada vão estudado, seguindo a recomendação de Wardenier [76] que menciona que a relação entre a altura e o vão da treliça deve ficar entre 1/10 e 1/16. Essa recomendação foi seguida, exceto para os vãos de 36 e 40 metros, onde foram utilizadas, respectivamente, as relações de 1/17 e 1/18, para que as alturas não ficassem muito grandes.

O número de barras dos banzos foi definido de modo que o ângulo das diagonais ficasse sempre entre 30° e 70°, mesmo limite utilizado para as treliças tubulares. Além disso, foi definido um comprimento máximo de dois metros para as barras dos banzos, para evitar grandes comprimentos de flambagem que resultariam em perfis mais pesados.

Como o programa SAP2000 [63] não permite realizar o dimensionamento segundo as normas brasileiras, foram adotadas as normas americanas AISC [1] e AISI [2] para os perfis dupla cantoneira laminada e U formado a frio, respectivamente.

Embora as treliças em perfil aberto utilizadas comercialmente normalmente apresentem o mesmo perfil ao longo de todo o banzo, e apenas um perfil para as diagonais, neste estudo das treliças em perfil aberto, assim como nas treliças tubulares, adotou-se uma variação da espessura dos perfis ao longo dos banzos, criando um número máximo de três grupos de perfis, quando necessário. O mesmo foi feito para as diagonais, permitindo obter treliças mais leves seguindo os mesmos critérios utilizados para as treliças tubulares.

Os resultados das análises das terças treliçadas em perfis abertos encontram-se na Tabela 5.15 e no gráfico da Figura 5.15. A massa das linhas de corrente também foi considerada na taxa final de cada terça, da mesma forma como foi realizado para as terças treliçadas tubulares planas.

| Terças Treliçadas em Perfis Abertos | | | | | | | |
|-------------------------------------|------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|------------|-------------------|---------------------------------|
| Dupla Cantoneira Laminada | | | | Perfil U Formado a Frio | | | |
| Vão (m) | Altura (m) | Número de Módulos | Taxa Total (kg/m ²) | Vão (m) | Altura (m) | Número de Módulos | Taxa Total (kg/m ²) |
| 4 | 0,30 | 4 | 4,20 | 4 | 0,30 | 4 | 3,20 |
| 8 | 0,50 | 6 | 5,08 | 8 | 0,50 | 6 | 4,01 |
| 12 | 0,80 | 8 | 6,39 | 12 | 0,80 | 8 | 4,86 |
| 16 | 1,00 | 10 | 7,43 | 16 | 1,00 | 10 | 5,37 |
| 20 | 1,30 | 10 | 8,64 | 20 | 1,30 | 10 | 7,56 |
| 24 | 1,60 | 12 | 9,87 | 24 | 1,60 | 12 | 8,01 |
| 28 | 1,80 | 14 | 10,89 | 28 | 1,80 | 14 | 8,92 |
| 32 | 2,00 | 16 | 12,74 | 32 | 2,00 | 16 | 10,67 |
| 36 | 2,10 | 18 | 14,27 | 36 | 2,10 | 18 | 11,53 |
| 40 | 2,20 | 20 | 15,73 | 40 | 2,20 | 20 | 12,70 |

Tabela 5.15 – Terças treliçadas em perfis abertos

Terças Treliçadas em Perfis Abertos

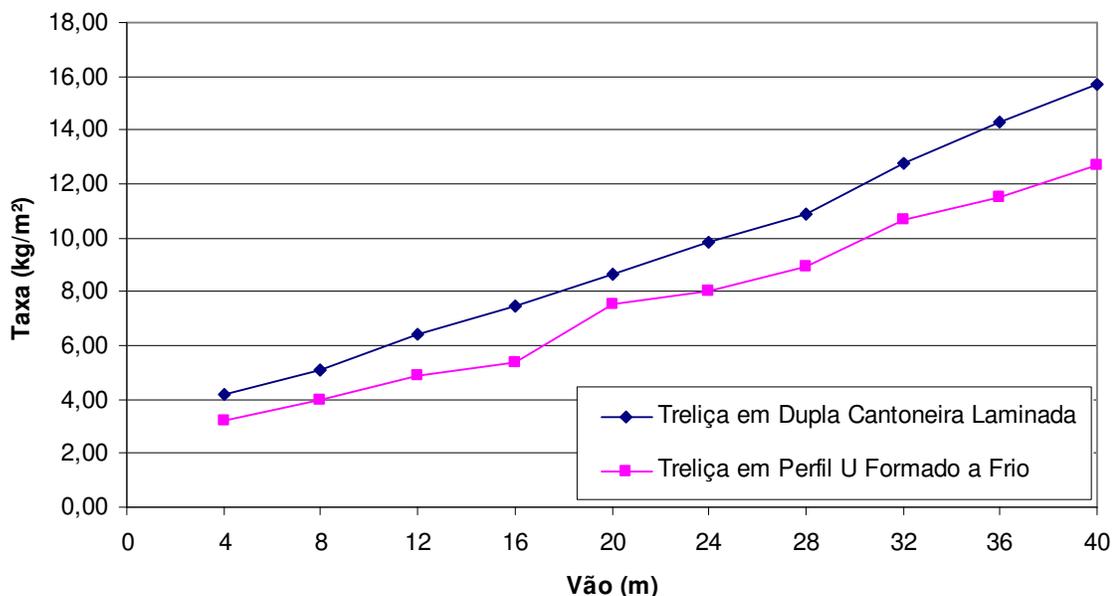


Figura 5.15 – Gráfico das terças treliçadas em perfis abertos

Em todos os vãos analisados, a treliça em perfil U formado a frio apresentou uma taxa menor que a treliça em dupla cantoneira laminada. Como ambas possuem linhas de corrente, o responsável por essa diferença é o menor peso dos perfis formados a frio.

5.5 Análise de Custo

Para determinar qual o melhor tipo de terça, não basta apenas verificar qual modelo é mais leve, já que o seu custo é de extrema importância na escolha do sistema de cobertura. O ideal é realizar uma análise desses dois fatores, peso e custo, já que mesmo uma cobertura um pouco mais cara pode ser a melhor solução, pois caso ela seja mais leve, as cargas atuantes no restante na estrutura serão menores, permitindo a utilização de perfis e fundações mais econômicas.

O custo total de uma terça não leva em conta somente o valor econômico dos perfis utilizados, mas também a dificuldade e o tempo de fabricação e montagem da cobertura na obra.

Assim, foram definidos três custos intermediários que compõem o custo total da terça: custo do material, custo de fabricação e custo de montagem.

O custo do material corresponde ao preço dos perfis utilizados em cada terça. Sua análise é importante para diferenciar as terças compostas por perfis laminados e formados a frio, que possuem um custo diferente para uma mesma massa de aço utilizada. Além disso, dentre os perfis laminados, os tubulares também possuem um custo diferenciado, tendo uma grande influência no custo total das terças treliçadas tubulares.

O custo de fabricação para as terças em perfil agrega as etapas de tratamento e pintura dos perfis, cortes para obtenção dos comprimentos necessários e execução de furos para fixação na obra e passagem das linhas de corrente. Já para as terças em treliça, além da pintura, corte e furação, também é computada a etapa de ligação dos perfis para a obtenção da treliça, podendo ser utilizadas soldas, parafusos e chapas de ligações. Esse custo apresenta valores muito diferentes entre terças em perfil e treliçadas.

Por fim, o custo de montagem abrange as etapas de içamento e fixação das terças na cobertura, já no local da obra, incluindo a colocação das linhas de corrente, quando necessário. O principal fator que influencia no custo de montagem é a mão de obra utilizada para a fixação das terças.

Os valores dos custos descritos acima foram fornecidos por uma grande e conceituada empresa do mercado nacional do ramo de estruturas metálicas para construção civil, sendo, portanto, valores confiáveis e realistas aos praticados no mercado brasileiro. Embora nas análises de peso tenham sido estudados diversos vãos de até 40 metros, a realização da análise de custo de todos eles resultaria em um processo muito trabalhoso e demorado. Optou-se então pela análise de quatro vãos distintos, 8, 12, 20 e 32 metros, permitindo ter uma boa visão das diferenças de custo entre os tipos de terças estudados. Os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17.

| Vão (m) | Tipo de Perfil | Taxa (kg/m ²) | Custos (R\$/kg) | | | |
|---------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|------------|----------|-------|
| | | | Material | Fabricação | Montagem | Total |
| 8 | U Formado a Frio | 4,73 | 2,11 | 1,23 | 2,25 | 5,59 |
| 8 | U enrijecido Formado a Frio | 3,73 | 2,11 | 1,36 | 2,25 | 5,72 |
| 8 | Z Formado a Frio | 5,01 | 2,11 | 1,23 | 2,25 | 5,59 |
| 8 | Z enrijecido Formado a Frio | 4,12 | 2,11 | 1,36 | 2,25 | 5,72 |
| 8 | U Laminado | 6,16 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 8 | I Laminado | 7,41 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 12 | U Formado a Frio | 7,36 | 2,11 | 1,19 | 2,25 | 5,55 |
| 12 | U enrijecido Formado a Frio | 6,43 | 2,11 | 1,32 | 2,25 | 5,68 |
| 12 | Z Formado a Frio | 8,70 | 2,11 | 1,19 | 2,25 | 5,55 |
| 12 | Z enrijecido Formado a Frio | 6,78 | 2,11 | 1,32 | 2,25 | 5,68 |
| 12 | U Laminado | 8,67 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 12 | I Laminado | 13,69 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 20 | U Formado a Frio | 14,97 | 2,11 | 1,13 | 2,25 | 5,49 |
| 20 | U enrijecido Formado a Frio | 13,05 | 2,11 | 1,28 | 2,25 | 5,64 |
| 20 | Z Formado a Frio | 15,81 | 2,11 | 1,19 | 2,25 | 5,55 |
| 20 | Z enrijecido Formado a Frio | 12,34 | 2,11 | 1,32 | 2,25 | 5,68 |
| 20 | U Laminado | 25,32 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 20 | I Laminado | 30,15 | 3,47 | 0,95 | 2,25 | 6,67 |
| 32 | U Formado a Frio | 35,46 | 2,11 | 1,09 | 2,25 | 5,45 |
| 32 | U enrijecido Formado a Frio | 24,76 | 2,11 | 1,23 | 2,25 | 5,59 |
| 32 | Z enrijecido Formado a Frio | 30,06 | 2,11 | 1,23 | 2,25 | 5,59 |

Tabela 5.16 – Custos das terças em perfil em R\$/kg

| Vão (m) | Tipo de Treliça | Taxa (kgf/m ²) | Custos (R\$/kg) | | | |
|---------|------------------------------|----------------------------|-----------------|------------|----------|-------|
| | | | Material | Fabricação | Montagem | Total |
| 8 | Plana Tubular Circular | 3,92 | 4,41 | 4,44 | 2,25 | 11,10 |
| 8 | Multiplanar Tubular Circular | 4,55 | 4,41 | 6,31 | 2,25 | 12,97 |
| 8 | Dupla Cantoneira Laminada | 5,08 | 3,12 | 2,75 | 2,25 | 8,12 |
| 8 | U Formado a Frio | 4,01 | 3,47 | 3,56 | 2,25 | 9,28 |
| 12 | Plana Tubular Circular | 4,82 | 4,41 | 4,19 | 2,25 | 10,85 |
| 12 | Multiplanar Tubular Circular | 5,52 | 4,41 | 6,03 | 2,25 | 12,69 |
| 12 | Dupla Cantoneira Laminada | 6,39 | 3,12 | 2,53 | 2,25 | 7,90 |
| 12 | U Formado a Frio | 4,86 | 3,47 | 3,25 | 2,25 | 8,97 |
| 20 | Plana Tubular Circular | 6,42 | 4,41 | 4,19 | 2,25 | 10,85 |
| 20 | Multiplanar Tubular Circular | 6,95 | 4,41 | 6,03 | 2,25 | 12,69 |
| 20 | Dupla Cantoneira Laminada | 8,64 | 3,12 | 2,53 | 2,25 | 7,90 |
| 20 | U Formado a Frio | 7,56 | 3,47 | 3,25 | 2,25 | 8,97 |
| 32 | Plana Tubular Circular | 8,58 | 4,41 | 4,19 | 2,25 | 10,85 |
| 32 | Multiplanar Tubular Circular | 9,28 | 4,41 | 6,03 | 2,25 | 12,69 |
| 32 | Dupla Cantoneira Laminada | 12,74 | 3,12 | 2,53 | 2,25 | 7,90 |
| 32 | U Formado a Frio | 10,67 | 3,47 | 3,25 | 2,25 | 8,97 |

Tabela 5.17 – Custos das terças treliçadas em R\$/kg

Pelas tabelas anteriores, é possível notar que, para um mesmo tipo de terça, o custo total por quilograma de aço reduz com o aumento do vão. Para as treliças o custo total fica estável para vãos superiores a 12 metros. Também percebe-se que o custo do material das terças em perfil formado a frio é menor que das terças em perfil laminado. Já entre as terças treliçadas, o maior custo de material corresponde às treliças compostas por perfis tubulares, demonstrando que este é o perfil mais caro.

Com relação à fabricação, as terças treliçadas apresentam um custo muito maior, já que a sua confecção é bem mais complexa e trabalhosa, exigindo um tempo maior. Dentre todas as treliças, a multiplanar é a que apresenta o maior custo de fabricação, já que as suas ligações são mais complexas de serem fabricadas.

O custo de montagem apresentado é o mesmo para todos os tipos de terças, pois está sendo considerado o custo da mão de obra e dos equipamentos necessários para a montagem de um quilograma de terça.

Pode-se notar que, para uma mesma massa de terça, o custo total das terças treliçadas é consideravelmente maior que das terças em perfil, chegando a ser mais que o dobro em alguns casos. Porém, também é possível perceber que a taxa das terças treliçadas é menor que das terças em perfil, principalmente para grandes vãos, chegando a ser três vezes menor. Portanto, para permitir uma real comparação dos custos das terças, é necessário determinar o seu custo por metro quadrado coberto, levando em consideração as diferenças nas taxas de cada tipo de terça. Esses valores são apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19.

| Vão (m) | Tipo de Perfil | Taxa (kg/m ²) | Custos (R\$/m ²) | | | |
|---------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|------------|----------|--------|
| | | | Material | Fabricação | Montagem | Total |
| 8 | U Formado a Frio | 4,73 | 9,98 | 5,82 | 10,64 | 26,44 |
| 8 | U enrijecido Formado a Frio | 3,73 | 7,86 | 5,07 | 8,38 | 21,31 |
| 8 | Z Formado a Frio | 5,01 | 10,56 | 6,16 | 11,26 | 27,99 |
| 8 | Z enrijecido Formado a Frio | 4,12 | 8,69 | 5,60 | 9,27 | 23,55 |
| 8 | U Laminado | 6,16 | 21,39 | 5,86 | 13,87 | 41,11 |
| 8 | I Laminado | 7,41 | 25,72 | 7,04 | 16,68 | 49,45 |
| 12 | U Formado a Frio | 7,36 | 15,54 | 8,76 | 16,57 | 40,87 |
| 12 | U enrijecido Formado a Frio | 6,43 | 13,57 | 8,49 | 14,47 | 36,52 |
| 12 | Z Formado a Frio | 8,70 | 18,36 | 10,36 | 19,58 | 48,30 |
| 12 | Z enrijecido Formado a Frio | 6,78 | 14,30 | 8,95 | 15,25 | 38,51 |
| 12 | U Laminado | 8,67 | 30,09 | 8,24 | 19,51 | 57,83 |
| 12 | I Laminado | 13,69 | 47,50 | 13,00 | 30,80 | 91,30 |
| 20 | U Formado a Frio | 14,97 | 31,60 | 16,92 | 33,69 | 82,21 |
| 20 | U enrijecido Formado a Frio | 13,05 | 27,54 | 16,71 | 29,37 | 73,62 |
| 20 | Z Formado a Frio | 15,81 | 33,36 | 18,81 | 35,57 | 87,74 |
| 20 | Z enrijecido Formado a Frio | 12,34 | 26,04 | 16,29 | 27,77 | 70,11 |
| 20 | U Laminado | 25,32 | 87,85 | 24,05 | 56,97 | 168,87 |
| 20 | I Laminado | 30,15 | 104,61 | 28,64 | 67,83 | 201,08 |
| 32 | U Formado a Frio | 35,46 | 74,82 | 38,65 | 79,78 | 193,25 |
| 32 | U enrijecido Formado a Frio | 24,76 | 52,24 | 30,46 | 55,71 | 138,41 |
| 32 | Z enrijecido Formado a Frio | 30,06 | 63,42 | 36,97 | 67,63 | 168,03 |

Tabela 5.18 – Custos das terças em perfil em R\$/m²

| Vão (m) | Tipo de Treliça | Taxa (kgf/m ²) | Custos (R\$/m ²) | | | |
|---------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------|----------|--------|
| | | | Material | Fabricação | Montagem | Total |
| 8 | Plana Tubular Circular | 3,92 | 17,30 | 17,42 | 8,83 | 43,54 |
| 8 | Multiplanar Tubular Circular | 4,55 | 20,07 | 28,71 | 10,24 | 59,01 |
| 8 | Dupla Cantoneira Laminada | 5,08 | 15,84 | 13,96 | 11,42 | 41,23 |
| 8 | U Formado a Frio | 4,01 | 13,91 | 14,28 | 9,02 | 37,21 |
| 12 | Plana Tubular Circular | 4,82 | 21,26 | 20,20 | 10,85 | 52,30 |
| 12 | Multiplanar Tubular Circular | 5,52 | 24,34 | 33,29 | 12,42 | 70,05 |
| 12 | Dupla Cantoneira Laminada | 6,39 | 19,94 | 16,17 | 14,38 | 50,48 |
| 12 | U Formado a Frio | 4,86 | 16,88 | 15,81 | 10,95 | 43,64 |
| 20 | Plana Tubular Circular | 6,42 | 28,30 | 26,89 | 14,44 | 69,63 |
| 20 | Multiplanar Tubular Circular | 6,95 | 30,65 | 41,91 | 15,64 | 88,20 |
| 20 | Dupla Cantoneira Laminada | 8,64 | 26,97 | 21,87 | 19,45 | 68,28 |
| 20 | U Formado a Frio | 7,56 | 26,22 | 24,56 | 17,00 | 67,78 |
| 32 | Plana Tubular Circular | 8,58 | 37,83 | 35,94 | 19,30 | 93,07 |
| 32 | Multiplanar Tubular Circular | 9,28 | 40,92 | 55,96 | 20,88 | 117,76 |
| 32 | Dupla Cantoneira Laminada | 12,74 | 39,75 | 32,23 | 28,66 | 100,64 |
| 32 | U Formado a Frio | 10,67 | 37,02 | 34,67 | 24,00 | 95,69 |

Tabela 5.19 – Custos das terças treliçadas em R\$/m²

5.6 Comparações

Com todas as análises de pesos e custos realizadas, é possível comparar todos os modelos de terças propostos, fazendo uma investigação de qual o melhor tipo a ser utilizado, dependendo do seu vão. Foram realizadas as comparações tanto dos pesos quanto dos custos, já que ambos são fatores importantes na escolha do modelo da terça.

5.6.1 Comparações dos Pesos

Dentre as terças em perfil, as laminadas apresentam uma taxa mais elevada do que qualquer perfil formado a frio, conforme a Figura 5.16. Os perfis mais leves são o U e o Z enrijecidos formados a frio, sendo que a diferença entre eles é pequena.

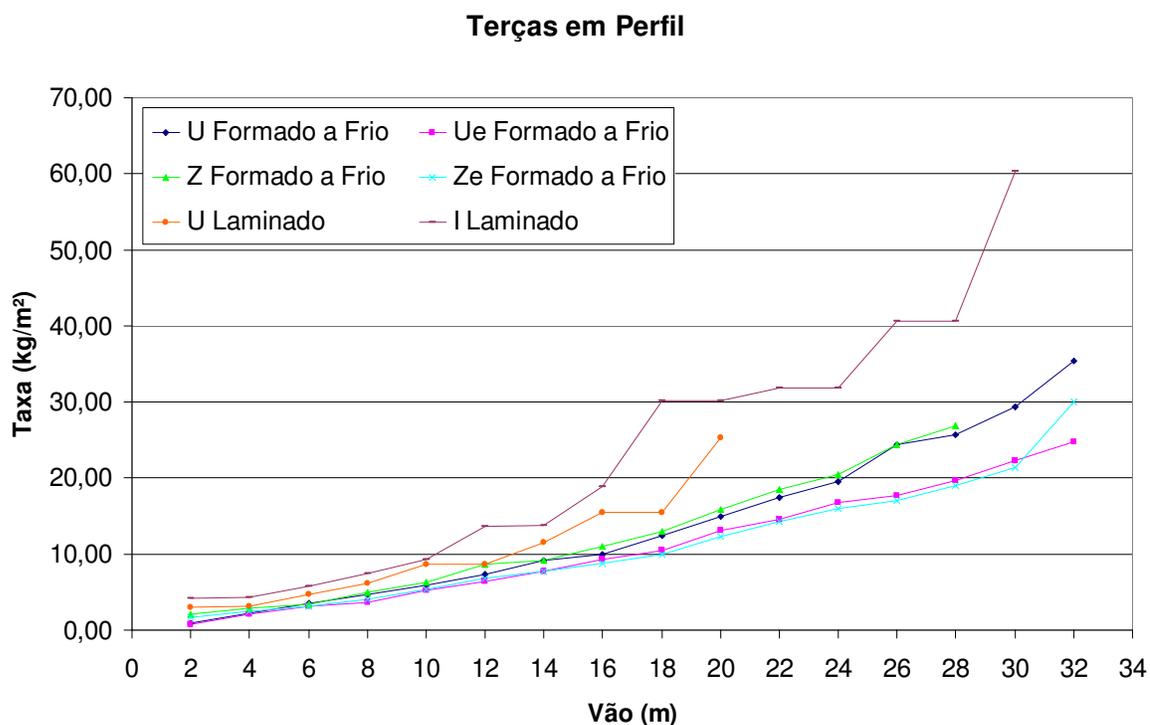


Figura 5.16 – Comparação das taxas das terças em perfil

Comparando as taxas dos modelos de telhas treliçadas estudadas, percebe-se que para vãos inferiores a 16 metros, as melhores soluções, em termos de peso, são a treliça tubular plana e a treliça em perfil U formado a frio, conforme a Figura 5.17. Para vãos superiores, a treliça tubular plana passa a se isolar como a alternativa mais leve, seguida pela treliça tubular multiplanar. Já a treliça em dupla cantoneira laminada é a que apresenta as maiores taxas.

