

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**CHRISTIAN GOMES FONTOURA MARTINS**

**PROPOSTA DE PROJETOS DE PASSARELAS MODULARES PARA  
PEDESTRES CONSTITUÍDAS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2019**

**CHRISTIAN GOMES FONTOURA MARTINS**

**PROPOSTA DE PROJETOS DE PASSARELAS MODULARES PARA  
PEDESTRES CONSTITUÍDAS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Fernanda Aiko Kimura

**CURITIBA**

**2019**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### ***PROPOSTA DE PROJETOS DE PASSARELAS MODULARES PARA PEDESTRES CONSTITUÍDAS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO***

Por

**CHRISTIAN GOMES FONTOURA MARTINS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

---

Orientadora – Érica Fernanda Aiko Kimura, Dra.  
UTFPR

---

Prof. José Manoel Caron, MSc.  
UTFPR

---

Prof. Amacin Rodrigues Moreira, MSc.  
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a deus e aos meus pais, pelo apoio e carinho incondicionais; por nunca medirem esforços para me proporcionar a melhor educação e por sempre me inspirarem a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço aos familiares, por todo o incentivo.

Agradeço aos colegas, amigos e companheiros, a todos que estiveram ao meu lado durante essa trajetória e me impulsionaram a acreditar em mim e a alcançar os meus sonhos; pela paciência, pelos conselhos, por estarem sempre próximos.

Agradeço à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Érica Fernanda Aiko Kimura, por toda a dedicação e atenção durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por cada ensinamento e explicação, e por despertar em mim a admiração pela engenharia de estruturas.

Agradeço ao Prof. Me. José Manoel Caron por aceitar compor a banca avaliadora do TCC 1 e TCC 2 e também ao Prof. Me. Charles Jaster de Oliveira por ter aceito compor a banca avaliadora do TCC 1. Agradeço por todas as sugestões e correções, que possibilitaram a melhora contínua em minha formação e na finalização desse trabalho.

Agradeço também ao Prof. Me. Amacin Rodrigues Moreira por ter aceito o convite para compor a banca avaliadora do TCC 2, e pelas contribuições na busca das melhores soluções para esse projeto, juntamente com o Prof. Dr. Eduardo Leite Kruger e a Prof<sup>a</sup>. Dra. Daniela Gutstein.

## RESUMO

MARTINS, C. G. F. **Proposta de projetos de passarelas modulares para pedestres constituídas por perfis de aço formados a frio.** Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Projetos estruturais econômicos visam atingir o menor peso dos elementos constituintes, bem como sua máxima eficiência estrutural. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou a proposição de projetos de estruturas treliçadas modulares de passarelas para pedestres constituídas por perfis de aço formados a frio (seções fechadas de perfis U enrijecidos e perfis tubulares quadrados) para três distintos vãos padrões de rodovias estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Estabeleceu-se, primeiramente, o sistema estrutural com treliças Warren com montantes para um vão de 25 metros como de interesse, o pré-dimensionamento das barras a partir de deslocamentos máximos e raios de giração mínimos, e determinou-se as ações máximas de vento e de variação de temperatura em todo o território nacional, bem como as demais ações aplicáveis. Nesse trabalho também foram estudados e apresentados os parâmetros inerentes à acessibilidade para a definição das dimensões utilizadas. Realizou-se, sequencialmente, o dimensionamento das barras pelas combinações de estados-limites últimos, através da modelagem estrutural no *software SAP 2000* do *Computers and Structures, Inc.*, que utiliza o método dos elementos finitos. Também foram verificados os deslocamentos máximos e a frequência natural mínima da estrutura a partir das combinações dos estados-limites de serviço. A partir do dimensionamento, foram propostas ligações típicas intra-modulares e inter-modulares, bem como padronizações de fabricação, tratamento anticorrosivo, transporte em caminhões simples e montagem de três módulos distintos, norteadas pela redução de tempo, custo e aumento da durabilidade das estruturas. Para o vão de 25 metros, estimou-se os pesos totais da estrutura treliçada da passarela em 75,50 kN.

**Palavras-chave:** Passarelas de pedestres. Perfis de aço formados a frio. Modularização.

## ABSTRACT

MARTINS, C. G. F. **Structural design proposal of modular pedestrian bridges constituted by cold-formed steel framing.** Undergraduate Thesis (Civil Engineering) – Federal and Technological University of Paraná, Curitiba, 2019.