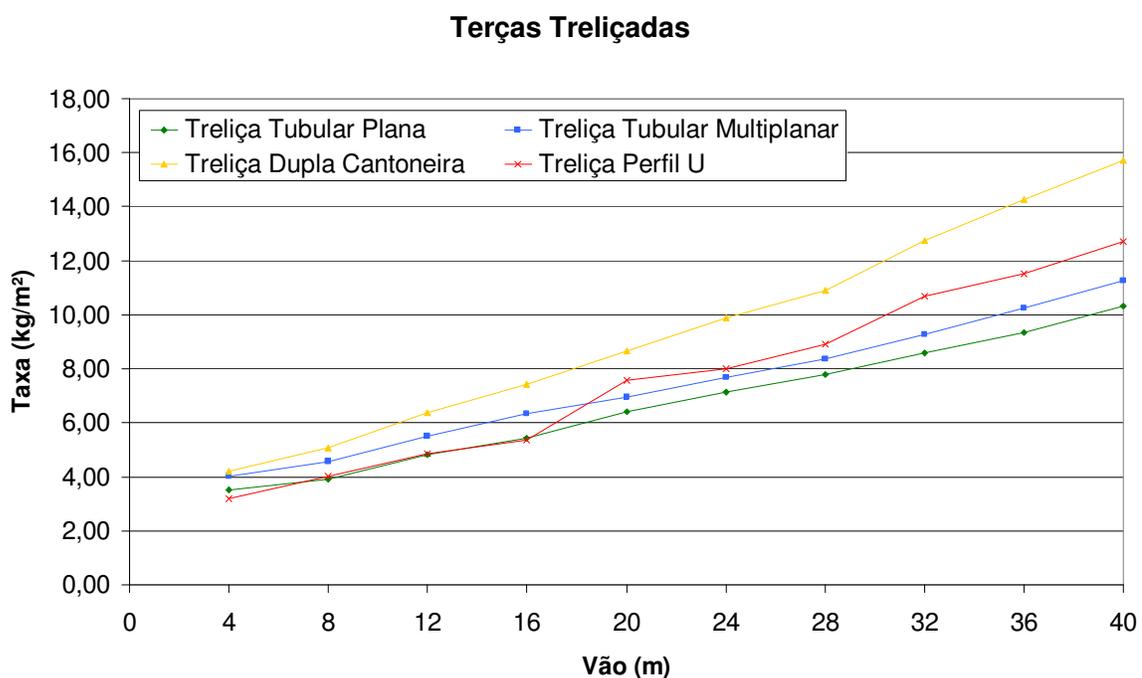
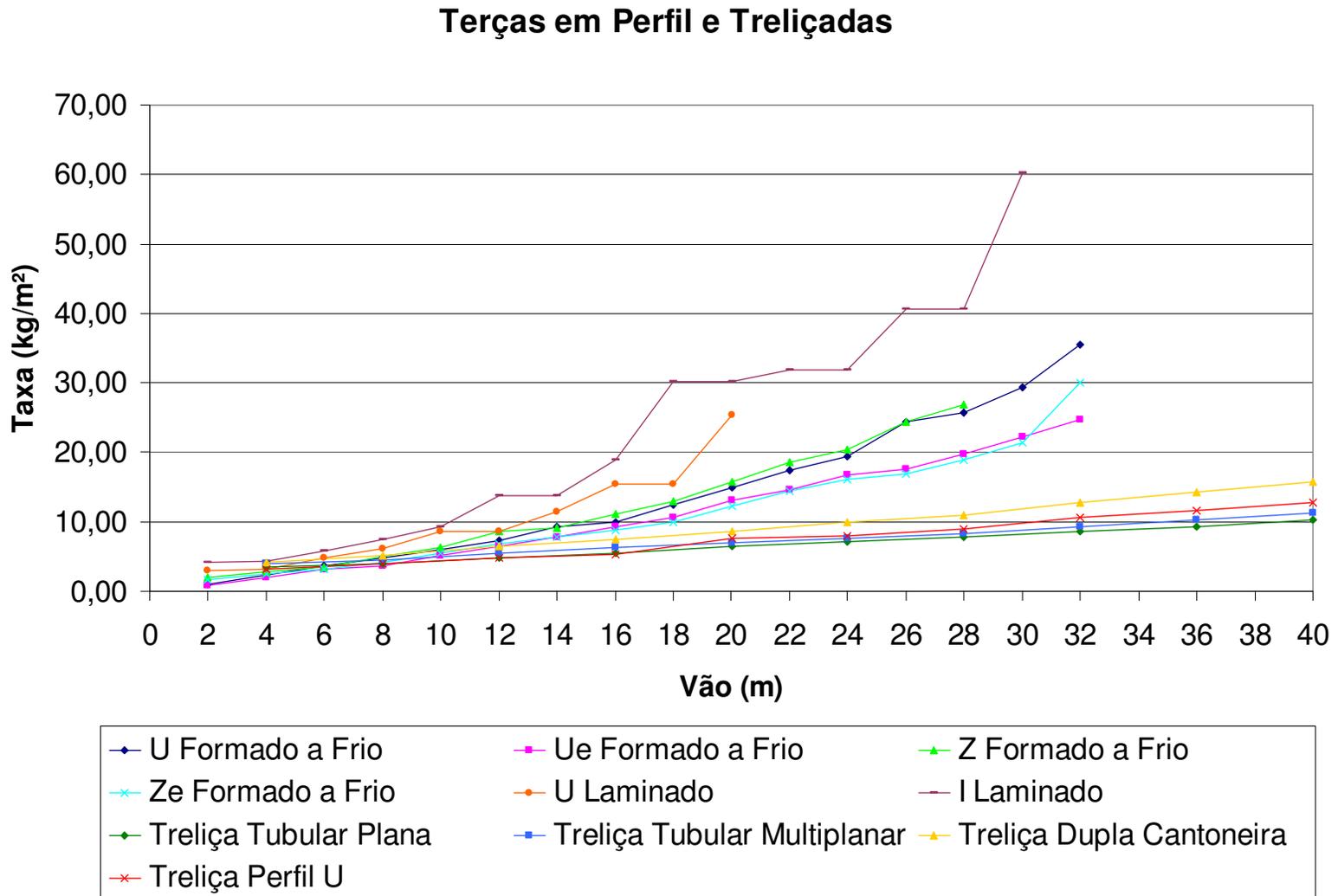


Figura 5.17 – Comparação das taxas das telhas treliçadas

A comparação entre todos os tipos de telhas estudadas é apresentada na Figura 5.18. É possível notar que para vãos inferiores a 8 metros as telhas em perfil enrijecido formado a frio são as soluções mais leves. Com 10 metros já é possível notar uma ligeira vantagem das telhas treliçadas, e a partir dos 12 metros de vão essa vantagem cresce ainda mais. A diferença de peso entre as telhas treliçadas é bem menor que entre as telhas em perfil, sendo que a treliça tubular plana sempre figura entre as mais leves.

Figura 5.18 – Comparação das taxas de todas as terças



Pelo gráfico da Figura 5.18, nota-se que o crescimento nas taxas das terças em perfil tem uma tendência exponencial, enquanto que nas terças treliçadas esse crescimento é aparentemente linear. Essa diferença se deve ao fato de que o esforço predominante nas terças em perfil é o momento fletor, cujo valor no meio do vão aumenta de forma quadrática com o crescimento do vão, conforme a equação 5.1, onde M é o momento fletor no meio do vão, q é a carga distribuída e L é o vão.

$$M = \frac{qL^2}{8} \quad (5.1)$$

Já nas treliças, o esforço predominante é o axial. Um valor aproximado do esforço axial atuante nos banzos de uma treliça pode ser determinado pelo binário de forças representado na Figura 5.19, que deve produzir um momento fletor igual ao momento atuante no meio do vão, cujo valor foi apresentado na equação 5.1.

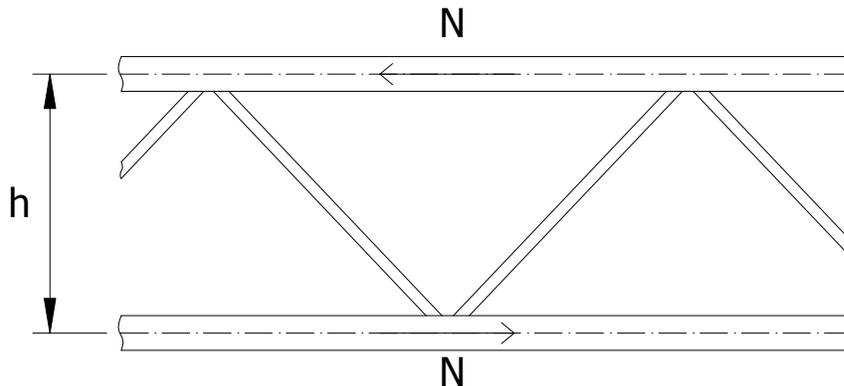


Figura 5.19 – Esforço axial nos banzos da treliça

Dessa forma, temos que:

$$N h = M = \frac{qL^2}{8} \quad (5.2)$$

Pela equação 5.2, caso a altura da treliça seja mantida constante ao longo de todos os vãos, o esforço axial atuante nos banzos aumenta de forma quadrática com o aumento do vão. Porém, no estudo desenvolvido, a altura da treliça cresce com o aumento do vão, seguindo uma relação entre $L/10$ e $L/20$. Se considerarmos que, na média, a altura da treliça adotada corresponde ao valor $L/15$:

$$N \frac{L}{15} = \frac{qL^2}{8} \quad (5.3)$$

$$N = 15 \frac{qL}{8} \quad (5.4)$$

Assim, pela equação 5.4, o esforço axial nos banzos da treliça aumenta linearmente com o vão, provocando um aumento linear na área do perfil utilizado, e conseqüentemente no peso da treliça. Como também deve ser levado em consideração o aumento dos esforços axiais nas diagonais, e no estudo desenvolvido não foi adotada a relação $L/15$ para a altura de todas as treliças, o crescimento das taxas das terças treliçadas não exatamente linear, mas aproxima-se de uma reta.

Portanto, analisando-se somente o fator peso, para vãos inferiores a 8 metros, a melhor alternativa é a terça em perfil U enrijecido formado a frio. Para vãos entre 12 e 16 metros as terças treliçadas tubular plana e em perfil U formado a frio apresentam os menores pesos. Já acima de 20 metros a treliça tubular plana é a mais recomendada.

5.6.2 Comparações dos Custos

Como foram realizadas as análises de custo apenas para quatro vãos de terças, 8, 12, 20 e 32 metros, foi adotada uma média dentre os valores desses quatro vãos para permitir a análise de todos os vãos, até 40 metros. A descrição das médias adotadas e os valores dos custos para

cada tipo de terça, obtidos a partir das Tabelas 5.16 e 5.17, são apresentados nas Tabelas 5.20 e 5.21.

| | | Custo Total (R\$/kg) | | | | | |
|----------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------|---------------------|-----------------|----------|
| | | Perfil Formado a Frio | | | | Perfil Laminado | |
| Vão | Custo Adotado | Perfil U | Perfil U Enrijecido | Perfil Z | Perfil Z Enrijecido | Perfil U | Perfil I |
| até 10m | valor de 8m | 5,59 | 5,72 | 5,59 | 5,72 | 6,67 | 6,67 |
| 12m | valor de 12m | 5,55 | 5,68 | 5,55 | 5,68 | 6,67 | 6,67 |
| 14 à 18m | média entre 12 e 20m | 5,52 | 5,66 | 5,52 | 5,66 | 6,67 | 6,67 |
| 20m | valor de 20m | 5,49 | 5,64 | 5,49 | 5,64 | 6,67 | 6,67 |
| 22 à 30m | média entre 20 e 32m | 5,47 | 5,62 | 5,49 | 5,62 | - | 6,67 |
| 32 à 40m | valor de 32m | 5,45 | 5,59 | - | 5,59 | - | - |

Tabela 5.20 – Valores adotados para os custos das terças em perfil

| | | Custo Total (R\$/kg) | | | |
|----------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|------------------|
| | | Treliza Tubular | | Treliza em Perfil Aberto | |
| Vão | Custo Adotado | Tubular Plana | Tubular Multiplanar | Dupla Cantoneira Laminada | U Formado a Frio |
| até 10m | valor de 8m | 11,10 | 12,97 | 8,12 | 9,28 |
| 12m | valor de 12m | 10,85 | 12,69 | 7,90 | 8,97 |
| 14 à 18m | média entre 12 e 20m | 10,85 | 12,69 | 7,90 | 8,97 |
| 20m | valor de 20m | 10,85 | 12,69 | 7,90 | 8,97 |
| 22 à 30m | média entre 20 e 32m | 10,85 | 12,69 | 7,90 | 8,97 |
| 32 à 40m | valor de 32m | 10,85 | 12,69 | 7,90 | 8,97 |

Tabela 5.21 – Valores adotados para os custos das terças treliçadas

Com esses valores de custo por quilograma de aço e as taxas de peso apresentadas nos itens 5.2, 5.3 e 5.4, foram obtidos os custos por metro quadrado para todos os vãos e terças analisados. Esses valores são apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23.

O gráfico dos custos das terças em perfil, apresentado na Figura 5.20, possui um comportamento semelhante ao gráfico 5.16, correspondente ao peso das terças em perfil. Assim, nota-se que as terças em perfil laminado apresentam um custo mais elevado que as terças em perfil formado a frio, e dentre estas últimas, os perfis U e Z enrijecidos são as soluções de menor custo.

| Custo Total (R\$/m²) | | | | | | |
|-----------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|----------|
| Perfil Formado a Frio | | | | | | |
| Perfil Laminado | | | | | | |
| Vão (m) | Perfil U | Perfil U Enrijecido | Perfil Z | Perfil Z Enrijecido | Perfil U | Perfil I |
| 2 | 5,16 | 4,77 | 11,56 | 9,92 | 19,99 | 27,58 |
| 4 | 12,75 | 11,83 | 15,85 | 14,12 | 20,92 | 28,51 |
| 6 | 20,13 | 17,98 | 19,18 | 17,98 | 31,87 | 38,41 |
| 8 | 26,44 | 21,31 | 27,99 | 23,55 | 41,11 | 49,45 |
| 10 | 33,20 | 29,67 | 34,98 | 30,86 | 57,71 | 61,94 |
| 12 | 40,87 | 36,52 | 48,30 | 38,51 | 57,83 | 91,30 |
| 14 | 50,95 | 43,80 | 50,67 | 43,80 | 76,70 | 91,39 |
| 16 | 55,11 | 52,94 | 61,09 | 50,00 | 102,84 | 125,83 |
| 18 | 68,80 | 59,72 | 71,46 | 56,38 | 102,92 | 201,01 |
| 20 | 82,21 | 73,62 | 86,79 | 69,61 | 168,87 | 201,08 |
| 22 | 95,50 | 81,60 | 101,73 | 80,58 | - | 212,30 |
| 24 | 106,50 | 94,05 | 112,01 | 89,91 | - | 212,19 |
| 26 | 133,51 | 99,13 | 134,00 | 95,43 | - | 270,62 |
| 28 | 140,31 | 110,65 | 147,61 | 106,52 | - | 270,66 |
| 30 | 160,52 | 124,87 | - | 120,19 | - | 402,00 |
| 32 | 193,25 | 138,41 | - | 168,03 | - | - |

Tabela 5.22 – Custo total das terças em perfil

| Custo Total (R\$/m²) | | | | |
|-------------------------|---------------|---------------------|---------------------------|------------------|
| Trelça Tubular | | | | |
| Trelça em Perfil Aberto | | | | |
| Vão (m) | Tubular Plana | Tubular Multiplanar | Dupla Cantoneira Laminada | U Formado a Frio |
| 4 | 39,18 | 52,14 | 34,13 | 29,70 |
| 8 | 43,54 | 59,01 | 41,23 | 37,21 |
| 12 | 52,30 | 70,05 | 50,48 | 43,64 |
| 16 | 59,14 | 80,58 | 58,72 | 48,21 |
| 20 | 69,63 | 88,20 | 68,28 | 67,78 |
| 24 | 77,28 | 97,59 | 77,98 | 71,84 |
| 28 | 84,49 | 105,96 | 86,03 | 80,06 |
| 32 | 93,07 | 117,76 | 100,64 | 95,69 |
| 36 | 101,47 | 129,95 | 112,75 | 103,45 |
| 40 | 112,17 | 143,14 | 124,26 | 113,95 |

Tabela 5.23 – Custo total das terças treliçadas

Terças em Perfil

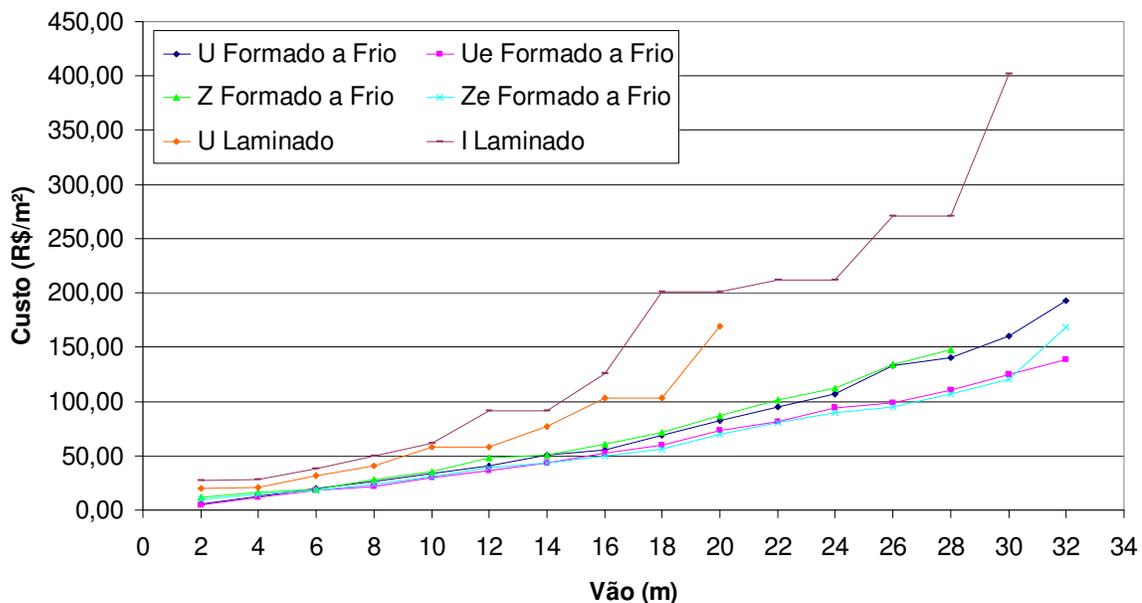


Figura 5.20 – Comparação dos custos das terças em perfil

Dentre as terças treliçadas, as tubulares multiplanares demonstraram ser as de custo mais elevado, conforme a Figura 5.21. As tubulares planas são a melhor solução, com relação ao custo, para vãos superiores a 28 metros, porém, entre 20 e 28 metros ela apresenta valores próximos às terças em perfil U formado a frio e em dupla cantoneira laminada. Esta última apresenta um desempenho bem melhor em relação ao custo do que em relação ao peso, demonstrando ser uma boa alternativa a ser considerada. Já para vãos inferiores a 20 metros, as treliças de menor custo são as compostas por perfis U formados a frio. Assim, pode-se notar que o custo tem uma influência muito grande nas terças treliçadas, devendo ser levado em conta na escolha do melhor tipo de terça.