Economy in structural engineering design aims to reach both lower weight of its constituent elements and maximum structural efficiency. In this sense, the present study had the objective of proposing the structural design of modular truss pedestrian bridges constituted by cold-formed steel framing (closed U sections with lips and square hollow sections) to three distinct spans in highways from the National Department of Infrastructure and Transport. There had been established, firstly, the truss of Warren with verticals with a span of 25 meters as the structural system of interest, pre-designed the frames by maximum displacements and minimum radius of gyration, and determined the maximum applicable wind and temperature loads throughout the Brazilian territory, as well as the other applicable loads. In this study, there had been also investigated and presented the parameters related to accessibility in order to define the utilized dimensions. Sequentially, there has been executed the structural design of frames by the combinations of ultimate limit states through structural modeling in the SAP 200 software from Computers and Structures, Inc., which uses the finite element method. Additionally, there had been verified the maximum displacements and the minimum natural frequency of the floor structure from serviceability limit states. From the structural design, this study proposed typical intramodular and intermodular connections, as well as a standardization of manufacturing, anticorrosive treatment, transportation in simple trucks and assembly of three different modules, focusing on reducing time, cost and increasing the durability of structures. For the span of 25 meters, the total weight of the truss structure of the pedestrian bridge had been estimated at 75,50 kN.

**Key-words:** Pedestrian bridge. Cold-formed steel framing. Modularization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Passarelas em rodovias brasileiras com diferentes sistemas estruturais	16
Figura 2 – Tipos de ligações estruturais modulares	18
Figura 3 – Terminologia de pontes treliçadas	19
Figura 4 – Treliça Pratt e suas modificações	20
Figura 5 – Treliça Howe	20
Figura 6 – Treliça Warren e suas modificações	21
Figura 7 – Formatos típicos de perfis formados a frio	22
Figura 8 – Curvas típicas de tensão e deformação do aço	24
Figura 9 – Flambagem local de elementos em compressão	25
Figura 10 – Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal (NBR 14762:2010)	26
Figura 11 – Fluxograma de procedimentos	38
Figura 12 – Constituição estrutural de passarelas com estrutura de interesse em destaque	39
Figura 13 – Seção transversal de vias de pistas simples para Classes Especial e I	39
Figura 14 – Seção transversal de vias de pistas duplas para Classes Especial e I	40
Figura 15 – Sistemas estruturais treliçados mais utilizados para três vãos padrões de rodovias	41
Figura 16 – Subdivisão dos módulos da treliça de interesse Warren com montantes	42
Figura 17 – Esquema das ações aplicáveis consideradas no projeto	43
Figura 18 – Seção transversal da laje em <i>steel deck</i> com guias de balizamento e guarda-corpos	44
Figura 19 – Proposta de cobertura de policarbonato alveolar com estrutura metálica tubular	45
Figura 20 – Amplitudes máximas médias mensais de 1981 até 2010 (Normais Climatológicas do Brasil – Instituto Nacional de Meteorologia)	46
Figura 21 – Mapa de isopletas da velocidade básica do vento (m/s) (NBR 6123:1988)	47
Figura 22 – Vista superior da passarela com direção V90	48
Figura 23 – Coeficiente de arrasto para reticulados com barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados (NBR 6123:1988)	49

Figura 24 – Fator de proteção para reticulados planos paralelos equidistantes (NBR 6123:1988)	50
Figura 25 – Critérios e parâmetros para pré-dimensionamento dos elementos estruturais	54
Figura 26 – Fluxograma de cálculo da força axial de tração resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)	56
Figura 27 – Fluxograma de cálculo da força axial de tração resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)	57
Figura 28 – Ilustração do valor de $ec$ em seção tubular retangular (NBR 8800:2008)	58
Figura 29 – Fluxograma de cálculo da força axial resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)	58
Figura 30 – Fluxograma de cálculo da área efetiva (MLE) para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)	59
Figura 31 – Fluxograma de cálculo da força axial resistente para perfis formados a frio tubulares	60
Figura 32 – Fluxograma de cálculo do momento fletor resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)	61
Figura 33 – Fluxograma de cálculo da força cortante resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)	62
Figura 34 – Fluxograma de cálculo do momento fletor resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)	63
Figura 35 – Fluxograma de cálculo da força cortante resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)	64
Figura 36 – Fluxograma de cálculo do efeito de alavanca e espessura mínima da chapa do flange retangular (NBR 16239:2013b)	67
Figura 37 – Ligação flangeada em perfis tubulares retangulares e efeito de alavanca	68
Figura 38 – Modelagem estrutural da passarela no <i>software</i> SAP 2000	71
Figura 39 – Restrições de apoio das barras da passarela no <i>software</i> SAP 2000	72
Figura 40 – Modelagem estrutural da passarela no <i>software</i> SAP 2000	88
Figura 41 – Detalhamento da ligação inter-modular entre banzos com dimensões em milímetros	89