Terças Treliçadas

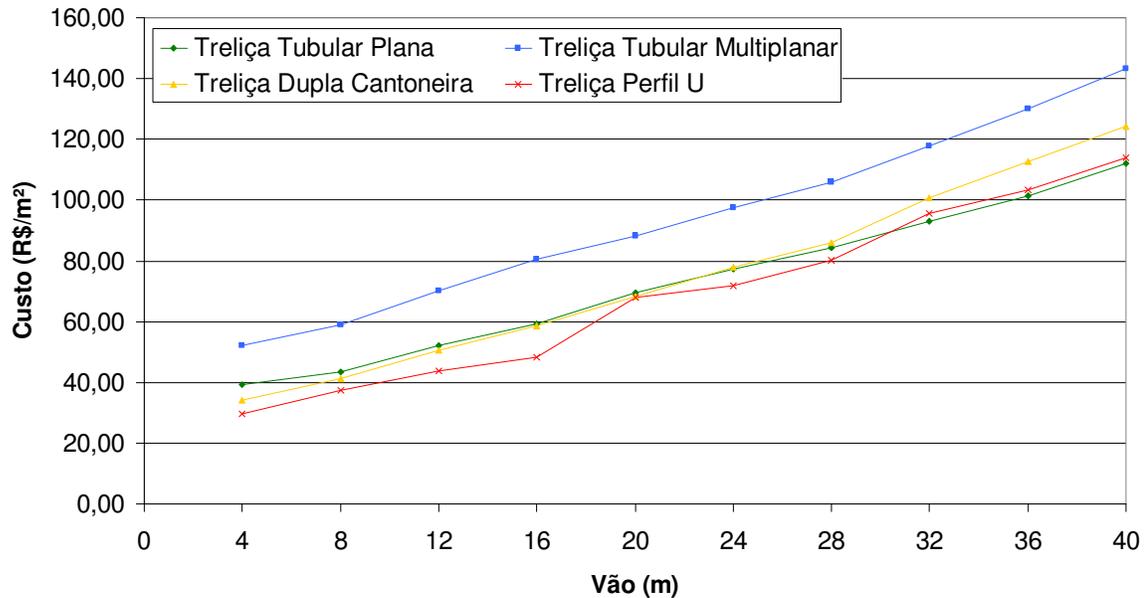


Figura 5.21 – Comparação dos custos das terças treliçadas

A comparação entre os custos de todos os tipos de terças, apresentada na Figura 5.22, demonstra que para vãos inferiores a 16 metros as terças em perfil U e Z enrijecidos formados a frio são as mais econômicas, com uma ligeira vantagem para a primeira. Entre 16 e 20 metros esses mesmos dois tipos de terças em perfil apresentam custos muito próximos aos das terças treliçadas tubular plana, em dupla cantoneira laminada e em perfil U formado a frio, sendo que esta última apresenta valores um pouco menores que as demais. Entre os vãos de 20 e 28 metros a treliça em perfil U formado a frio é o modelo mais barato, enquanto que para vãos superiores a 32 metros a terça de menor custo é a treliça tubular plana.

A comparação entre os gráficos apresentados nas Figuras 5.18 e 5.22 demonstra que o vão limite a partir do qual as terças treliçadas são mais vantajosas que as terças em perfil, é maior com relação ao custo do que com relação ao peso. Isso se deve ao fato de que o custo total por quilograma de aço das treliças é maior que dos perfis. Fato semelhante pode ser observado na comparação entre as treliças em perfis abertos e tubulares, já que estes apresentam custos por quilograma de aço mais elevados.

Terças em Perfil e Treliçadas

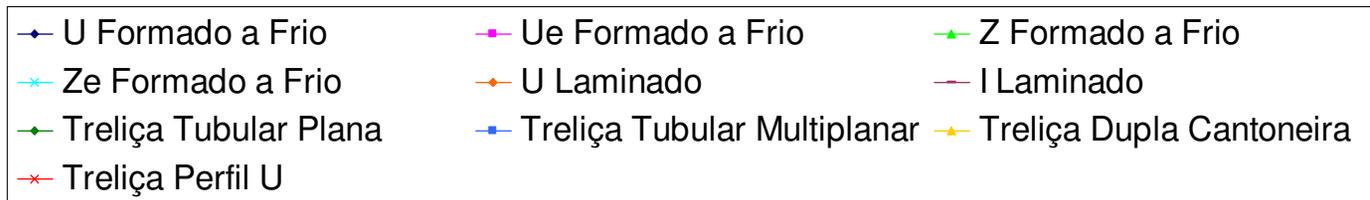
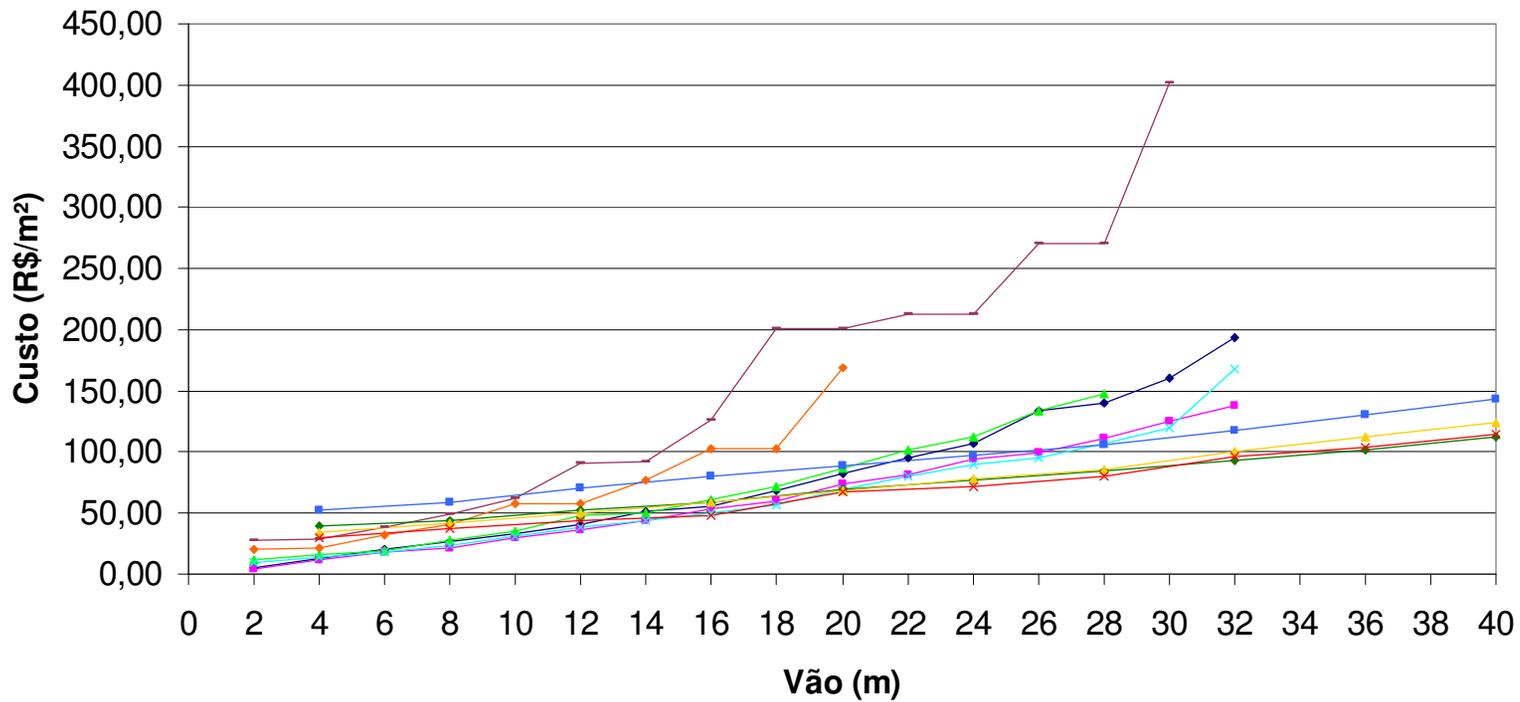


Figura 5.22 – Comparação dos custos de todas as terças

O melhor exemplo da influência do custo por quilograma de aço é a treliça tubular multiplanar, que na comparação dos pesos apresentou bons resultados para vãos superiores a 20 metros, perdendo apenas para as treliças tubulares planas, e na comparação dos custos não figurou entre as três melhores soluções em nenhum vão. Para investigar o motivo dessas diferenças entre os custos dos tipos de terças, foi realizada uma comparação entre os custos intermediários já definidos anteriormente: custo do material, custo de fabricação e custo de montagem.

5.6.3 Comparações dos Custos Intermediários

Para compreender melhor quais dos três custos intermediários têm maior influência no custo total das terças, foi feita uma comparação entre esses custos por metro quadrado, usando os valores apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19. Os gráficos comparativos de cada custo intermediário, bem como do custo total, são apresentados nas Figuras 5.23 a 5.26.

Para as terças em perfil formado a frio foram utilizados apenas os valores dos perfis U e Z enrijecidos, fazendo uma média entre eles, já que esses são as melhores soluções tanto em peso, quanto em custo para os perfis formados a frio. Já para as terças em perfil laminado foram utilizados apenas os valores do perfil U, que também é a melhor escolha dentre os perfis laminados.

Com relação ao material, as terças em perfil laminado são as que apresentam os maiores custos, enquanto que as em perfil formado a frio são as de menor custo para vãos inferiores a 20 metros. Entre as treliças, a de menor custo é a composta por perfis U formados a frio, embora os outros três modelos de terças não apresentem valores muito maiores. Embora o custo por quilograma de aço dos perfis tubulares seja maior, como as treliças tubulares são leves, principalmente para grandes vãos, o custo de material por metro quadrado não é muito elevado.

Custo do Material

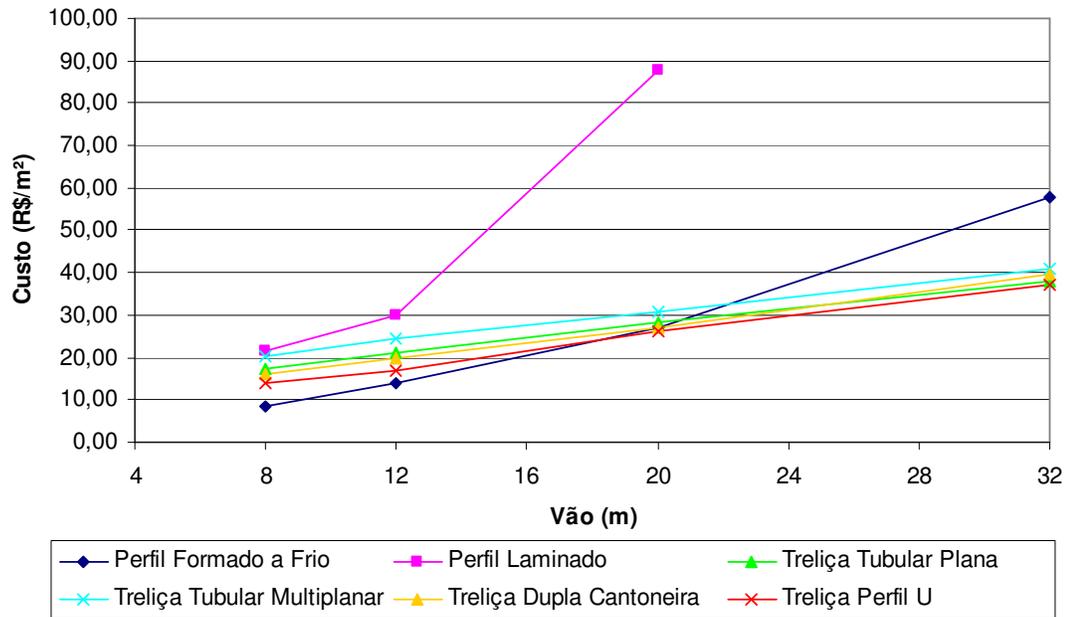


Figura 5.23 – Custo do material

Custo de Fabricação

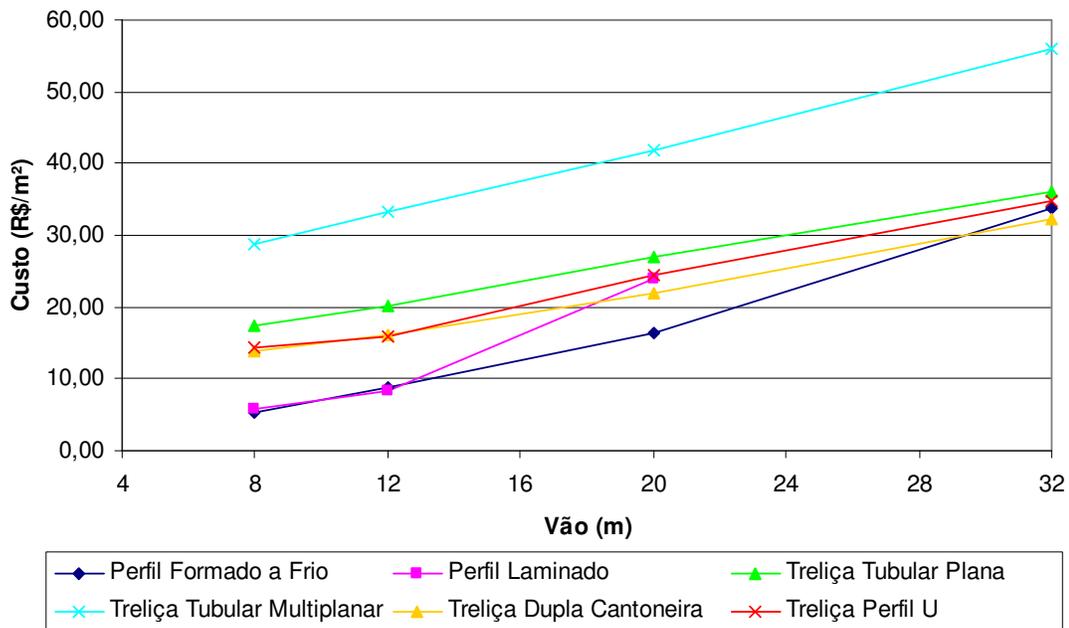


Figura 5.24 – Custo de fabricação

Custo de Montagem

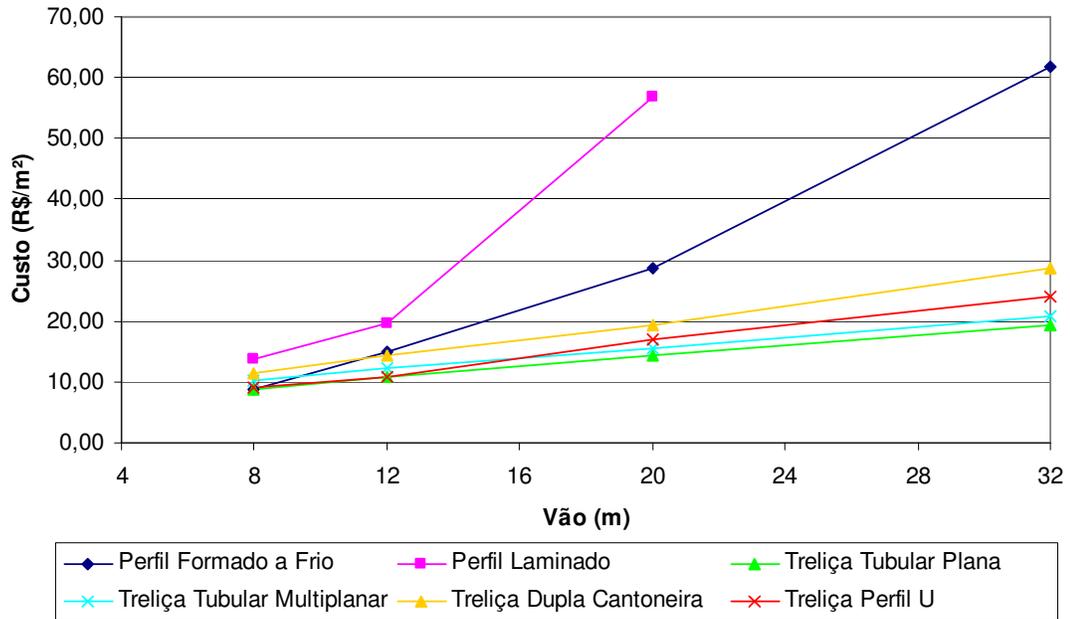


Figura 5.25 – Custo de montagem

Custo Total

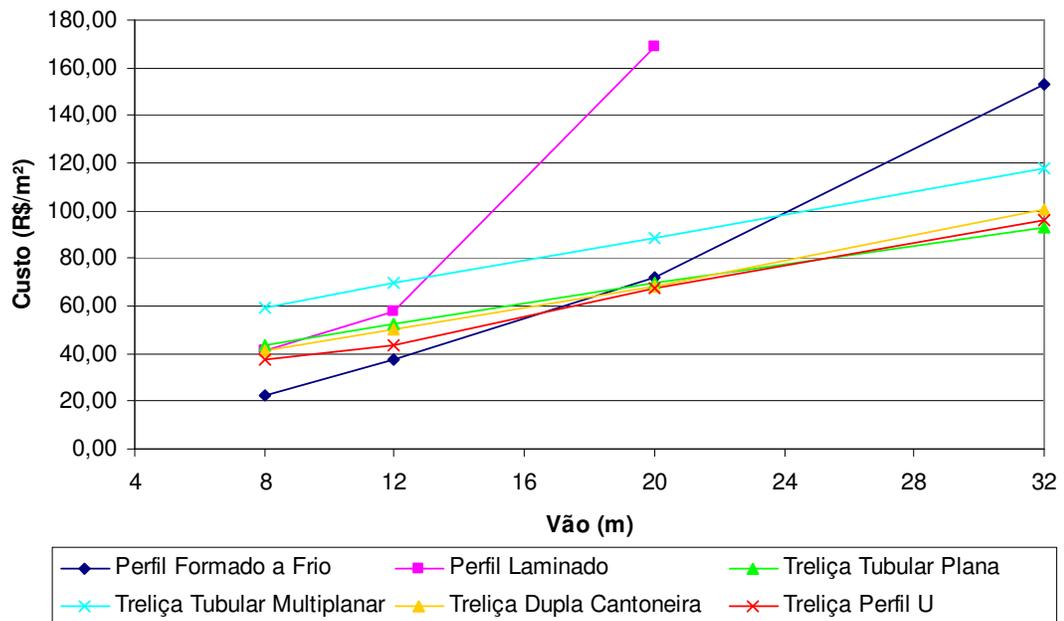


Figura 5.26 – Custo total

Já para os custos de fabricação, as terças em perfil laminado e formado a frio apresentam os menores valores, enquanto que a treliça tubular multiplanar possui um custo muito elevado, mesmo quando comparada com os demais modelos de treliças. Isso se deve a maior dificuldade na fabricação das treliças tubulares multiplanares, que apresentam ligações mais complexas de serem executadas, e em um número maior que nas treliças planas. Essa dificuldade, aliada ao maior tempo necessário para a confecção da treliça, provocam um aumento no seu custo de fabricação. Além disso, as ligações entre perfis tubulares são mais caras que as ligações entre perfis em dupla cantoneira ou U, como pode ser observado pelo maior custo de fabricação da treliça tubular plana quando comparada com as treliças em perfis abertos, mesmo nas situações de grandes vãos, nas quais a treliça tubular apresenta um peso menor.

Como o custo de montagem fornecido, por quilograma de aço, é o mesmo para todos os tipos de terça, correspondendo ao custo da mão de obra e dos equipamentos necessários para a fixação das terças na cobertura, os modelos mais leves apresentam os menores custos. Pode-se notar que para vãos inferiores a 12 metros os custos de montagem são muito próximos para todos os tipos de terças. Já para vãos maiores, as treliças apresentam custos menores, sendo que os quatro tipos analisados possuem valores parecidos.

A soma dos gráficos correspondentes aos três custos intermediários resultam no custo total das terças, apresentado na Figura 5.26. Um gráfico mais detalhado dos custos totais das terças foi apresentado na Figura 5.22.

A análise dos gráficos presentes nas Figuras 5.23 a 5.25 indicam que o comportamento das curvas das terças em perfil é muito semelhante para os três custos intermediários, sendo que os perfis formados a frio, que são mais leves, apresentam custos inferiores aos perfis laminados. Já com relação às treliças, o comportamento da curva de cada modelo é diferente dependendo do custo intermediário, e nem sempre a treliça mais leve apresenta o menor custo. Por esse motivo, existe uma diferença entre o comportamento das curvas das treliças na análise de peso e na análise de custo.

Também pode-se notar que os quatro modelos de treliças apresentam custos próximos com relação ao material e à montagem. Já no custo de fabricação, os valores da treliça tubular multiplanar é bem maior que das demais treliças, sendo este o principal responsável pelo elevado custo total desse modelo de treliça. Também pode-se notar que o custo de fabricação para os outros três modelos de treliças é maior do que o custo dos perfis, para vãos pequenos. Pode-se concluir, portanto, que esse custo intermediário é o principal responsável por elevar o custo total das treliças para vãos inferiores a 20 metros.

5.7 Investigação das Melhores Terças

Os resultados obtidos com este estudo permitem investigar quais são os melhores modelos de terças para cada vão analisado, definindo quais são os vãos limites para suas utilizações, para as cargas comumente aplicadas em galpões de uso geral. Para facilitar essa análise, a Tabela 5.24 foi elaborada, contendo as terças mais leves e de menor custo, encontradas pelas análises desenvolvidas neste trabalho.

| Vão (m) | Melhor Modelo de Terça | |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Com Relação ao Peso | Com Relação ao Custo |
| 4 | Perfil U Enrijecido Formado a Frio | Perfil U Enrijecido Formado a Frio |
| 8 | Perfil U Enrijecido Formado a Frio | Perfil U Enrijecido Formado a Frio |
| 12 | Treliça Tubular Plana | Perfil U Enrijecido Formado a Frio |
| 16 | Treliça em Perfil U Formado a Frio | Treliça em Perfil U Formado a Frio |
| 20 | Treliça Tubular Plana | Treliça em Perfil U Formado a Frio |
| 24 | Treliça Tubular Plana | Treliça em Perfil U Formado a Frio |
| 28 | Treliça Tubular Plana | Treliça em Perfil U Formado a Frio |
| 32 | Treliça Tubular Plana | Treliça Tubular Plana |
| 36 | Treliça Tubular Plana | Treliça Tubular Plana |
| 40 | Treliça Tubular Plana | Treliça Tubular Plana |

Tabela 5.24 – Melhores modelos de terças

Para vãos inferiores a 8 metros, a terça ideal é em perfil U enrijecido formado a frio, já que ela apresenta menor peso e custo. Pelos resultados apresentados anteriormente, foi possível notar que o perfil Z enrijecido formado a frio apresenta pesos e custos muito próximos aos do

perfil U enrijecido. Esses valores podem ser reduzidos realizando-se alguns ajustes nas dimensões do perfil. Além disso, os perfis Z simples e enrijecidos têm uma grande vantagem no seu armazenamento e transporte, já que eles podem ser encaixados uns sobre os outros, conforme a Figura 5.27, economizando espaço físico, e permitindo o transporte de uma quantidade muito maior de perfis dentro de um mesmo caminhão, quando comparados com os perfis U simples e enrijecidos. Por essas vantagens, muitas empresas optam por utilizar o perfil Z enrijecido em contrapartida ao perfil U enrijecido, mesmo que ele seja ligeiramente mais pesado ou mais caro, pois com a economia no armazenamento e no transporte o seu preço final acaba sendo mais vantajoso.