Figura 42 – Propostas de ligações intra-modulares com chapas de ligação concêntricas	92
Figura 43 – Vistas lateral, superior e corte transversal da passarela dimensionada com vão de 25 m	95
Figura 44 – Dimensões máximas admissíveis para cargas em veículos simples	97
Figura 45 – Propostas de modularização para os demais vãos típicos das rodovias brasileiras do DNIT	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de treliças para pequenos vãos e suas primeiras ocorrências	21
Quadro 2 – Séries comerciais de perfis estruturais e respectivas designações (NBR 6355:2012)	23
Quadro 3 – Parâmetros geométricos básicos para projetos de passarelas em rodovias típicas do DNIT	30
Quadro 4 – Coeficientes de pressão para coberturas planas simétricas (NBR 6123:1988)	51
Quadro 5 – Ações aplicáveis ao projeto	53
Quadro 6 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados (NBR 8800:2008)	55
Quadro 7 – Combinações de esforços solicitantes	65
Quadro 8 – Forças resistentes para ligações soldadas e parafusadas, $t \leq 4,75\text{mm}$ (NBR 14762:2010)	66
Quadro 9 – Deslocamentos máximos	68
Quadro 10 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A653 SQ Gr 50	71
Quadro 11 – Combinações de estados-limites com respectivos coeficientes de ponderação	73
Quadro 12 – Propriedades geométricas das barras dimensionadas para o ELU	74
Quadro 13 – Forças axiais de tração resistentes de cálculo das barras dimensionadas para o ELU	75
Quadro 14 – Forças axiais de compressão resistentes de cálculo das barras dimensionadas para o ELU	76
Quadro 15 – Áreas efetivas resistentes à força axial de compressão para transversinas e banzos	77
Quadro 16 – Áreas efetivas resistentes à força axial de compressão para seções tubulares	78
Quadro 17 – Momento de torção resistente de cálculo para seções tubulares	78
Quadro 18 – Momentos fletores resistentes de cálculo para as transversinas e banzos	79
Quadro 19 – Módulos de resistência elásticos efetivos em relação ao eixo x das seções não tubulares	80

Quadro 20 – Módulos de resistência elásticos efetivos em relação ao eixo y das seções não tubulares	82
Quadro 21 – Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y de seções tubulares	83
Quadro 22 – Forças cortantes resistentes de cálculo dimensionadas para o ELU	84
Quadro 23 – Esforços solicitantes e resistentes máximos de cada elemento dimensionado para os cálculos do esforço resistente e dos deslocamentos	85
Quadro 24 – Combinações máximas de esforços solicitantes para cada elemento de barra	86
Quadro 25 – Deslocamentos máximos da estrutura pela envoltória das combinações do ELS	88
Quadro 26 – Ligações soldadas entre perfis e chapas do flange	90
Quadro 27 – Ligações parafusadas entre chapas do flange retangulares	91
Quadro 28 – Ligações soldadas entre perfis tubulares e chapas de ligação de contraventamentos	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes (NBR 14762:2010)	34
Tabela 2 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações variáveis (NBR 14762:2010)	35
Tabela 3 – Fatores $\Psi_0$ , $\Psi_1$ e $\Psi_2$ para as ações variáveis (NBR 14762:2010)	35
Tabela 4 – Dimensões horizontais de rodovias das Classes Especial e I	41
Tabela 5 – Parâmetros meteorológicos (NBR 6123:1988)	48
Tabela 6 – Coeficientes de arrasto de plano reticulado para V90	50
Tabela 7 – Forças de arrasto para reticulados	51
Tabela 8 – Ações do vento em coberturas aplicadas nos banzos a barlavento e sotavento	52
Tabela 9 – Raios de giração mínimos para cada tipo de elemento	69
Tabela 10 – Pré-dimensionamento dos elementos pelos $r$ e $I_x$ mínimos	70
Tabela 11 – Limitação de esbeltez das barras dimensionadas	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CGDESP	Coordenação-Geral de Desenvolvimento e Projetos
CSI	<i>Computers and Structures, Inc.</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
DDP	Diretoria de Planejamento e Pesquisa
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
FLA	Flambagem Lateral com Torção
FLM	Flambagem Local da Mesa comprimida
FLT	Flambagem Local da Alma
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
OMS	Organização Mundial da Saúde
MLE	Método da Largura Efetiva
MSE	Método da Seção Efetiva
NBR	Norma Brasileira
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$bf$	Largura externa da seção transversal
$bw$	Altura externa da seção transversal
$t, t_n$	Espessura nominal da chapa
$D$	Altura externa do enrijecedor de borda
$f_y$	Tensão limite de escoamento do aço virgem
$f_u$	Tensão limite de resistência à tração do aço virgem
$f_{ya}$	Resistência ao escoamento do aço modificada
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão
$D'$	Soma dos ângulos de dobramento de perfis formados a frio dividida por $90^\circ$
$w^*$	Relação entre o comprimento da linha do esqueleto da mesa da seção transversal de uma barra fletida, ou do comprimento total da seção transversal de uma barra comprimida ou tracionada, e a espessura
$f_{yc}$	Resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil
$r_i$	Raio interno do dobramento
$C$	Razão entre a área total das dobras e a da seção para barras submetidas à compressão ou à tração, ou entre a área das dobras da mesa comprimida e a área total da mesa comprimida quando as barras são submetidas à flexão
$i$	Inclinação de rampas, expressa em porcentagem (%)
$h_d$	Altura do desnível de rampas
$e_e$	Altura do degrau de escadas
$p_e$	Largura do piso de escadas
$R_d$	Resistência de cálculo para ELU
$S_d$	Solicitação de cálculo para ELU
$S_{ser}$	Valores dos efeitos estruturais de interesse para ELS
$S_{lim}$	Valores limites adotados para os efeitos de ELS
$F_r$	Valores representativos das ações
$\gamma_f$	Coefficiente de ponderação
$\gamma_{f1}$	Parcela do coeficiente de ponderação que considera a variabilidade
$\gamma_{f2}$	Parcela do coeficiente de ponderação que considera a simultaneidade