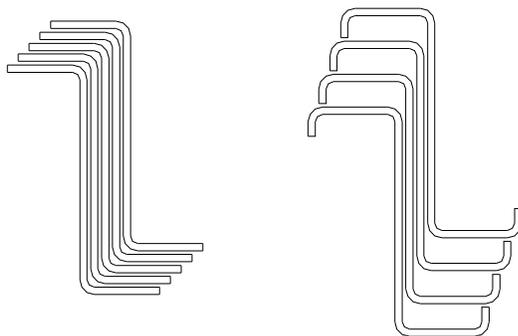


Figura 5.27 – Armazenamento e transporte dos perfis Z

O vão de 12 metros apresenta a treliça tubular plana como a solução mais leve, tendo um peso 25% menor que a terça em perfil U enrijecido formado a frio, que é a terça de menor custo, sendo 30% mais barata. Nesse caso, a escolha do melhor tipo de terça pode depender de outros fatores, como disponibilidade dos perfis para confecção das terças, tempo de fabricação das mesmas e preferência do fabricante e empresa executora da obra por um tipo de terça com a qual estejam mais familiarizados em trabalhar. Como esses fatores são muito variáveis, pode-se optar de um modo geral pela terça em perfil U enrijecido formado a frio, já que a diferença de custo é maior que a diferença de peso.

Outra alternativa para essa situação seria a utilização da treliça em perfil U formado a frio, que apresenta um peso muito próximo da treliça tubular plana, e um custo

consideravelmente menor. Na comparação da treliça em perfil U formado a frio com a terça em perfil U enrijecido formado a frio, a treliça apresenta um peso 24% menor, enquanto que o perfil possui um custo 16% inferior. Nesse caso, pode-se optar pela treliça, pois a diferença de peso é substancialmente maior que a diferença de custo. Além disso, terças mais leves resultam em uma economia no restante da estrutura e nas fundações, devido à redução da carga aplicada em toda a edificação.

Para vãos superiores a 16 metros, as terças treliçadas são mais leves e apresentam menores custos que as terças em perfil, sendo que para 16 metros recomenda-se a utilização da treliça em perfil U formado a frio, e em vãos superiores a 32 metros, a melhor alternativa a ser adotada é a treliça tubular plana. Nos vãos entre 20 e 28 metros, as treliças tubulares planas apresentam um peso de 11% a 15% menor que as treliças em perfil U formado a frio, que são de 2% a 7% mais baratas. Nesse caso, pode-se dar preferência para o modelo mais leve, já que a diferença no custo é muito baixa, e a escolha de terças de menor peso pode gerar economia no restante da estrutura.

Com relação as terças treliçadas tubulares multiplanares, pôde-se notar um bom desempenho com relação ao peso, principalmente para vãos superiores a 20 metros, sendo o segundo modelo de terça mais leve, não muito distante da treliça tubular plana. Porém, ao observar as comparações de custo, nota-se que essa é a treliça mais cara, apresentando um custo inferior que dos perfis formados a frio apenas para vãos acima de 28 metros, dificultando a sua aplicação.

O fator principal que contribui para o encarecimento das treliças tubulares multiplanares é o seu elevado custo de fabricação, como apresentado na Figura 5.24. Como trata-se de um modelo inovador de terça, os fabricantes não produzem esse tipo de treliça com frequência, enquanto que para os demais tipos de terças estudados, pelo fato de serem mais comuns, já existe uma padronização nos procedimentos de fabricação, tornando as treliças tubulares multiplanares mais caras que os demais modelos. Para tornar as treliças tubulares multiplanares mais atrativas economicamente, deve-se buscar o desenvolvimento de ligações mais baratas e simples de serem executas, além de pesquisar uma maneira de padronizar a sua fabricação, como uma linha de

produção especializada nesse tipo de produto, proporcionando ganho de tempo e redução no custo total da treliça. Essas melhorias na fabricação também podem beneficiar as treliças tubulares planas, em menores proporções, já que as suas ligações também são feitas entre perfis tubulares.

6. Considerações Finais

A utilização das estruturas metálicas no Brasil vem apresentando um crescimento nos últimos anos, impulsionado pela necessidade da execução de estruturas com grandes espaços internos e pequenas quantidades de pilares, em prazos cada vez menores. A elevada resistência mecânica do aço e a possibilidade de produzir peças pré-fabricadas permitem a sua utilização para grandes vãos, com pequenos prazos de execução. Assim, as estruturas metálicas são muito utilizadas nas coberturas de galpões industriais, comerciais e de uso geral, motivando o desenvolvimento deste estudo.

Dentre os elementos que compõem uma cobertura metálica, foram estudadas as terças, analisando-se os tipos mais utilizados, como perfis laminados e formados a frio, treliças planas compostas por perfis abertos e tubulares, e um modelo pouco aplicado no mercado nacional, as treliças tubulares multiplanares. Foram realizadas análises de peso e de custo, com o objetivo de investigar quais os melhores tipos de terça para vários vãos de até 40 metros, com as cargas normalmente aplicadas em galpões de uso geral, e verificar a viabilidade da utilização das terças treliçadas tubulares multiplanares.

Para a análise de peso das terças em perfil laminado e formado a frio foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Object Pascal, através do programa Delphi 2005, seguindo os procedimentos das normas NBR 8800/2008 [8] e NBR 14762/2001 [9], ambas em vigor. Também foram implementados os procedimentos da NBR 8800/1986 [7], antecessora a atual norma referente aos perfis laminados, possibilitando analisar a influência das alterações da norma nos esforços resistentes.

Para a análise de peso das terças treliçadas tubulares foi utilizado o programa AutoTruss 2.0, desenvolvido pela equipe do convênio de parceria entre a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp e a empresa V&M do Brasil S. A.. Já para as terças treliçadas em perfis abertos foi utilizado o programa de análise estrutural SAP2000 [63].

As comparações entre as normas NBR 8800/2008 [8] e NBR 8800/1986 [7] para perfis abertos demonstraram que as alterações provocam maiores alterações nos esforços resistentes de compressão, principalmente para perfis com valores de λ entre 0,5 e 1,5, onde as curvas de flambagem da NBR 8800/1986 [7] estão mais distantes da curva única da NBR 8800/2008 [8], chegando-se a esforços resistentes de compressão maiores com a utilização da norma vigente. Já para os momentos fletores resistentes, as mudanças da norma não provocam grandes alterações nos esforços resistentes. Em relação ao eixo de flexão x, as alterações são muito pequenas, sendo um pouco maiores na flexão em relação ao eixo y. Porém, essas modificações não influenciaram os resultados dos dimensionamentos das terças em perfis laminados. Para os perfis tubulares, as alterações da norma tiveram uma influência muito pequena nos esforços resistentes a compressão, já que a curva de flambagem dos perfis tubulares utilizada pela NBR 8800/1986 [7] é semelhante a curva única da NBR 8800/2008 [8].

As análises de peso demonstraram que, dentre as terças em perfil, as melhores alternativas são os perfis U e Z enrijecidos formados a frio. Já entre as terças treliçadas, para vãos inferiores a 16 metros, as melhores soluções são as treliças tubular plana e em perfil U formado a frio. Para vãos superiores, a treliça tubular plana é a melhor alternativa, seguida pela treliça tubular multiplanar. Na comparação geral de todos os tipos de terças, para vãos inferiores a 8 metros, as terças em perfil U e Z enrijecidos formados a frio são as que apresentam as menores taxas. A partir dos 12 metros, as treliças apresentam melhor desempenho, sendo que a treliça tubular multiplanar demonstrou ser uma boa alternativa com relação ao peso, ficando muito próxima a treliça tubular plana.

Já nas análises de custo, as terças em perfil apresentaram um desempenho muito semelhante ao encontrado nas análises de peso. Já nas terças treliçadas, os custos demonstraram ter uma grande influência na escolha da melhor solução. Como foram analisados três custos

intermediários, foi possível notar que os maiores custos das treliças são referentes à fabricação das mesmas, principalmente para as treliças tubulares multiplanares. Com isso, na análise de custo, as terças treliçadas levam desvantagem para vãos inferiores a 16 metros, superando os perfis nos demais vãos. Entre os vãos de 16 e 28 metros, a treliça plana em perfil U formado a frio apresentou os menores custos, e para vãos superiores a treliça mais econômica é a tubular plana.

Para a definição de qual o melhor tipo de terça a ser utilizado, deve-se levar em consideração tanto o peso quanto o custo das terças. Fazendo-se a análise comparativa de ambos, pôde-se notar que para vãos inferiores a 8 metros, recomenda-se utilizar a terça em perfil U ou Z enrijecido formado a frio. Para vãos superiores a 16 metros, recomenda-se a utilização das terças treliçadas, sendo que acima de 32 metros, a melhor solução é a treliça tubular plana. Para os vãos onde a melhor solução com relação ao peso é diferente da melhor solução com relação ao custo, deve-se observar outros fatores, como disponibilidade dos materiais e tempo de execução de cada tipo de terça. Recomenda-se dar preferência para as soluções mais leves, pois resultam em diminuição da carga aplicada no restante da estrutura, economizando nos perfis utilizados nas vigas e colunas e também nas fundações.

O estudo desenvolvido demonstrou que as terças treliçadas tubulares multiplanares apresentam um bom potencial para utilização como terças, com relação ao seu peso, já que para vãos superiores a 20 metros ela é o segundo tipo de terça mais leve, com valores ligeiramente superiores aos da treliça tubular plana. Porém, a análise de custo demonstrou que a sua fabricação é ainda cara, devido a grande quantidade e a complexidade de suas ligações. Outro fator que eleva o seu custo é o fato de ser uma treliça pouco comum de ser fabricada, aumentando o seu tempo de planejamento e produção.

Como propostas de trabalhos e estudos futuros visando à diminuição do custo de fabricação das treliças tubulares multiplanares, estão o desenvolvimento de ligações mais simples e fáceis de serem executadas, e a padronização no sistema de fabricação dessas treliças. Dessa maneira tem-se um ganho de tempo e conseqüente redução no custo total da treliça, tornando-a uma solução mais viável economicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – Load & Resistance Factor Design. Vol. 1&2. 2.ed. AISC, 1994.
- [2] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. AISI Standard. AISI S100-2007.
- [3] ANDRADE, S. A. L.; VELLASCO, P. C. G. da S.; SILVA, J. G. S. da; LIMA, L. R. O. de; D’ESTE, A. V. – Tubular Space Trusses with Simple and Reinforced End-Flattened Nodes – An Overview and Experiments. *Journal of Constructional Steel Research*. 2005, 61: 1025-1050.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 6355 – Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio – Padronização. Rio de Janeiro, 2003.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios. Rio de Janeiro, 1986.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 14762 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro, 2001.
- [10] BASAGLIA, C.; CAMOTIM, D.; SILVESTRE, N. – Global Buckling Analysis of Plane and Space Thin-Walled Frames in the Context of GBT. *Thin-Walled Structures*. 2008, 46: 79-101.
- [11] BELLEI, I. H. – Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo. São Paulo, 1994.
- [12] CAO, J. J.; PACKER, J. A.; NOSTESKI, N. – Determination of Connection Strength Between Longitudinal Plates and RHS Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998, 46: 243-244. Paper Number 134.
- [13] CARVALHO, P. R. M. de; GRIGOLETTI, G.; TAMAGNA, A.; ITURRIOZ, I. – Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio. Porto Alegre, 2006.
- [14] CHAN, T. M.; GARDNER, L. – Compressive Resistance of Hot-Rolled Elliptical Hollow Sections. *Engineering Structures*. 2008, 30: 522-532.
- [15] CHOI, S. K.; BURGESS, I.; PLANK, R. – Performance in Fire of Long-Span Composite Truss Systems. *Engineering Structures*. 2008, 30: 683-694.
- [16] CIDECT – Construction With Hollow Steel Sections. Vol. 1-9. Alemanha, 1992.
- [17] DAVIES, J. M. – Recent Research Advances in Cold-Formed Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2000, 55: 267-288.
- [18] DAVIES, J. M.; LEACH, P. – First-Order Generalised Beam Theory. *Journal of Constructional Steel Research*. 1994, 31: 187-220.
- [19] DUBINA, D. – Structural Analysis and Design Assisted by Testing of Cold-Formed Steel Structures. *Thin-Walled Structures*. 2008, 46: 741-764.
- [20] EEKHOUT, M. – Tubular Structures in Architecture. Alemanha, 1996.

- [21] EUROCODE 3 – Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. EN 1993-1-1:2005.
- [22] EUROCODE 3 – Design of Steel Structures. Part 1-3: General Rules – Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting. EN 1993-1-3:2004.
- [23] EUROCODE 3 – Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints. EN 1993-1-8:2005.
- [24] FAZ FÁCIL. Disponível em: <<http://www.fazfacil.com.br>>.
- [25] GEORGESCU, M.; UNGUREANU, V. – Experimental Procedure, Modeling the Distortional Behaviour of Z Purlins in Sandwich Panel Roofs. 5th EUROSTEEL, 3-5 September 2008, Graz, Áustria, p. 81-86.
- [26] GONÇALVES, R. M.; JAVARONI, C. E.; MALITE, M.; SÁLES, J. J. – Analysis and Study of the Behaviour of Purlins in Cold-Formed U and Z-type Shapes: The Effect of Elastic Restriction due to Roof Tiles. Journal of Constructional Steel Research. 1998, 46: 465-466. Paper Number 99.
- [27] HAN, L-H; YANG, Y-F; XU, L. – An Experimental Study and Calculation on the Fire Resistance of Concrete-Filled SHS and RHS Columns. Journal of Constructional Steel Research. 2003, 59: 427-452.
- [28] HAN, L-H; YAO, G-H – Behaviour of Concrete-Filled Hollow Structural Steel (HSS) Columns With Pre-Load on the Steel Tubes. Journal of Constructional Steel Research. 2003, 59: 1455-1475.
- [29] HANCOCK, G. J. – Cold-Formed Steel Structures. Journal of Constructional Steel Research. 2003, 59: 473-487.
- [30] HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. – Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification. Nova Iorque, 2001.
- [31] HANCOCK, G. J.; RASMUSSEN, K. J. R. – Recent Research on Thin-Walled Beam-Columns. Thin-Walled Structures. 1998, 32: 3-18.

- [32] HO, H. C.; CHUNG, K. F. – Structural Behavior of Lapped Cold-Formed Steel Z Sections with Generic Bolted Configurations. *Thin-Walled Structures*. 2006, 44: 466-480.
- [33] INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA/CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO – Galpões Para Usos Gerais. 7.ed. IBS/CBCA, Rio de Janeiro, 2004.
- [34] INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA/CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO – Treliças Tipo Steel Joist. IBS/CBCA, Rio de Janeiro, 2007.
- [35] KIM, U.; LEON, R. T.; GALAMBOS, T. V. – 3-D Nonlinear Dynamic Behavior of Steel Joist Girder Structures. *Engineering Structures*. 2009, 31: 268-274.
- [36] KINDMANN, R.; KRAUS, M.; VETTE, J. – On the Verification of Hollow Section Joint Resistances. 5th EUROSTEEL, 3-5 September 2008, Graz, Áustria, p. 525-530.
- [37] KINDMANN, R.; WOLF, C.; KRAUS, M. – Idealisation of Hot-Rolled Sections for Verification and Calculation Methods. 5th EUROSTEEL, 3-5 September 2008, Graz, Áustria, p. 1819-1824.
- [38] KODUR, V. K. R.; MACKINNON, D. H. – Simplified Design of Concrete-Filled Hollow Structural Steel Columns for Fire Endurance. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998, 46: 298. Paper Number 171.
- [39] KOSTESKI, N.; PACKER, J. A.; PUTHLI, R. S. – A Finite Element Method Based Yield Load Determination Procedure for Hollow Structural Section Connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003, 59: 453-471.
- [40] LABOUBE, R. A.; YU, W-W – Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Framing. *Thin-Walled Structures*. 1998, 32: 19-39.
- [41] LING, T. W.; ZHAO, X. L.; AL-MAHAIDI, R.; PACKER, J. A. – Investigation of Shear Lag Failure in Gusset-Plate Welded Structural Steel Hollow Section Connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007, 63: 293-304.

- [42] MACDONALD, M.; HEIYANTUDUWA, M. A.; RHODES, J. – Recent Developments in the Design of Cold-Formed Steel Members and Structures. *Thin-Walled Structures*. 2008, 46: 1047-1053.
- [43] MACHACEK, J.; CUDEJKO, M. – Longitudinal Shear in Composite Steel and Concrete Trusses. *Engineering Structures*. 2009, 31: 1313-1320.
- [44] MAIOLA, C. H.; MALITE, M. – Análise Teórica e Experimental de Treliças Metálicas Espaciais Constituídas por Barras com Extremidades Estampadas. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos. 2002, 20: 105-125.
- [45] MALITE, M.; SÁLES, J. J. de – Estruturas de Aço Constituídas por Perfis de Chapa Dobrada: Dimensionamento de Barras. Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.
- [46] METÁLICA. Disponível em: <<http://www.metlica.com.br>>.
- [47] METFORM – Perfis Z & U Enrijecidos: Terças para Cobertura, Travessas de Fechamento Lateral. 2001.
- [48] MINCHILLO, D. G. – Estudo do Comportamento de Ligações de Placa de Base para Estruturas Metálicas Tubulares – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. UNICAMP. Campinas, 2003.
- [49] MISTAKIDIS, E. S.; TSIOGAS, S. V. – Failure Modes of Circular Hollow Members with Flattened Edges. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003, 59: 1573-1592.
- [50] NAGUIB, W.; MIRMIRAN, A. – Creep Modeling for Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003, 59: 1327-1344.
- [51] PACKER, J. A.; HENDERSON, J. E. – *Hollow Structural Section Connections and Trusses: A Design Guide*. 2.ed. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, 1997.
- [52] PALA, M. – Genetic Programming-Based Formulation for Distortional Buckling Stress of Cold-Formed Steel Members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008, 64: 1495-1504.

- [53] PAPANGELIS, J. P.; HANCOCK, G. J. – Computer Analysis of Thin-Walled Structural Members. *Computers & Structures*. 1995, 56: 157-176.
- [54] PFEIL, W. – Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático. 7.ed. Rio de Janeiro, 2000.
- [55] PUGLIESI, M.; LAUAND, C. A.; SOARES, J. B. – Estruturas Metálicas. São Paulo, 1978.
- [56] RAUTARUUKKI OYJ, H. V. – Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections. Hämeenlinna, Finlândia, 1998.
- [57] RENDEK, S.; BALÁZ, I. – Distortion of Thin-Walled Beams. *Thin-Walled Structures*. 2004, 42: 255-277.
- [58] RICHARD LIEW, J. Y.; XIONG, D. X. – Effect of Preload on the Axial Capacity of Concrete-Filled Composite Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, 65: 709-722.
- [59] RUSCH, A.; LINDNER, J. – Remarks to the Direct Strength Method. *Thin-Walled Structures*. 2001, 39: 807-820.
- [60] SALMON, C. G.; JOHNSON, J.E. – Steel Structures: Design and Behavior. 4.ed. Nova Iorque, Harper & Row, 1996.
- [61] SAMARRA, F. A. – Estudo Numérico-Experimental de Treliças Tubulares Planas para Coberturas Padronizadas para Grandes Vãos – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. UNICAMP. Campinas, 2007.
- [62] SANTOS, A. F. dos – Estruturas Metálicas: Projetos e Detalhes para Fabricação. 3.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1977.
- [63] SAP2000 – Structural Analysis Program. Versão 11.0.8. Computers and Structures Inc. Informações: www.csiberkeley.com.

- [64] SCHAFER, B. W. – Review: The Direct Strength Method of Cold-Formed Steel Member Design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008, 64: 766-778.
- [65] SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. – Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. *Proceedings of the Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 1998, p.69-76.
- [66] SCHARDT, R. – Lateral Torsional and Distortional Buckling of Channel- and Hat-Sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 1994, 31: 243-265.
- [67] SCHULTE, H.; YAGUI, T. – *Estruturas de Aço: Elementos Básicos*. Escola de Engenharia de São Carlos, 1977.
- [68] SEEK, M. W.; MURRAY, T. M. – Lateral Restraint Forces in Z-section Roof Systems Using the Component Stiffness Method. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008, 64: 1366-1378.
- [69] SOPHIANOPOULOS, D. S.; MICHALTSOS, G. T. – Lateral Buckling of Steel I-Section Beams: Simultaneous Axial Compression and Follower Distributed Loading. 5th EUROSTEEL, 3-5 September 2008, Graz, Áustria, p. 1581-1586.
- [70] STEEL JOIST INSTITUTE – *Open Web, Longspan, and Deep Longspan Steel Joists, and Joist Girders*. Steel Joist Institute Standard. Estados Unidos da América, 2002.
- [71] SZALAI, J.; PAPP, F. – A New Residual Stress Distribution for Hot-Rolled I-Shaped Sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2005, 61: 845-861.
- [72] V&M DO BRASIL – *Informações Técnicas: Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular*. Belo Horizonte, 2000.
- [73] VON KARMAN, T.; SECHLER, E.E., DONNELL, L.H. – The Strength of Thin Plates in Compression, *Transactions ASME*, Vol. 54, MP 54-5, 1932.
- [74] VRANÝ, T. – Effect of Loading on the Rotational Restraint of Cold-Formed Purlins. *Thin-Walled Structures*. 2006, 44: 1287-1292.

- [75] WANG, H.; ZHANG, Y. – Experimental and Numerical Investigation on Cold-Formed Steel C-Section Flexural Members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, 65: 1225-1235.
- [76] WARDENIER, J. – *Hollow Sections in Structural Applications*. Holanda, 2001.
- [77] WINTER, G. – *Thin-Walled Structures – Theoretical Solutions and Test Results*, Preliminary Publications of The Eighth Congress, IABSE, 1968, p. 101-112.
- [78] WOGHIREN, C. O.; BRENNAN, F. P. – Weld Toe Stress Concentrations in Multi-Planar Stiffened Tubular KK Joints. *International Journal of Fatigue*. 2009, 31: 164-172.
- [79] XU, C.; HAIXIAO, L.; CHENGKUI, H. – Experimental Study on Shear Resistance of Self-Stressing Concrete Filled Circular Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, 65: 801-807.
- [80] YANG, H.; HAN, L. H.; WANG, Y. C. – Effects of Heating and Loading Histories on Post-Fire Cooling Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008, 64: 556-570.
- [81] YU, W-W – *Cold-Formed Steel Design*. 3.ed. Nova Iorque, 2000.
- [82] ZHANG, C.; LIAO, B.; CAI, D.; ZHAO, T.; FAN, Y. – Development of Hot-Rolled Dual-Phase Weathering Steel Cu-P-Cr-Ni-Mo. *Materials & Design*. 2007, 28: 1760-1766.
- [83] ZHANG, L.; TONG, G. – Moment Resistance and Flexural Rigidity of Lapped Connections in Multi-Span Cold-Formed Z Purlin Systems. *Thin-Walled Structures*. 2008, 46: 551-560.
- [84] ZHAO, R.; HUANG, R.; KHOO, H. A.; CHENG, J. J. R. – Parametric Finite Element Study on Slotted Rectangular and Square HSS Tension Connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, 65: 611-621.

ANEXOS

ANEXO A – TABELAS DAS ANÁLISES REALIZADAS COM O AUTOTRUSS

Como o programa AutoTruss 2.0 só permite a análise de treliças com vãos superiores a 12 metros, as treliças tubulares de vãos inferiores foram obtidas com a utilização do programa de análise estrutural SAP2000 [63], respeitando os mesmos limites de altura e ângulos de inclinação das diagonais adotados em todo o estudo. Assim, não só foi possível elaborar tabelas para vãos inferiores a 12 metros.

A.1. Terças Treliçadas Planas

| Treliza Plana com vão de 12 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,00 | 53,1 | 8 | 1,500 | 4,74 |
| 0,85 | 48,6 | 8 | 1,500 | 4,82 |
| 0,95 | 57,7 | 10 | 1,200 | 4,83 |
| 0,70 | 49,4 | 10 | 1,200 | 4,84 |
| 1,10 | 47,7 | 6 | 2,000 | 4,86 |
| 0,85 | 59,5 | 12 | 1,000 | 4,90 |
| 0,55 | 36,3 | 8 | 1,500 | 5,02 |

| Treliza Plana com vao de 16 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,10 | 58,8 | 12 | 1,333 | 5,35 |
| 1,05 | 52,7 | 10 | 1,600 | 5,38 |
| 0,85 | 51,9 | 12 | 1,333 | 5,43 |
| 1,00 | 51,3 | 10 | 1,600 | 5,45 |
| 0,95 | 49,9 | 10 | 1,600 | 5,51 |
| 1,25 | 51,3 | 8 | 2,000 | 5,77 |

| Treliza Plana com vao de 20 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,30 | 61,2 | 14 | 1,429 | 6,04 |
| 1,20 | 59,2 | 14 | 1,429 | 6,09 |
| 1,35 | 58,3 | 12 | 1,667 | 6,16 |
| 1,00 | 50,2 | 12 | 1,667 | 6,17 |
| 1,20 | 50,2 | 10 | 2,000 | 6,42 |
| 1,10 | 47,7 | 10 | 2,000 | 6,49 |

| Treliza Plana com vao de 24 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,25 | 59,0 | 16 | 1,500 | 6,66 |
| 1,40 | 58,5 | 14 | 1,714 | 6,92 |
| 1,20 | 50,2 | 12 | 2,000 | 7,12 |
| 1,15 | 49,0 | 12 | 2,000 | 7,25 |
| 1,50 | 51,3 | 10 | 2,400 | 7,26 |
| 1,10 | 47,7 | 12 | 2,000 | 7,32 |

| Treliza Plana com vao de 28 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,35 | 61,1 | 18 | 1,556 | 7,53 |
| 1,45 | 58,9 | 16 | 1,750 | 7,55 |
| 1,40 | 58,0 | 16 | 1,750 | 7,61 |
| 1,65 | 58,8 | 14 | 2,000 | 7,79 |
| 1,50 | 52,1 | 12 | 2,333 | 8,04 |

| Treliza Plana com vao de 32 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,45 | 58,5 | 18 | 1,778 | 8,45 |
| 1,65 | 58,8 | 16 | 2,000 | 8,58 |
| 1,60 | 58,0 | 16 | 2,000 | 8,65 |
| 1,90 | 59,0 | 14 | 2,286 | 8,90 |
| 1,40 | 50,8 | 14 | 2,286 | 8,96 |

| Treliza Plana com vão de 36 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,70 | 59,5 | 18 | 2,000 | 9,35 |
| 1,65 | 58,8 | 18 | 2,000 | 9,35 |
| 1,85 | 58,7 | 16 | 2,250 | 9,38 |
| 1,85 | 66,1 | 22 | 1,636 | 9,44 |

| Treliza Plana com vão de 40 metros | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,95 | 65,0 | 22 | 1,818 | 10,30 |
| 1,90 | 66,3 | 24 | 1,667 | 10,33 |
| 2,15 | 65,1 | 20 | 2,000 | 10,34 |
| 2,40 | 65,2 | 18 | 2,222 | 10,60 |

A.2. Terças Trelizadas Multiplanares

| Treliza Multiplanar com vão de 12 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,30 | 52,4 | 6 | 2,000 | 5,34 |
| 1,00 | 53,1 | 8 | 1,500 | 5,48 |
| 1,15 | 49,0 | 6 | 2,000 | 5,50 |
| 0,90 | 50,2 | 8 | 1,500 | 5,52 |
| 1,10 | 47,7 | 6 | 2,000 | 5,52 |

| Treliza Multiplanar com vão de 16 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,00 | 49,9 | 10 | 1,600 | 6,34 |
| 0,95 | 51,3 | 10 | 1,600 | 6,34 |
| 1,35 | 53,5 | 8 | 2,000 | 6,34 |
| 1,10 | 47,7 | 8 | 2,000 | 6,35 |

| Treliza Multiplanar com vão de 20 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,35 | 58,3 | 12 | 1,667 | 6,81 |
| 1,55 | 57,2 | 10 | 2,000 | 6,90 |
| 1,25 | 51,3 | 10 | 2,000 | 6,95 |
| 1,10 | 47,7 | 10 | 2,000 | 7,04 |

| Treliza Multiplanar com vão de 24 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,40 | 58,5 | 14 | 1,714 | 7,68 |
| 1,60 | 58,0 | 12 | 2,000 | 7,69 |
| 1,30 | 52,4 | 12 | 2,000 | 7,74 |
| 1,60 | 53,1 | 10 | 2,400 | 7,89 |

| Treliza Multiplanar com vão de 28 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,65 | 58,8 | 14 | 2,000 | 8,35 |
| 1,45 | 58,9 | 16 | 1,750 | 8,40 |
| 1,95 | 59,1 | 12 | 2,333 | 8,47 |
| 1,30 | 48,1 | 12 | 2,333 | 8,69 |

| Treliza Multiplanar com vão de 32 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,65 | 58,8 | 16 | 2,000 | 9,28 |
| 1,85 | 64,3 | 18 | 1,778 | 9,35 |
| 1,90 | 59,0 | 14 | 2,286 | 9,36 |
| 1,60 | 58,0 | 16 | 2,000 | 9,36 |

| Treliza Multiplanar com vão de 36 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 1,75 | 60,3 | 18 | 2,000 | 10,24 |
| 1,95 | 60,0 | 16 | 2,250 | 10,28 |
| 2,35 | 61,3 | 14 | 2,571 | 10,52 |

| Treliza Multiplanar com vão de 40 metros | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Altura (m) | Ângulo (°) | Número de módulos | Comprimento das barras dos banzos (m) | Taxa total (kg/m ²) |
| 2,30 | 66,5 | 20 | 2,000 | 11,28 |
| 2,50 | 66,0 | 18 | 2,222 | 11,34 |
| 2,20 | 65,6 | 20 | 2,000 | 11,40 |
| 2,15 | 65,1 | 20 | 2,000 | 11,77 |

ANEXO B – PROCEDIMENTOS DE NORMA

B.1. Determinação dos Esforços Resistentes dos Perfis Laminados

A verificação a tração de um perfil laminado segundo a NBR 8800/2008 [8], é feito da seguinte maneira:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (B.1)$$

Onde:

- Para o estado limite de escoamento da seção bruta ($\gamma_{a1} = 1,10$):

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

- Para o estado limite de ruptura da seção líquida efetiva ($\gamma_{a2} = 1,35$):

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

$N_{t,Sd}$ = força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ = força axial de tração resistente de cálculo;

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

A_e = área líquida efetiva da seção transversal da barra, determinada conforme o item

5.2.3 da NBR 8800/2008 [8];

f_y = resistência ao escoamento do aço;

f_u = resistência a ruptura do aço.

O índice de esbeltez $\frac{L}{r}$ das barras tracionadas não deve superar o limite de 300.

Para o dimensionamento de barras comprimidas, tem-se:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (\text{B.4})$$

Onde:

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

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo;

$$\gamma_{a1} = 1,10;$$

Q = fator de redução total associado à flambagem local, determinado conforme o anexo F da NBR 8800/2008 [8];

χ = fator de redução associado à resistência à compressão:

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

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

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

N_e = força axial de flambagem elástica, dada por:

- Para perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto:

N_e é o valor que resultar no menor χ , dentre os apresentados abaixo:

- para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{B.9})$$

- para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{B.10})$$

- para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (\text{B.11})$$

- Para perfis monossimétricos:

Sendo o eixo y o de simetria, N_e é o valor que resultar no menor χ , dentre os apresentados abaixo:

- para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x: igual a equação

B.9.

- para flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 \left[1 - (y_0/r_0)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{ey} N_{ez} \left[1 - (y_0/r_0)^2 \right]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{B.12})$$

- Para perfis assimétricos:

N_e é o valor que resultar no menor χ , dentre as raízes da seguinte equação cúbica:

$$(N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2 (N_e - N_{ey}) \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 - N_e^2 (N_e - N_{ex}) \left(\frac{y_0}{r_0} \right)^2 = 0 \quad (\text{B.13})$$

C_w = constante de empenamento da seção transversal;

E = módulo de elasticidade do aço;

G = módulo de elasticidade transversal do aço;

J = constante de torção da seção transversal;

$K_x L_x$ = comprimento flambagem por flexão em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ = comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y;

$K_t L_t$ = comprimento de flambagem por torção;

I_x, I_y = momento de inércia da seção transversal em relação aos eixos x e y respectivamente;

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

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (\text{B.14})$$

r_x, r_y = raios de giração em relação aos eixos centrais x e y, respectivamente;

x_0, y_0 = coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

Os valores de χ também podem ser obtidos pelo gráfico da curva de flambagem apresentado na figura 11 da NBR 8800/2008 [8], ou pela tabela 4 da mesma norma.

A limitação para o índice de esbeltez $\frac{K L}{r}$ das barras comprimidas é de 200.

K = coeficiente de flambagem determinado conforme o anexo E da NBR 8800/2008 [8].

O dimensionamento dos perfis submetidos a flexão simples deve seguir os seguintes procedimentos:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (\text{B.15})$$

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo, determinado conforme os anexos G ou H da NBR 8800/2008 [8], considerando-se, conforme o caso, os estados limites últimos de flambagem lateral com torção, flambagem local de mesa comprimida e flambagem local de alma. Não pode ser tomado maior que $(1,50 W f_y) / y_{al}$;

W = módulo resistente elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão.

A determinação da resistência à força cortante é dada por:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (B.16)$$

V_{Sd} = força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} = força cortante resistente de cálculo, dada por:

- para seções I, H e U fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma (com $\gamma_{a1} = 1,10$):

$$\text{- para } \lambda \leq \lambda_p: \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (B.17)$$

$$\text{- para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r: \quad V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (B.18)$$

$$\text{- para } \lambda > \lambda_r: \quad V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (B.19)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (B.20)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (B.21)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (B.22)$$

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (B.23)$$

$$A_w = d t_w \quad (B.24)$$

$$k_v = 5,0 \text{ para almas sem enrijecedores transversais, para } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} > \left(\frac{260}{h/t_w} \right)^2 ;$$

$$\text{Para todos os outros casos: } k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (B.25)$$

a = distância entre enrijecedores transversais;

h = altura da alma;

t_w = espessura da alma;

d = altura total da seção transversal.

- para seções tubulares circulares:

$$V_{Rd} = \frac{0,5 \tau_{cr} A_g}{y_{a1}} \quad (B.26)$$

τ_{cr} = menor dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,60 E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left(\frac{D}{t_d} \right)^{5/4}}} \leq 0,60 f_y \quad (B.27)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78 E}{\left(\frac{D}{t_d} \right)^{3/2}} \leq 0,60 f_y \quad (B.28)$$

D = diâmetro externo da seção transversal;

t_d = tomada igual a 0,93 vezes a espessura nominal para tubos com costura, e tomada igual à espessura nominal para tubos sem costura;

L_v = distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula.

A verificação de barras submetidas à esforços combinados deve obedecer as limitações das seguintes inequações:

- para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (B.29)$$

- para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (B.30)$$

Onde:

N_{Sd} = força axial solicitante de cálculo, de tração ou de compressão;

N_{Rd} = força axial resistente de cálculo, de tração ou de compressão;

$M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$ = momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y;

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$ = momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y;

Os deslocamentos máximos permitidos para terças de cobertura são de:

- L/180 para combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente;

- L/120 para as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.

B.2. Determinação dos Esforços Resistentes dos Perfis Formados a Frio

A verificação de barras submetidas à tração é feita da seguinte maneira, segundo a NBR 14762/2001 [9]:

$$N_{Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (B.31)$$

Onde:

- Para o estado limite de escoamento da seção bruta ($\gamma = 1,1$):

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma} \quad (B.32)$$

- Para o estado limite de ruptura da seção líquida efetiva ($\gamma = 1,35$):

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\gamma} \quad (B.33)$$

N_{Sd} = força normal de cálculo;

$N_{t,Rd}$ = força normal de tração resistente de cálculo;

A_g = área bruta da seção;

A_n = área líquida = A_g – área dos furos, conforme item 7.6.1 da NBR 14762/2001 [9];

C_t = coeficiente de redução da área líquida, conforme item 7.6.1 da NBR 14762/2001 [9];

f_y = limite de escoamento do aço;

f_u = limite de resistência à tração do aço.

O índice de esbeltez $\frac{K L}{r}$ das barras tracionadas não deve exceder o valor de 300.

Para barras submetidas à compressão centrada, a verificação deve ser feita conforme explicado abaixo:

$$N_{Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (B.34)$$

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor encontrado para a flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção, e para a flambagem por distorção da seção transversal.

A normal de compressão resistente de cálculo para a flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\rho A_{ef} f_y}{\gamma} \quad (B.35)$$

Onde:

$$\gamma = 1,1 ;$$

ρ = fator de redução associado a flambagem, apresentado na tabela 8 da NBR 14762/2001 [9], ou calculado por:

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_0^2)^{0,5}} \leq 1,0 \quad (B.36)$$

$$\beta = 0,5 \left[1 + \alpha (\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2 \right] \quad (B.37)$$

α = fator de imperfeição inicial. Para a flambagem por flexão, os valores de α variam conforme o tipo de seção, de acordo com a tabela 7 da NBR 14762/2001 [9], sendo:

- para curva “a”: $\alpha = 0,21$;
- para curva “b”: $\alpha = 0,34$;
- para curva “c”: $\alpha = 0,49$;

Para os casos de flambagem por torção ou por flexo-torção, utiliza-se sempre a curva “b” para qualquer tipo de perfil. As curvas de flambagem para os perfis utilizados neste estudo podem ser determinadas pela Tabela B.1;

$$\lambda_0 = \left[\frac{A_{ef} f_y}{N_e} \right]^{0,5} \quad (B.38)$$

A_{ef} = área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando uma tensão $\sigma = \rho f_y$. A NBR 14762/2001 [9] permite determinar λ_0 de forma aproximada, adotando $A_{ef} = A_g$, porém, para encontrar um valor não aproximado é necessária a utilização de um processo iterativo;

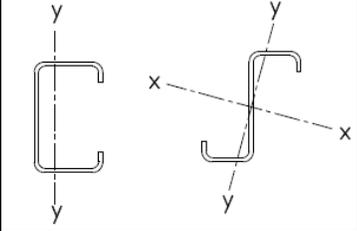
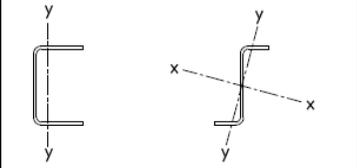
| Tipo de seção transversal | Eixos | Curvas |
|---|-----------|--------|
|  | Indicados | b |
|  | Indicados | c |

Tabela B.1 – Determinação das curvas de flambagem para seções U e Z de perfil formado a frio.
Adaptado de NBR 14762/2001 [9]

N_e = força normal de flambagem elástica da barra, definida conforme a seguir:

- Para perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto:

N_e é o valor que resultar no menor ρ , dentre os apresentados abaixo:

- força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (B.39)$$

- força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (B.40)$$

- força normal de flambagem elástica por torção:

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} + G I_t \right] \quad (B.41)$$

- Para perfis monossimétricos:

Sendo o eixo x o de simetria, N_e é o valor que resultar no menor ρ , dentre os apresentados abaixo:

- força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y: igual a equação

B.40.

- força normal de flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \left[1 - (x_0/r_0)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{ex} N_{et} \left[1 - (x_0/r_0)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] \quad (B.42)$$

- Para perfis assimétricos:

N_e é o valor que resultar no menor ρ , dentre as raízes da seguinte equação cúbica:

$$r_0^2 (N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{et}) - N_e^2 (N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2 (N_e - N_{ex})y_0^2 = 0 \quad (B.43)$$

C_w = constante de empenamento da seção;

E = módulo de elasticidade;

G = módulo de elasticidade transversal;

I_t = momento de inércia a torção uniforme;

$K_x L_x$ = comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ = comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y;

$K_t L_t$ = comprimento efetivo de flambagem por torção;

r_0 = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = \left[r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2 \right]^{0,5} \quad (\text{B.44})$$

r_x, r_y = raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente;

x_0, y_0 = coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

A normal de compressão resistente de cálculo para a flambagem por distorção da seção transversal é dada por:

- para $\lambda_{\text{dist}} < 1,414$:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g f_y (1 - 0,25 \lambda_{\text{dist}}^2)}{\gamma} \quad (\text{B.45})$$

- para $1,414 \leq \lambda_{\text{dist}} \leq 3,6$:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g f_y \{0,055 [\lambda_{\text{dist}} - 3,6]^2 + 0,237\}}{\gamma} \quad (\text{B.46})$$

Onde:

$$\gamma = 1,1 ;$$

λ_{dist} = índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado por:

$$\lambda_{\text{dist}} = \left(\frac{f_y}{\sigma_{\text{dist}}} \right)^{0,5} \quad (\text{B.47})$$

σ_{dist} = tensão convencional de flambagem elástica por distorção, que pode ser determinada de acordo com o anexo D da NBR 14762/2001 [9].

A NBR 14762/2001 [9] limita o índice de esbeltez $\frac{K L}{r}$ das barras comprimidas em 200.

A verificação de barras submetidas a flexão simples deve ser feita conforme apresentado a seguir:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (B.48)$$

Onde:

M_{Sd} = momento fletor de cálculo;

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo que deve ser tomado como o menor valor dentre os calculados para o início do escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção e flambagem por distorção da seção transversal:

- Início do escoamento da seção efetiva:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad (B.49)$$

Onde:

$\gamma = 1,1$;

W_{ef} = módulo de resistência elástico da seção efetiva, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, com a tensão σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção efetiva.

- Flambagem lateral com torção:

$$M_{Rd} = \frac{\rho_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad (B.50)$$

Onde:

$\gamma = 1,1$;

$W_{c,ef}$ = módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, com a tensão $\sigma = \rho_{FLT} f_y$;

ρ_{FLT} = fator de redução associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

- para $\lambda_0 \leq 0,6$:

$$\rho_{FLT} = 1,0$$

- para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$:

$$\rho_{FLT} = 1,11 \left(1 - 0,278 \lambda_0^2 \right) \quad (B.51)$$

- para $\lambda_0 \geq 1,336$:

$$\rho_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad (B.52)$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (B.53)$$

W_c = módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;

M_e = momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, que pode ser calculado pelas seguintes expressões:

- barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas a flexão em torno do eixo de simetria (eixo x):

$$M_e = C_b r_0 \left(N_{ey} N_{et} \right)^{0,5} \quad (B.54)$$

- barras com seção Z ponto-simétrica, com carregamento no plano da alma:

$$M_e = 0,5 C_b r_0 \left(N_{ey} N_{et} \right)^{0,5} \quad (B.55)$$

- barras com seção fechada, sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$M_e = C_b \left(N_{ey} G I_t \right)^{0,5} \quad (B.56)$$

N_{ey} , N_{et} são calculados conforme apresentado anteriormente, considerando $K_y L_y = L_y$ e $K_t L_t = L_t$;

C_b = coeficiente de equivalência de momento na flexão, que a favor da segurança pode ser tomado igual a 1,0, ou calculado da seguinte maneira:

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (\text{B.57})$$

M_{\max} = máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado;

M_A = valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no primeiro quarto do trecho analisado;

M_B = valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado;

M_C = valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no terceiro quarto do trecho analisado;

- Flambagem por distorção da seção transversal:

$$M_{Rd} = \frac{M_{\text{dist}}}{\gamma} \quad (\text{B.58})$$

$$\gamma = 1,1;$$

M_{dist} = momento fletor de flambagem por distorção, dado por:

- para $\lambda_{\text{dist}} < 1,414$:

$$M_{\text{dist}} = W_c f_y (1 - 0,25 \lambda_{\text{dist}}^2) \quad (\text{B.59})$$

- para $\lambda_{\text{dist}} \geq 1,414$:

$$M_{\text{dist}} = \frac{W_c f_y}{\lambda_{\text{dist}}^2} \quad (\text{B.60})$$

λ_{dist} = índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, conforme a equação B.47, com a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, σ_{dist} , determinada de acordo com o anexo D da NBR 14762/2001 [9].

W_c = módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida.

A verificação quanto a força cortante deve ser feita em barras fletidas, conforme apresentado a seguir:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (B.61)$$

Onde:

V_{Sd} = força cortante de cálculo;

V_{Rd} = força cortante resistente de cálculo, calculada por:

$$\text{- para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} :$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} \quad (B.62)$$

$$\text{- para } 1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} :$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 (k_v f_y E)^{0,5}}{\gamma} \quad (B.63)$$

$$\text{- para } \frac{h}{t} > 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} :$$

$$V_{Rd} = \frac{[0,905 E k_v t^3 / h]}{\gamma} \quad (B.64)$$

$$\gamma = 1,1 ;$$

t = espessura da alma;

h = largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v = coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedor transversal:

$$k_v = 5,34$$

- para alma com enrijecedores transversais:

$$\text{- para } \frac{a}{h} \leq 1,0 :$$

$$k_v = 4,0 + \frac{5,34}{(a/h)^2} \quad (B.65)$$

- para $\frac{a}{h} > 1,0$:

$$k_v = 5,34 + \frac{4,0}{(a/h)^2} \quad (\text{B.66})$$

a = distância entre enrijecedores transversais de alma.

Para barras submetidas a flexão composta, com força normal e momentos fletores combinados, a força normal solicitante de cálculo, N_{Sd} , e os momentos fletores solicitantes de cálculo, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$, devem satisfazer as inequações de interação apresentadas a seguir.

Para barras submetidas à flexo-compressão:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{C_{mx} M_{x,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{ex}}\right) M_{x,Rd}} + \frac{C_{my} M_{y,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{ey}}\right) M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{B.67})$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{0,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{B.68})$$

Quando $\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 0,15$, a NBR 14762/2001 [9] permite que a verificação das inequações

B.67 e B.68 sejam substituídas pela verificação apenas da inequação B.69, que corresponde à inequação B.67 sem levar em consideração os coeficientes C_{mx} e C_{my} , e as parcelas

relacionadas ao efeito de segunda ordem $\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{ex}}\right)$ e $\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{ey}}\right)$. Com isso, pode-se dizer que

quando a força normal solicitante de cálculo é pequena comparada com a força normal resistente de cálculo, o efeito de segunda ordem pode ser desprezado.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{B.69})$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = força normal resistente de cálculo;

$N_{0,Rd}$ = força normal resistente de cálculo, tomando-se $\rho = 1,0$;

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$ = momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados com $C_b = 1,0$;

C_{mx}, C_{my} = coeficientes de equivalência de momento na flexão composta, em relação aos eixos x e y, respectivamente, determinados conforme o item 7.9.2 da NBR 14762/2001 [9];

N_{ex}, N_{ey} = forças normais de flambagem elástica em relação aos eixos x e y, respectivamente, determinadas pelas equações B.39 e B.40.

I_x, I_y = momentos de inércia da seção bruta, em relação aos eixos x e y, respectivamente.

Para barras submetidas à flexo-tração:

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{xt,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{yt,Rd}} + \frac{N_{Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (B.70)$$

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} - \frac{N_{Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (B.71)$$

Onde:

$N_{t,Rd}$ = força normal de tração resistente de cálculo;

$M_{xt,Rd}, M_{yt,Rd}$ = momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta, dados por:

$$M_{xt,Rd} = \frac{W_{xt} f_y}{\gamma} \quad (B.72)$$

$$M_{yt,Rd} = \frac{W_{yt} f_y}{\gamma} \quad (B.73)$$

$\lambda = 1,1$;

W_{xt}, W_{yt} = módulos de resistência elásticos da seção bruta, em relação aos eixos x e y, respectivamente;

Os deslocamentos máximos permitidos para terças de cobertura são de $L/180$.

ANEXO C – DETALHES SOBRE OS PROGRAMAS

C.1. Programa AutoTerças

Todas as informações que devem ser fornecidas pelo usuário encontram-se na tela principal do programa, conforme a Figura C.1. Nessa tela, deve-se escolher se será feita uma verificação ou um dimensionamento.

The screenshot shows the 'AutoTerças 1.0' software interface. The window title is 'AutoTerças 1.0' and the subtitle is 'Convenção de Sinais dos Carregamentos Sobre'. The interface is divided into several sections:

- Tipo de Aço:** Radio buttons for 'Formado a Frio' (selected) and 'Laminado'.
- Tipo de Perfil:** Radio buttons for 'Perfil U' (selected), 'Perfil Z', 'Perfil U Enrijecido', and 'Perfil Z Enrijecido'.
- Propriedades do Aço:** Input fields for 'E' (205000 MPa) and 'fy' (300 MPa).
- Dimensões do Perfil (mm):** Input fields for 'A', 'B', 't', 'C', and 'R'.
- Propriedades:** A list of properties including 'Área Bruta', 'Ix', 'xcg', 'Iy', 'Ixc', 'Iyc', 'xo', 'J', 'Cw', 'Wx', and 'Wy'.
- Comprimentos de Flambagem e Apoios:** Input fields for 'Vão' (1000 mm), 'Nº Linhas de Corrente' (0), and 'Condições de apoio' (Kx, Ky, Kz, all set to 1).
- Tipo de Análise:** Radio buttons for 'Verificação' (selected) and 'Dimensionamento'.
- Perfis Inclusos no Dimensionamento:** Radio buttons for 'Todos' (selected) and 'Perfil Selecionado'.
- Carregamentos (kN/m) (Normal em KN):** A table with columns for 'Normal', 'Vento', 'Perm.', 'SC', and 'Peso Próprio', each with a 'Coeficiente' column. All coefficients are set to 0. A 'Massa Específica do Aço' field is set to 7950 kg/m³.
- Inclinação do telhado (°):** Input field set to 0.
- Cmx, Cmy:** Input fields set to 1.
- Diagrama:** A schematic diagram of a U-profile with dimensions A, B, t, and coordinate axes x=1 and y=2.
- Buttons:** 'Confirmar valores', 'Inserir nova combinação', and 'Calcular'.
- Resistências:** Fields for 'Tração', 'Compressão', 'Número de Iterações', 'Momento em x', and 'Momento em y'.
- Esbeltez:** Fields for 'Esbeltez em x' and 'Esbeltez em y'.
- Equações de Interação:** Fields for 'Equação 1', 'Equação 2', and 'Combinação Crítica'.
- Flecha:** Fields for 'Flecha' and 'Combinação Crítica'.

Figura C.1 – Tela inicial do programa AutoTerças

C.1.1 Verificação

Para habilitar o modo de verificação de um perfil, basta selecionar a opção “Verificação” no campo “Tipo de Análise”, conforme a Figura C.2.



Figura C.2 – Escolha do tipo de análise

- Entrada de Dados

A primeira informação que o usuário deve fornecer para iniciar a verificação de um perfil é indicar o tipo de aço de que o perfil é feito, ou seja, se é um perfil formado a frio ou laminado. Essa informação é fornecida no campo “Tipo de Aço”, conforme a Figura C.3.



Figura C.3 – Escolha do tipo de aço

O próximo passo consiste em selecionar qual o tipo de perfil que será analisado no campo “Tipo de Perfil”. Caso seja feita a opção pelo perfil formado a frio, aparecerão quatro opções distintas: U simples, U enrijecido, Z simples e Z enrijecido, conforme a Figura C.1. Caso seja selecionada a opção de perfis laminados, o usuário poderá escolher por dois tipos de perfis: U ou I. Além disso, para os perfis laminados, o usuário deve escolher se os cálculos devem ser feitos utilizando as curvas de flambagem e procedimentos da NBR 8800/1986 [7] ou da NBR 8800/2008 [8], conforme a Figura C.4. Seja qual for o tipo de aço selecionado, uma figura do tipo de perfil escolhido será exibida no canto inferior esquerdo da tela, indicando as dimensões e posições dos eixos.

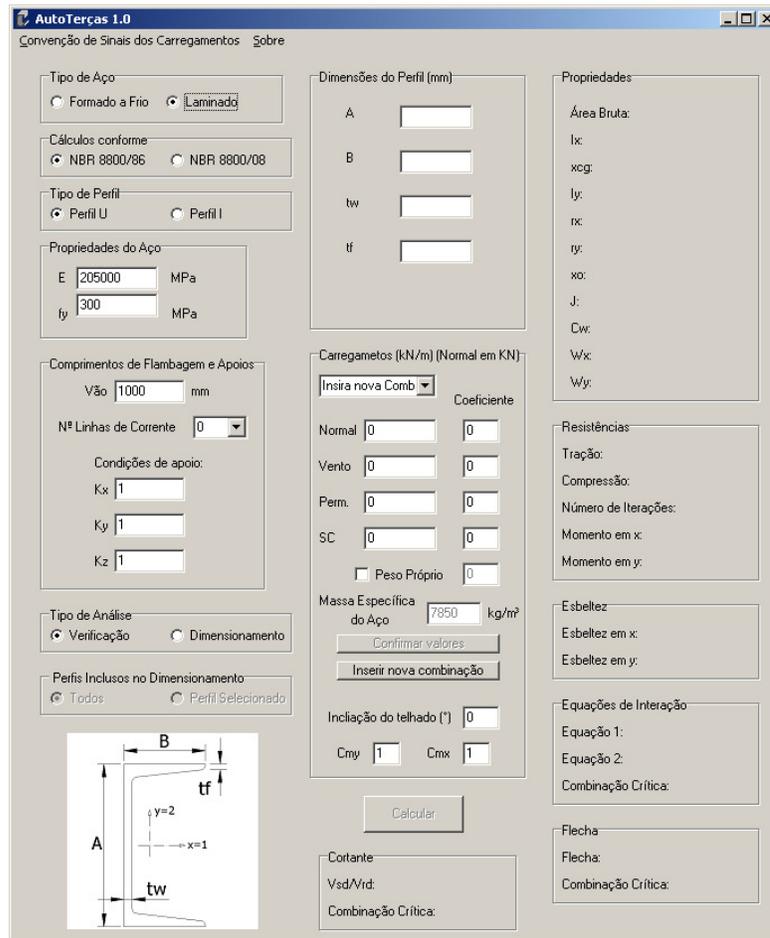


Figura C.4 – Tela do programa AutoTerças para perfis laminados

A seguir deve-se fornecer as propriedades do aço como o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento, ambas em MPa, nos respectivos campos das “Propriedades do Aço”. Posteriormente, nos campos de “Comprimentos de Flambagem e Apoios”, informa-se o vão da terça, em mm, o número de linhas de corrente que serão utilizadas, podendo variar de 0 a 10, e os coeficientes K de flambagem nas direções x , y e z , caracterizando quais são as condições de apoio.

As dimensões do perfil a ser verificado são então determinadas pelo usuário, em mm, nos campos referentes as “Dimensões do Perfil”, conforme a Figura C.5. As dimensões que

devem ser fornecidas para os perfis formados a frio e laminados são ligeiramente diferentes, porém sempre seguem as informações indicadas na figura do campo inferior esquerdo da tela.

| Dimensões do Perfil (mm) | a) formado a frio | b) laminado |
|--------------------------|-------------------|-------------|
| A | 200 | 203,2 |
| B | 100 | 57,4 |
| t | 3 | |
| tw | | 5,59 |
| C | | |
| tf | | 9,9 |
| R | 3 | |

Figura C.5 – Fornecimento das dimensões dos perfis: a) formado a frio, b) laminado

Por fim devem ser preenchidos os dados necessários nos campos “Carregamentos”, conforme a Figura C.6. Para criar uma combinação, basta clicar no ícone “Inserir nova combinação”. Os valores dos carregamentos que compõem essa combinação devem ser preenchidos em kN, no caso da normal, e em kN/m, para os demais carregamentos, assim como os valores de seus respectivos coeficientes. Também é possível escolher se o peso próprio do perfil será considerado na combinação, indicando o seu coeficiente de ponderação e o valor da massa específica do aço, em kg/m^3 .

Para a normal, o valor positivo indica tração, e o valor negativo indica compressão. Para o carregamento de vento, o valor positivo indica vento de sucção, enquanto que o valor negativo indica vento de pressão. Para os carregamentos permanente e de sobrecarga, o valor positivo é gravitacional, e o valor negativo é contrário ao carregamento gravitacional.

Tendo preenchido os valores de uma combinação, deve-se clicar no botão “Confirmar valores”, para que eles sejam salvos nessa combinação. Pode-se adicionar novas combinações, seguindo os mesmos procedimentos. Caso queira alterar alguma combinação, basta selecioná-la

na caixa que contém todas as combinações, alterar os seus valores e então clicar no botão “Confirmar valores”, para que a nova combinação seja armazenada. A inclinação do telhado da cobertura deve ser indicada no campo “Inclinação do telhado”, em °. Também é possível fornecer valores diferentes do unitário para os coeficientes C_{my} e C_{mx} .

Para efetuar os cálculos e exibir os resultados, basta clicar no botão “Calcular”, que só é habilitado após o fornecimento dos carregamentos atuantes na terça.

| | | Coefficiente |
|--|-----|--------------|
| Normal | 0 | 0 |
| Vento | 0 | 0 |
| Perm. | 0,2 | 1,3 |
| SC | 0,5 | 1,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Peso Próprio | | 1,25 |

Massa Específica do Aço: 7850 kg/m³

Inclinação do telhado (°): 5

C_{my}: 1 C_{mx}: 1

Figura C.6 – Fornecimento dos carregamentos

- Resultados

Os resultados obtidos pelo programa são apresentados na própria tela, nos campos “Propriedades”, “Resistências”, “Esbeltez”, “Equações de Interação”, “Flecha” e “Cortante”. Também são fornecidas quais as combinações críticas para a análise dos esforços, da flecha e da cortante, conforme a Figura C.7.

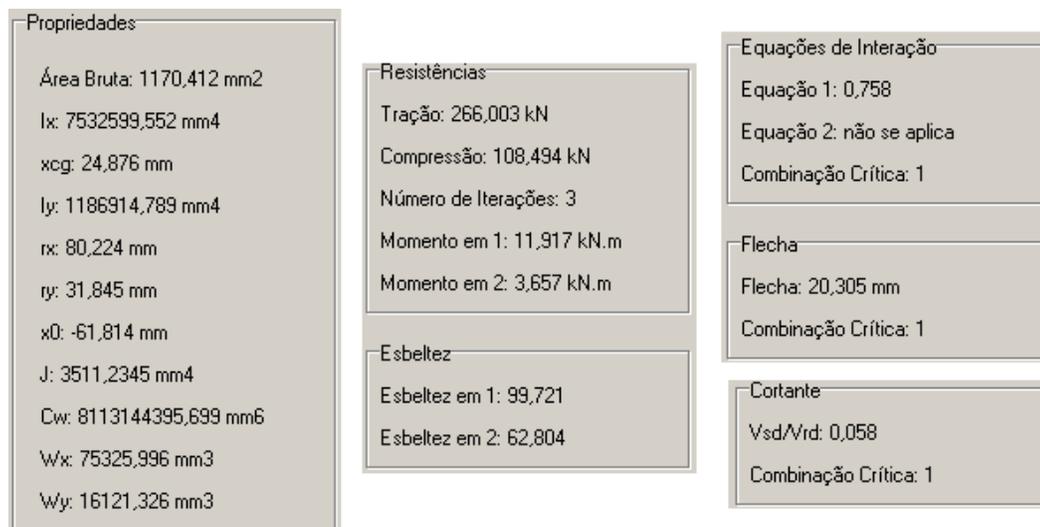


Figura C.7 – Resultados da verificação apresentados na tela

Caso a esbeltez esteja acima dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras seus valores serão indicados em vermelho na tela. De maneira semelhante, caso as equações de interação resultem em valores maiores do que 1,0 seus valores também serão indicados em vermelho.

Se aparecer escrito a frase “não se aplica” no local referente à “Equação 2”, significa que essa equação não precisa ser calculada, conforme recomendação da norma, ou seja, foram desprezados os efeitos de segunda ordem, pois a normal atuante é pequena em comparação a normal resistente.

Outros resultados são fornecidos no arquivo de texto “Resultados.txt”, que será criado no diretório onde o programa foi instalado. A Figura C.8 demonstra uma tela com os resultados contidos nesse arquivo.

Pode-se notar que são fornecidas as composições de cada combinação, o tipo e dimensões do perfil verificado, sua área bruta, a inclinação do telhado, o número de linhas de corrente e o número de seções que foram analisadas, que depende do número de linhas de corrente.

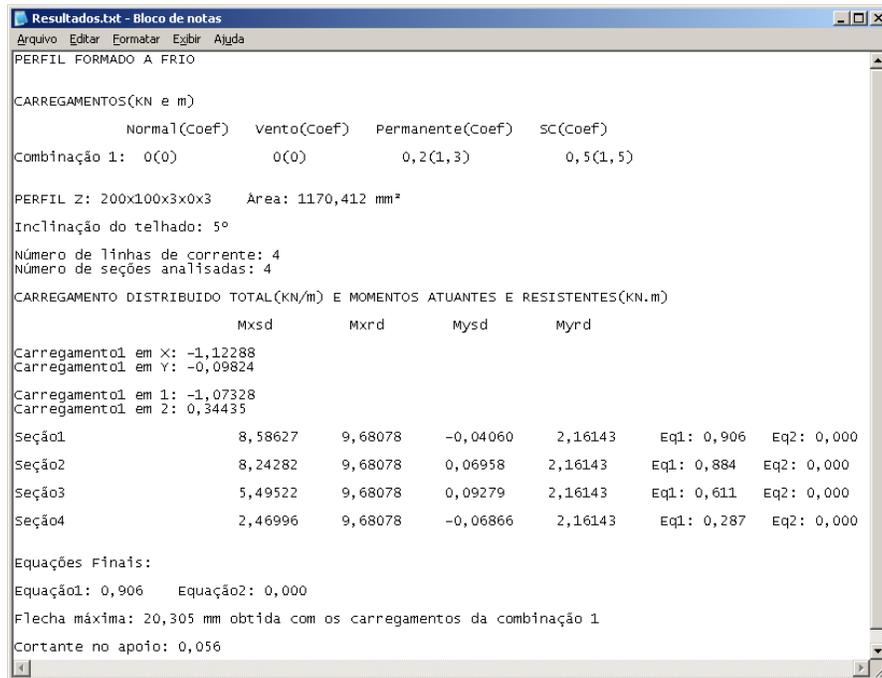


Figura C.8 – Arquivo de resultados

Também são apresentados os carregamentos distribuídos linearmente em relação aos eixos x e y e em relação aos eixos principais, assim como os momentos atuantes e resistentes para cada seção analisada e para cada combinação, além dos valores das equações de interação.

No final do arquivo é apresentado o conjunto de combinações mais críticas. O valor nulo para a “Equação 2” indica que não foi necessário calculá-la, segundo as recomendações da norma. Por último pode-se verificar qual a flecha máxima e a relação entre os esforços cortantes solicitante e resistente no apoio.

C.1.2 Dimensionamento

Para iniciar o módulo de dimensionamento de terças, basta selecionar a opção “Dimensionamento”, no campo “Tipo de Análise”, já apresentado na Figura C.2. Para o dimensionamento existe a opção de analisar todos os perfis existentes na lista de perfis, ou

dimensionar apenas um tipo de perfil. Essa opção pode ser feita no campo “Perfis Inclusos no Dimensionamento”. Caso a opção “Todos” seja selecionada, o campo “Tipo de Perfil” fica bloqueado. Caso a opção “Perfil Selecionado” seja escolhida, deve-se selecionar qual o tipo de perfil a ser dimensionado no campo “Tipo de Perfil”. A Figura C.9 exemplifica essa seleção para o caso dos perfis formados a frio, sendo que para os perfis laminados a seleção é feita da mesma maneira.



Figura C.9 – Seleção dos perfis para dimensionamento: a) todos os perfis, b) apenas o perfil selecionado

- Entrada de Dados

A maioria dos procedimentos de fornecimento dos dados de entrada para o dimensionamento é igual aos apresentados para a verificação. A principal diferença é com relação as dimensões do perfil. No dimensionamento os campos de “Dimensões do Perfil” estão bloqueados. Essas dimensões são obtidas pelo programa através de listas de perfis contidas em dois arquivos de texto com os nomes “ListaPerfisFF.txt” e “ListaPerfisLam.txt”, referentes aos perfis formados a frio e laminados respectivamente. Esses arquivos estão localizados no diretório onde o programa foi instalado.

A lista dos perfis formados a frio contém todos os perfis padronizados pela NBR 6355 [5], além de perfis Z simples, que não aparecem nessa norma. A lista dos perfis laminados

contém as dimensões dos principais perfis distribuídos comercialmente e que também são padronizados. Na Figura C.10 pode-se observar um trecho de cada lista de perfis.

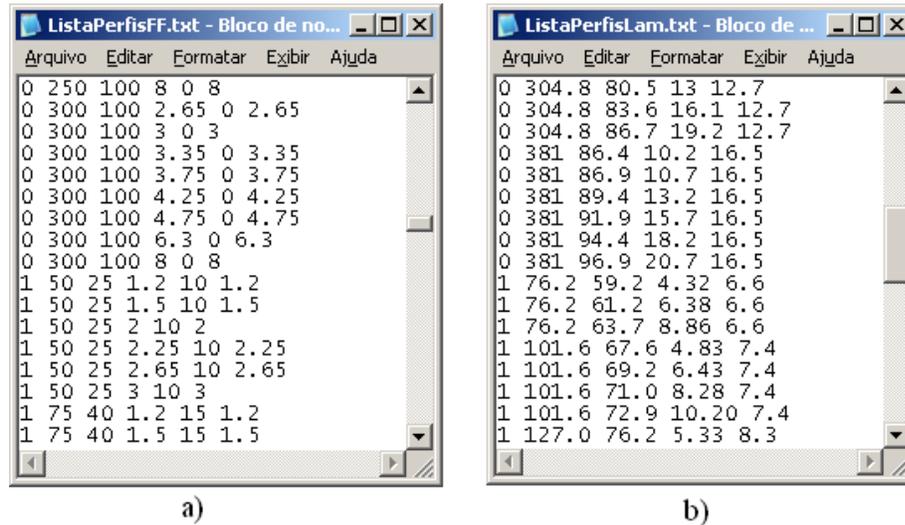


Figura C.10 – Lista de perfis: a) formados a frio, b) laminado

Essa lista de perfis pode ser alterada pelo usuário, sabendo-se que a primeira coluna indica o tipo de perfil: 0 = U simples, 1 = U enrijecido, 2 = Z simples e 3 = Z enrijecido para os perfis formados a frio, e 0 = U e 1 = I para os perfis laminados. As demais colunas indicam, respectivamente, em mm, comprimento da alma, comprimento da mesa, espessura, comprimento do enrijecedor e raio de dobramento interno para os perfis formados a frio, e comprimento da alma, comprimento da mesa, espessura da alma e espessura da mesa para os perfis laminados. Caso seja feita alguma alteração, as listas de perfis sempre devem ser salvas com os mesmos nomes.

- Resultados

Os resultados apresentados na tela são referentes ao perfil selecionado como o melhor, em termos de peso, para a situação imposta pelo usuário. São apresentadas as dimensões do perfil escolhido assim como o tipo de perfil e a sua figura, conforme verifica-se na Figura C.11. As propriedades, resistências, esbelteç, equações de interação e flecha também são apresentadas na

tela apenas para o perfil selecionado como o melhor. Os resultados obtidos para todos os perfis contidos na lista são apresentados no arquivo “Resultados.txt”, possibilitando uma análise de outros perfis diferentes daquele selecionado como o melhor.

AutoTercas 1.0
Convenção de Sinais dos Carregamentos Sobre

Tipo de Aço: Formado a Frio Laminado

Cálculos conforme: NBR 8800/86 NBR 8800/08

Tipo de Perfil: Perfil U Perfil I

Propriedades do Aço: E: 205000 MPa, fy: 300 MPa

Comprimentos de Flambagem e Apoios: Vão: 8000 mm, Nº Linhas de Corrente: 3, Condições de apoio: Kx: 1, Ky: 1, Kz: 1

Tipo de Análise: Verificação Dimensionamento

Perfis Incluídos no Dimensionamento: Todos Perfil Selecionado

Dimensões do Perfil (mm): A: 152,4, B: 48,8, tw: 5,08, tf: 8,7

Carregamentos (kN/m) (Normal em KN): Combinação 2, Coeficiente: Normal: 0, 0; Vento: 1,3, 1,4; Perm.: 0,2, 1; SC: 0, 0; Peso Próprio: 1; Massa Específica do Aço: 7850 kg/m³

Propriedades: Área Bruta: 1534,920 mm², Ix: 5430430,768 mm⁴, xcg: 12,093 mm, Iy: 351278,566 mm⁴, rx: 59,480 mm, ry: 15,128 mm, x0: -27,333 mm, J: 26587,7554 mm⁴, Cw: 1257084239,159 mm⁶, Wx: 71265,496 mm³, Wy: 10281,219 mm³

Resistências: Tração: 414,428 kN, Compressão: 116,704 kN, Momento em x: 16,999 kN.m, Momento em y: 3,470 kN.m

Esbeltezes: Esbeltez em x: 134,498, Esbeltez em y: 132,205

Equações de Interação: Equação 1: 0,710, Equação 2: 0,710, Combinação Crítica: 2

Flecha: Flecha: 29,504 mm, Combinação Crítica: 1

Diagrama: U-profile with dimensions A, B, tw, tf, y=2, x=1

Botões: Confirmar valores, Inserir nova combinação, Calcular

Resultado: Cortante: Vsd/Vrd: 0,048, Combinação Crítica: 2

Figura C.11 – Resultados do dimensionamento apresentados na tela

C.1.3 Listas de Perfis

As Tabelas C.1 e C.2 contêm as listas de perfis utilizadas nesse programa para o dimensionamento dos perfis laminados e formados a frio, respectivamente.

| | | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| U76,2x35,8x4,32x6,9 | U254x77x17,1x11,1 | I101,6x71,0x8,28x7,4 | I304,8x139,1x17,40x16,7 |
| U76,2x38x6,55x6,9 | U254x80,8x20,8x11,1 | I101,6x72,9x10,20x7,4 | I304,8x142,2x20,60x16,7 |
| U76,2x40,5x9,04x6,9 | U304,8x74,7x7,11x12,7 | I127,0x76,2x5,33x8,3 | I381x140x10,4x15,8 |
| U101,6x40,1x4,57x7,5 | U304,8x77,4x9,83x12,7 | I127,0x79,7x8,81x8,3 | I381x141x11,5x15,8 |
| U101,6x41,8x6,27x7,5 | U304,8x80,5x13x12,7 | I127,0x83,4x12,50x8,3 | I381x143x14x15,8 |
| U101,6x43,7x8,13x7,5 | U304,8x83,6x16,1x12,7 | I152,4x84,6x5,84x9,1 | I381x146x16,5x15,8 |
| U152,4x48,8x5,08x8,7 | U304,8x86,7x19,2x12,7 | I152,4x87,5x8,71x9,1 | I457,2x152x11,7x17,6 |
| U152,4x51,7x7,98x8,7 | U381x86,4x10,2x16,5 | I152,4x90,6x11,80x9,1 | I457,2x155x13,9x17,6 |
| U152,4x54,8x11,1x8,7 | U381x86,9x10,7x16,5 | I203,2x101,6x6,86x10,8 | I457,2x157x16x17,6 |
| U152,4x57,9x14,2x8,7 | U381x89,4x13,2x16,5 | I203,2x103,6x8,86x10,8 | I457,2x159x18,1x17,6 |
| U203,2x57,4x5,59x9,9 | U381x91,9x15,7x16,5 | I203,2x105,9x11,20x10,8 | I508x178x15,2x23,3 |
| U203,2x59,5x7,7x9,9 | U381x94,4x18,2x16,5 | I203,2x108,3x13,50x10,8 | I508x179x16,6x23,3 |
| U203,2x61,8x10x9,9 | U381x96,9x20,7x16,5 | I254,0x118,4x7,87x12,5 | I508x181x18,4x23,3 |
| U203,2x64,2x12,4x9,9 | I76,2x59,2x4,32x6,6 | I254,0x121,8x11,40x12,5 | I508x183x20,3x23,3 |
| U203,2x66,5x14,7x9,9 | I76,2x61,2x6,38x6,6 | I254,0x125,6x15,10x12,5 | I508x185x22,2x23,3 |
| U254x66x6,1x11,1 | I76,2x63,7x8,86x6,6 | I254,0x129,3x18,80x12,5 | |
| U254x69,6x9,63x11,1 | I101,6x67,6x4,83x7,4 | I304,8x133,4x11,70x16,7 | |
| U254x73,3x13,4x11,1 | I101,6x69,2x6,43x7,4 | I304,8x136,0x14,40x16,7 | |

Tabela C.1 – Lista de perfis laminados

| | | | |
|-------------|--------------|------------------------|--------------|
| U50x25x1,2 | U200x50x2 | Ue200x75x2,25x20x2,25 | Z200x75x4,25 |
| U50x25x1,5 | U200x50x2,25 | Ue200x75x2,65x25x2,65 | Z200x75x4,75 |
| U50x25x2 | U200x50x2,65 | Ue200x75x3x25x3 | Z200x75x6,3 |
| U50x25x2,25 | U200x50x3 | Ue200x75x3,35x25x3,35 | Z250x85x2 |
| U50x25x2,65 | U200x50x3,35 | Ue200x75x3,75x25x3,75 | Z250x85x2,25 |
| U50x25x3 | U200x50x3,75 | Ue200x75x4,25x25x4,25 | Z250x85x2,65 |
| U75x40x1,2 | U200x50x4,25 | Ue200x75x4,75x25x4,75 | Z250x85x3 |
| U75x40x1,5 | U200x50x4,75 | Ue200x75x6,3x30x6,3 | Z250x85x3,35 |
| U75x40x2 | U200x50x6,3 | Ue200x100x2,65x25x2,65 | Z250x85x3,75 |
| U75x40x2,25 | U200x50x8 | Ue200x100x3x25x3 | Z250x85x4,25 |
| U75x40x2,65 | U200x75x2,65 | Ue200x100x3,35x25x3,35 | Z250x85x4,75 |
| U75x40x3 | U200x75x3 | Ue200x100x3,75x25x3,75 | Z250x85x6,3 |
| U75x40x3,35 | U200x75x3,35 | Ue200x100x4,25x25x4,25 | Z300x85x2 |
| U75x40x3,75 | U200x75x3,75 | Ue200x100x4,75x25x4,75 | Z300x85x2,25 |
| U75x40x4,25 | U200x75x4,25 | Ue250x85x2x25x2 | Z300x85x2,65 |
| U75x40x4,75 | U200x75x4,75 | Ue250x85x2,25x25x2,25 | Z300x85x3 |

| | | | |
|--------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| U100x40x1,2 | U200x75x6,3 | Ue250x85x2,65x25x2,65 | Z300x85x3,35 |
| U100x40x1,5 | U200x75x8 | Ue250x85x3x25x3 | Z300x85x3,75 |
| U100x40x2 | U200x100x2,65 | Ue250x85x3,35x25x3,35 | Z300x85x4,25 |
| U100x40x2,25 | U200x100x3 | Ue250x85x3,75x25x3,75 | Z300x85x4,75 |
| U100x40x2,65 | U200x100x3,35 | Ue250x85x4,25x25x4,25 | Z300x85x6,3 |
| U100x40x3 | U200x100x3,75 | Ue250x85x4,75x25x4,75 | Ze50x25x1,2x10x1,2 |
| U100x40x3,35 | U200x100x4,25 | Ue250x85x6,3x30x6,3 | Ze50x25x1,5x10x1,5 |
| U100x40x3,75 | U200x100x4,75 | Ue250x100x2,65x25x2,65 | Ze50x25x2x10x2 |
| U100x40x4,25 | U200x100x6,3 | Ue250x100x3x25x3 | Ze50x25x2,25x10x2,25 |
| U100x40x4,75 | U200x100x8 | Ue250x100x3,35x25x3,35 | Ze50x25x2,65x10x2,65 |
| U100x40x6,3 | U250x100x2,65 | Ue250x100x3,75x25x3,75 | Ze50x25x3x10x3 |
| U100x50x1,2 | U250x100x3 | Ue250x100x4,25x25x4,25 | Ze75x40x1,2x15x1,2 |
| U100x50x1,5 | U250x100x3,35 | Ue250x100x4,75x25x4,75 | Ze75x40x1,5x15x1,5 |
| U100x50x2 | U250x100x3,75 | Ue300x85x2x25x2 | Ze75x40x2x15x2 |
| U100x50x2,25 | U250x100x4,25 | Ue300x85x2,25x25x2,25 | Ze75x40x2,25x15x2,25 |
| U100x50x2,65 | U250x100x4,75 | Ue300x85x2,65x25x2,65 | Ze75x40x2,65x15x2,65 |
| U100x50x3 | U250x100x6,3 | Ue300x85x3x25x3 | Ze75x40x3x15x3 |
| U100x50x3,35 | U250x100x8 | Ue300x85x3,35x25x3,35 | Ze100x50x1,2x17x1,2 |
| U100x50x3,75 | U300x100x2,65 | Ue300x85x3,75x25x3,75 | Ze100x50x1,5x17x1,5 |
| U100x50x4,25 | U300x100x3 | Ue300x85x4,25x25x4,25 | Ze100x50x2x17x2 |
| U100x50x4,75 | U300x100x3,35 | Ue300x85x4,75x25x4,75 | Ze100x50x2,25x17x2,25 |
| U100x50x6,3 | U300x100x3,75 | Ue300x85x6,3x30x6,3 | Ze100x50x2,65x17x2,65 |
| U100x75x2,65 | U300x100x4,25 | Ue300x100x2,65x25x2,65 | Ze100x50x3x17x3 |
| U100x75x3 | U300x100x4,75 | Ue300x100x3x25x3 | Ze100x50x3,35x17x3,35 |
| U100x75x3,35 | U300x100x6,3 | Ue300x100x3,35x25x3,35 | Ze125x50x2x17x2 |
| U100x75x3,75 | U300x100x8 | Ue300x100x3,75x25x3,75 | Ze125x50x2,25x17x2,25 |
| U100x75x4,25 | Ue50x25x1,2x10x1,2 | Ue300x100x4,25x25x4,25 | Ze125x50x2,65x17x2,65 |
| U100x75x4,75 | Ue50x25x1,5x10x1,5 | Ue300x100x4,75x25x4,75 | Ze125x50x3x17x3 |
| U100x75x6,3 | Ue50x25x2x10x2 | Z50x25x1,2 | Ze125x50x3,35x17x3,35 |
| U100x75x8 | Ue50x25x2,25x10x2,25 | Z50x25x1,5 | Ze125x50x3,75x20x3,75 |
| U125x50x1,2 | Ue50x25x2,65x10x2,65 | Z50x25x2 | Ze150x60x2x20x2 |
| U125x50x1,5 | Ue50x25x3x10x3 | Z50x25x2,25 | Ze150x60x2,25x20x2,25 |
| U125x50x2 | Ue75x40x1,2x15x1,2 | Z50x25x2,65 | Ze150x60x2,65x20x2,65 |
| U125x50x2,25 | Ue75x40x1,5x15x1,5 | Z50x25x3 | Ze150x60x3x20x3 |
| U125x50x2,65 | Ue75x40x2x15x2 | Z75x40x1,2 | Ze150x60x3,35x20x3,35 |
| U125x50x3 | Ue75x40x2,25x15x2,25 | Z75x40x1,5 | Ze150x60x3,75x20x3,75 |
| U125x50x3,35 | Ue75x40x2,65x15x2,65 | Z75x40x2 | Ze150x60x4,25x20x4,25 |
| U125x50x3,75 | Ue75x40x3x15x3 | Z75x40x2,25 | Ze150x60x4,75x20x4,75 |
| U125x50x4,25 | Ue100x40x1,2x17x1,2 | Z75x40x2,65 | Ze200x75x2x20x2 |
| U125x50x4,75 | Ue100x40x1,5x17x1,5 | Z75x40x3 | Ze200x75x2,25x20x2,25 |
| U125x50x6,3 | Ue100x40x2x17x2 | Z100x50x1,2 | Ze200x75x2,65x25x2,65 |
| U125x75x2,65 | Ue100x40x2,25x17x2,25 | Z100x50x1,5 | Ze200x75x3x25x3 |
| U125x75x3 | Ue100x40x2,65x17x2,65 | Z100x50x2 | Ze200x75x3,35x25x3,35 |
| U125x75x3,35 | Ue100x40x3x17x3 | Z100x50x2,25 | Ze200x75x3,75x25x3,75 |
| U125x75x3,75 | Ue100x40x3,35x17x3,35 | Z100x50x2,65 | Ze200x75x4,25x25x4,25 |
| U125x75x4,25 | Ue100x50x1,2x17x1,2 | Z100x50x3 | Ze200x75x4,75x25x4,75 |
| U125x75x4,75 | Ue100x50x1,5x17x1,5 | Z100x50x3,35 | Ze200x75x6,3x30x6,3 |
| U125x75x6,3 | Ue100x50x2x17x2 | Z125x50x2 | Ze250x85x2x25x2 |
| U125x75x8 | Ue100x50x2,25x17x2,25 | Z125x50x2,25 | Ze250x85x2,25x25x2,25 |
| U150x50x2 | Ue100x50x2,65x17x2,65 | Z125x50x2,65 | Ze250x85x2,65x25x2,65 |
| U150x50x2,25 | Ue100x50x3x17x3 | Z125x50x3 | Ze250x85x3x25x3 |
| U150x50x2,65 | Ue100x50x3,35x17x3,35 | Z125x50x3,35 | Ze250x85x3,35x25x3,35 |
| U150x50x3 | Ue125x50x2x17x2 | Z125x50x3,75 | Ze250x85x3,75x25x3,75 |
| U150x50x3,35 | Ue125x50x2,25x17x2,25 | Z150x60x2 | Ze250x85x4,25x25x4,25 |

| | | | |
|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| U150x50x3,75 | Ue125x50x2,65x17x2,65 | Z150x60x2,25 | Ze250x85x4,75x25x4,75 |
| U150x50x4,25 | Ue125x50x3x17x3 | Z150x60x2,65 | Ze250x85x6,3x30x6,3 |
| U150x50x4,75 | Ue125x50x3,35x17x3,35 | Z150x60x3 | Ze300x85x2x25x2 |
| U150x50x6,3 | Ue125x50x3,75x20x3,75 | Z150x60x3,35 | Ze300x85x2,25x25x2,25 |
| U150x50x8 | Ue150x60x2x20x2 | Z150x60x3,75 | Ze300x85x2,65x25x2,65 |
| U150x75x2,65 | Ue150x60x2,25x20x2,25 | Z150x60x4,25 | Ze300x85x3x25x3 |
| U150x75x3 | Ue150x60x2,65x20x2,65 | Z150x60x4,75 | Ze300x85x3,35x25x3,35 |
| U150x75x3,35 | Ue150x60x3x20x3 | Z200x75x2 | Ze300x85x3,75x25x3,75 |
| U150x75x3,75 | Ue150x60x3,35x20x3,35 | Z200x75x2,25 | Ze300x85x4,25x25x4,25 |
| U150x75x4,25 | Ue150x60x3,75x20x3,75 | Z200x75x2,65 | Ze300x85x4,75x25x4,75 |
| U150x75x4,75 | Ue150x60x4,25x20x4,25 | Z200x75x3 | Ze300x85x6,3x30x6,3 |
| U150x75x6,3 | Ue150x60x4,75x20x4,75 | Z200x75x3,35 | |
| U150x75x8 | Ue200x75x2x20x2 | Z200x75x3,75 | |

Tabela C.2 – Lista de perfis formados a frio

C.2. Programa AutoTruss 2.0

O programa AutoTruss 2.0 é uma ferramenta para facilitar e agilizar o projeto de coberturas metálicas formadas por estruturas planas e tridimensionais. Ele permite realizar a análise de uma grande quantidade de soluções estruturais apresentando o peso final de cada uma. O engenheiro deve analisar esses casos, dentre os quais certamente estará a melhor solução ou soluções muito próximas da ideal, e selecionar a que melhor atende os requisitos do projeto. Assim é possível analisar rapidamente uma grande quantidade de propostas.

A obtenção dos esforços nas barras das treliças segue os procedimentos da análise matricial de estruturas, utilizando-se o método dos deslocamentos. Com esse procedimento é possível determinar os deslocamentos e rotações nos nós da treliça, e a partir deles, encontrar as forças e momentos fletores nas extremidades de cada barra. Para o caso das treliças planas, são considerados dois deslocamentos e uma rotação por nó, enquanto que para as treliças multiplanares, são considerados três deslocamentos e três rotações por nó, conforme a Figura C.12.

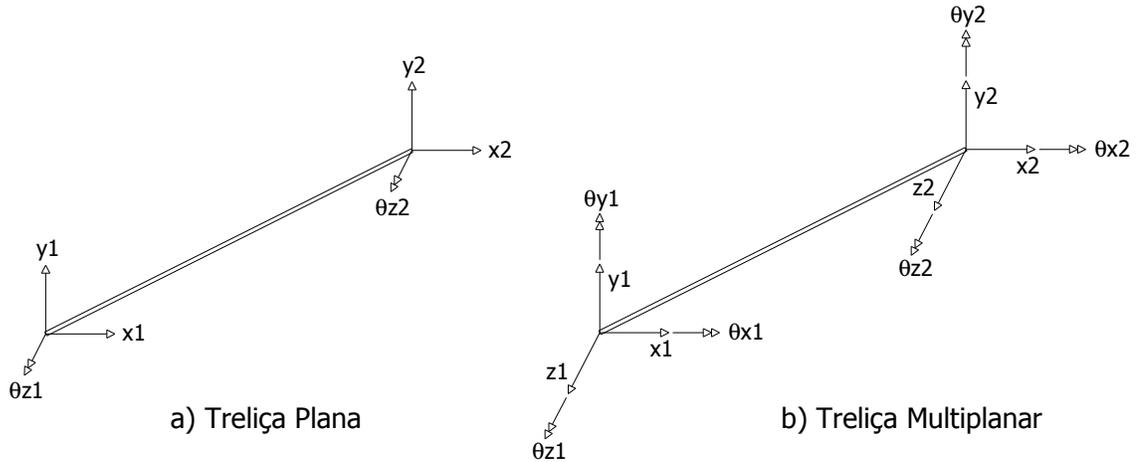


Figura C.12 – Deslocamentos e rotações nas barras

Com as forças e momentos fletores de extremidade, aliadas as forças e momentos fletores atuantes ao longo das barras, é possível encontrar os máximos esforços normais, cisalhantes, fletores e de torção em cada barra da treliça. Esses esforços máximos serão utilizados para o dimensionamento da treliça, buscando-se os perfis mais leves que resistem aos esforços solicitantes. Os perfis disponíveis para análise são os circulares e quadrados presentes no Catálogo Técnico de Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular [72], da V&M do Brasil. O dimensionamento das barras é feito segundo a NBR 8800/1986 [7], sendo que as mesmas são dimensionadas em flexão composta, já que os carregamentos são aplicados distribuídos ao longo dos banzos superiores das treliças.

A análise realizada pelo programa considera que os materiais estão trabalhando em regime elástico linear, ou seja, são considerados pequenos deslocamentos e pequenas deformações, uma seção transversal plana permanece plana após a sua deformação, e vale o princípio da superposição dos efeitos. Com relação às ligações das barras, é permitido que o usuário defina se as barras são consideradas como elementos de pórtico ou de treliça.

A seguir será apresentado o procedimento de utilização do programa AutoTruss 2.0, explicando a entrada de dados e os resultados fornecidos.

- Entrada de Dados

Os dados de entrada que o usuário deve fornecer são os seguintes, seguindo a tela do programa apresentada na Figura C.13:

- Vão: vão livre que a treliça deve vencer, devendo ser fornecido em metros;
- Largura: largura de influência de cada banzo superior da treliça, ou seja, coincide com a distância entre treliças. No caso das treliças multiplanares, esse também é o valor da distância entre os banzos superiores de cada treliça. O valor deve ser fornecido em metros;
- Altura: altura inicial da treliça, em metros;

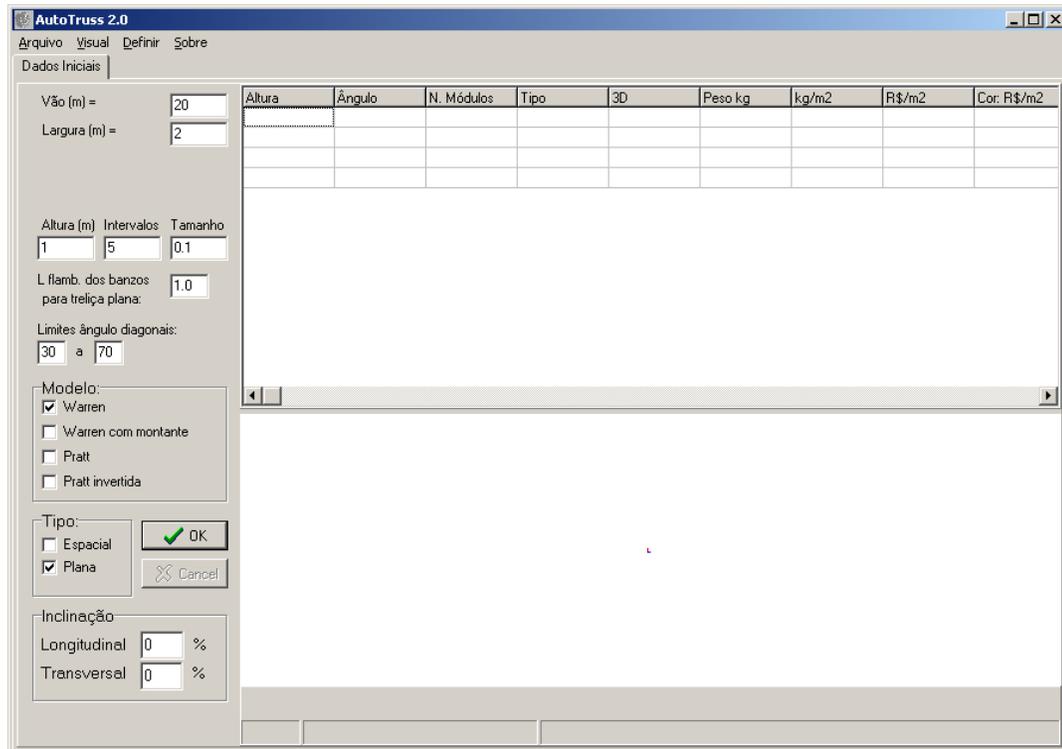


Figura C.13 – Tela do programa AutoTruss 2.0

- Intervalos: número de intervalos em que a altura da treliça irá variar;
- Tamanho: tamanho de cada intervalo de variação da altura, fornecido em metros. No caso da Figura C.13, as alturas analisadas serão 1,0m, 1,1m, 1,2m, 1,3m, 1,4m e 1,5m;

- L flamb. dos banzos para treliça plana: comprimento de flambagem das barras dos banzos para treliça plana. Valor fixo;
- Limites ângulo diagonais: define quais são os ângulos máximo e mínimo das diagonais da treliça. Dentro deste limite serão adotados cinco ângulos distintos, gerando cinco modelos de treliça para cada altura, permitindo analisar diferentes modulações com uma mesma altura;
- Modelo: tipo de treliça escolhida pelo usuário, conforme a Figura C.14. A treliça Pratt invertida também é conhecida como Howe;

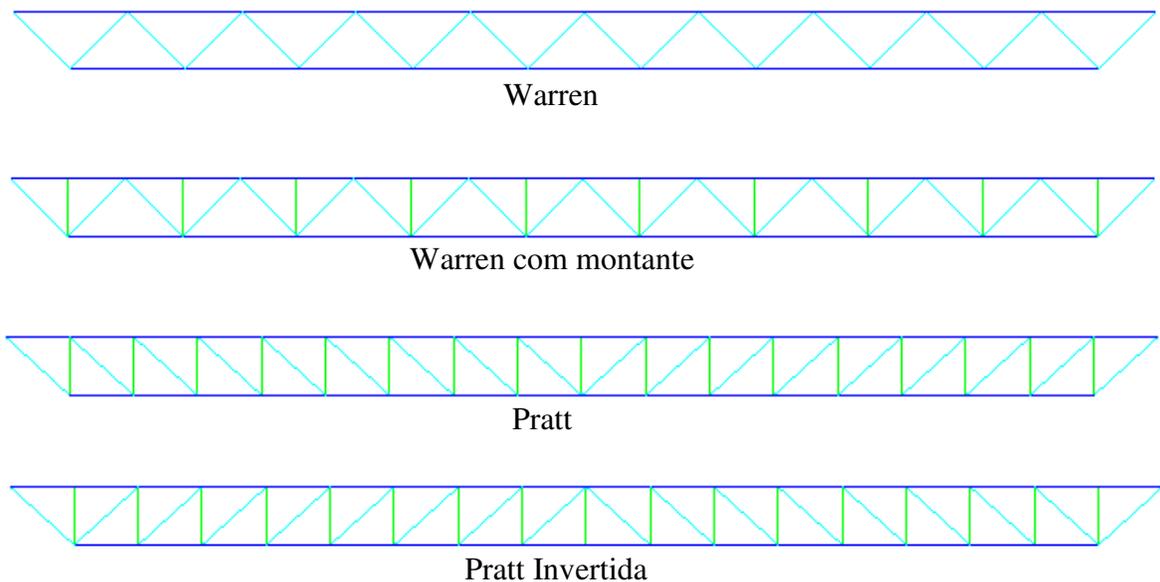
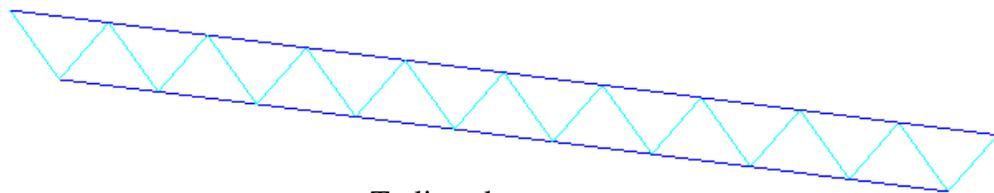
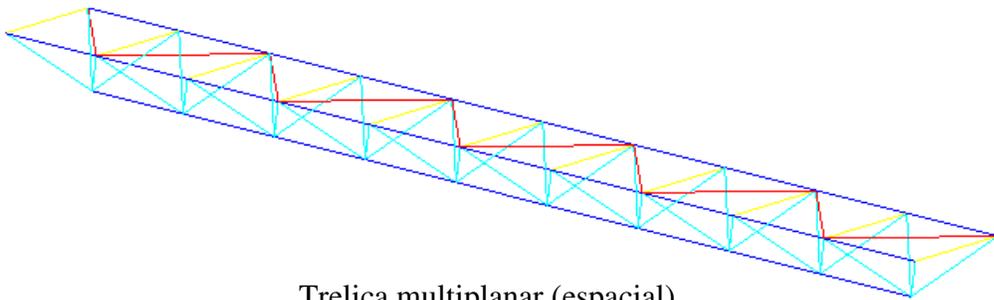


Figura C.14 – Modelos de treliça disponíveis no programa AutoTruss 2.0

- Tipo: define se a análise é feita para treliça plana, multiplanar (espacial) ou ambas, conforme a Figura C.15;



Treliça plana



Treliça multiplanar (espacial)

Figura C.15 – Treliça plana e multiplanar disponíveis no programa AutoTruss 2.0

- Inclinação: possibilita aplicar uma inclinação transversal ou longitudinal na treliça para acompanhar a inclinação da cobertura.

Na guia “Arquivo” da barra de tarefas existe a possibilidade de salvar os resultados do programa em um arquivo “.csv” que pode ser aberto no Excel. Em “Visual” pode-se selecionar um plano de visualização da treliça ou aproximar e afastar a imagem.

A guia “Definir” permite que o usuário informe os seguintes dados:

- Materiais: escolha do tipo de aço utilizado (250, 300 ou 350 MPa), conforme a Figura C.16;

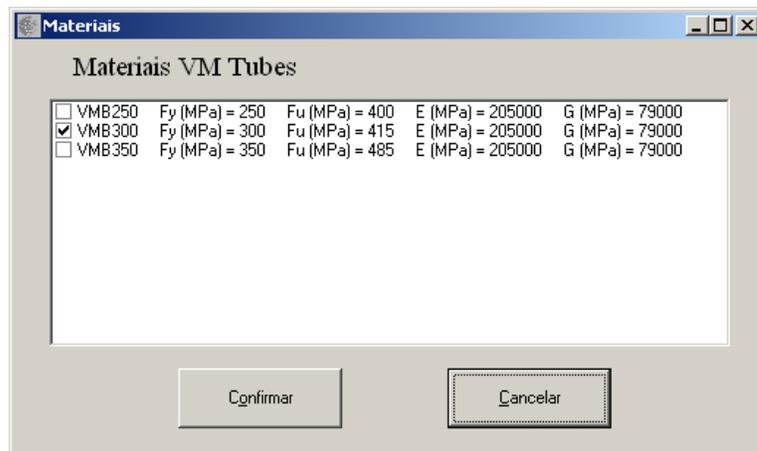


Figura C.16 – Definição do tipo de material

- Seções: seleção dos perfis que farão parte do dimensionamento das treliças. Podem ser selecionados tubos circulares e quadrados laminados presentes no Catálogo Técnico de Tubos Estruturais de Seção Circular, Quadrada e Retangular [72], da V&M do Brasil, ou circulares soldados, conforme a Figura C.17;

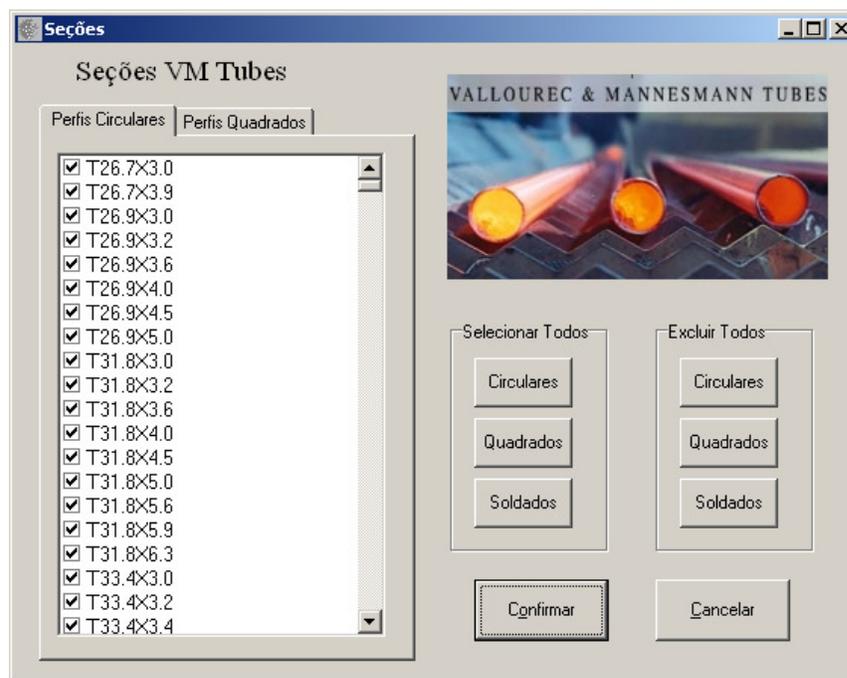


Figura C.17 – Escolha do perfis

- Carregamentos: definição das cargas atuantes na treliça, sendo carregamento positivo no sentido gravitacional, conforme a Figura C.18;

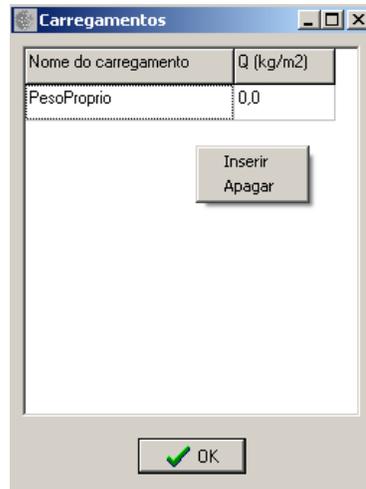


Figura C.18 – Definição dos carregamentos

- Combinações: definição dos coeficientes de ponderação das ações, conforme a Figura C.19;

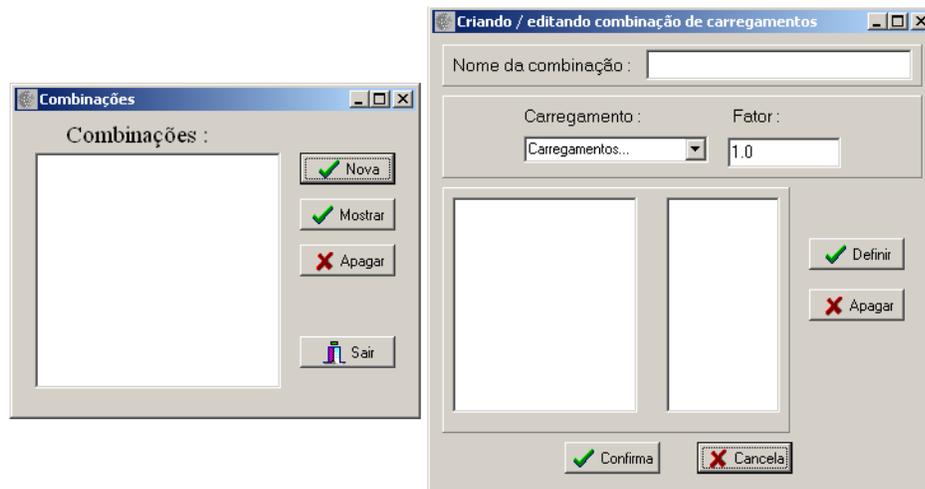


Figura C.19 – Definição das combinações

- Release: permite considerar as barras como elemento de pórtico ou de treliça (apenas com rigidez axial), conforme a Figura C.20.

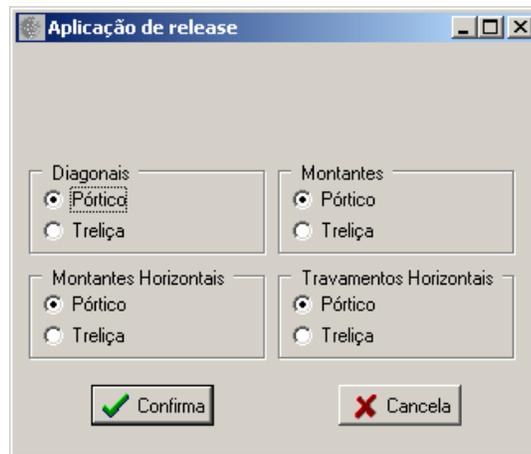


Figura C.20 – Definição dos releases

- Resultados

Após o dimensionamento, o programa apresenta uma tabela com todos os casos analisados, conforme a Figura C.21, que pode ser salva na guia “Arquivo”. Com essa tabela é possível comparar os casos e chegar a uma conclusão de qual a melhor solução, ou se é necessário realizar uma nova análise alterando os dados de entrada.

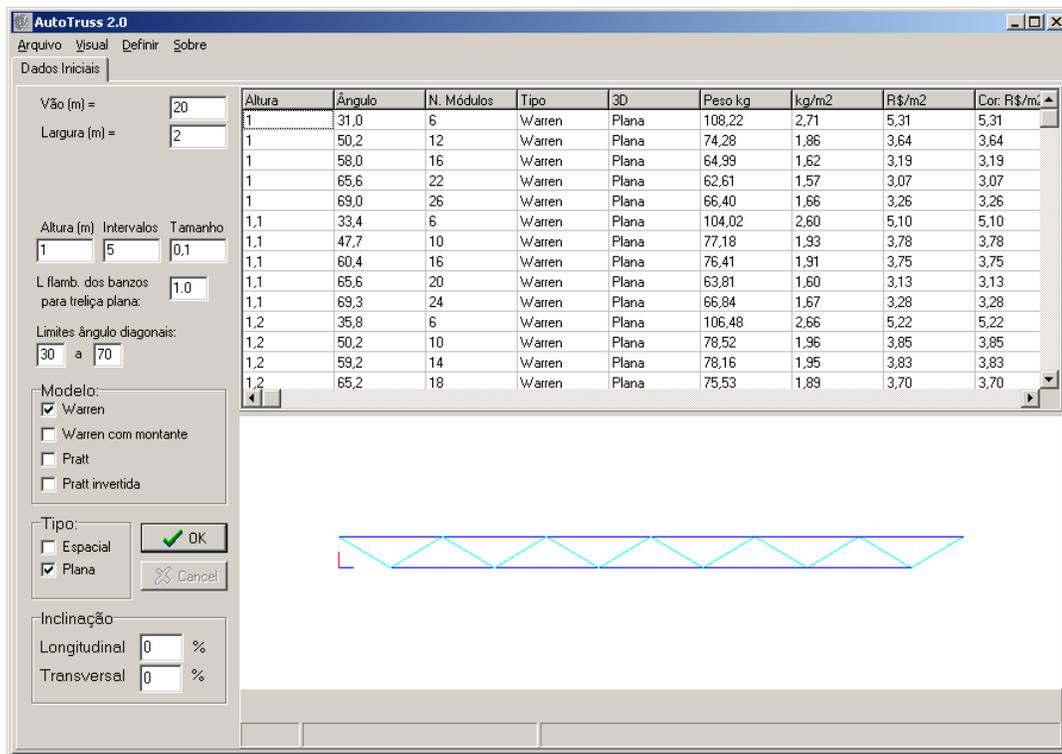


Figura C.21 – Tela do AutorTruss 2.0 com os resultados

Ao seleccionar um determinado caso e clicar com o botão direito sobre ele, irão aparecer algumas opções, como:

- Executar este caso: a treliça seleccionada será desenhada para visualização;
- Exportar este caso *.dxf: a treliça seleccionada será salva em um arquivo “.dxf”, que pode ser aberto no programa AutoCAD;
- Exportar este caso SAP *.s2k v9.03: a treliça seleccionada será salva em um arquivo “.s2k”, que pode ser aberto no programa de análise estrutural SAP2000 [63].
- Ordenar por peso: os casos serão ordenados por peso.

Assim, os resultados obtidos podem ser salvos em planilhas, arquivos do AutoCAD ou do SAP2000 [63] para serem feitas outras análises.