$\gamma_{f3}$	Parcela do coeficiente de ponderação que considera possíveis erros de avaliação
$\gamma_g$	Coeficiente de ponderação para ações permanentes
$\gamma_q$	Coeficiente de ponderação para ações variáveis
$\Psi_0$	Fator de redução para ponderação de ações variáveis no estado limite último
$\Psi_1$	Fator de redução para obtenção dos valores frequentes das ações variáveis no estado limite de serviço
$\Psi_2$	Fator de redução para obtenção dos valores quase permanentes das ações variáveis no estado limite de serviço
$F_d$	Solicitação normal de projeto
$\Sigma$	Somatória
$F_{G_{i,k}}$	Valor característico de ações permanentes
$F_{Q_{1,k}}$	Valor característico de ação variável principal
$F_{Q_{j,k}}$	Valor característico de ações variáveis secundárias
$\Psi_{0j,ef}$	Fator de redução $\Psi_0$ efetivo
$F_{Q,exc}$	Valor da ação transitória excepcional
$F_{ser}$	Combinações de estado limite de serviço
$f_d$	Resistência de cálculo dos perfis formados a frio
$f_k$	Resistência característica ou nominal dos perfis formados a frio
$\gamma_m$	Coeficiente de ponderação da resistência
$N_{t.Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
$N_{t.Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$N_{c.Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c.Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$M_{Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo
$M_{Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo
$V_{Sd}$	Força cortante solicitante de cálculo
$V_{Rd}$	Força cortante resistente de cálculo
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto à compressão
$q$	Pressão dinâmica do vento
$V_k$	Velocidade característica do vento
$V_0$	Velocidade básica do vento

$S_1$	Fator de topografia da velocidade básica do vento
$S_2$	Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno da velocidade básica do vento
$S_3$	Fator de estatística de ocorrência da velocidade
$b$	Parâmetro meteorológico do vento para determinação de $S_2$
$F_r$	Parâmetro meteorológico do vento para determinação de $S_2$
$p$	Parâmetro meteorológico do vento para determinação de $S_2$
$z$	Altura da edificação acima do nível geral do terreno
$F_a$	Força de arrasto
$C_a$	Coeficiente de arrasto
$A_{efr}$	Área frontal efetiva do reticulado
$\varphi$	Índice de área exposta
$c$	Projeção ortogonal da seção da barra sobre uma reta perpendicular à direção do vento
$l_b$	Comprimento da barra prismática
$\eta$	Fator de proteção para reticulados paralelos equidistantes
$e$	Afastamento dos reticulados paralelos
$h$	Largura do reticulado
$h_c$	Altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa da cobertura isolada
$I_2$	Profundidade da cobertura isolada
$\theta$	Ângulo de inclinação das águas da cobertura isolada
$c_{pb}$	Coeficiente de pressão a barlavento para cobertura isolada
$c_{ps}$	Coeficiente de pressão a sotavento para cobertura isolada
$p_{pb}$	Pressão devido a ação do vento a barlavento de cobertura isolada
$p_{ps}$	Pressão devido a ação do vento a sotavento de cobertura isolada
$F_x$	Componente horizontal de força
$F_y$	Componente vertical de força
$K$	Coeficiente de flambagem
$l$	Comprimento destravado do elemento
$A$	Área bruta de seção transversal
$q_l$	Carga uniformemente distribuída linearmente
$I_x$	Momento de inércia em relação ao eixo x

$I_y$	Momento de inércia em relação ao eixo y
$E$	Módulo de elasticidade
$r_x$	Raio de giração em relação ao eixo x
$r_y$	Raio de giração em relação ao eixo y
$A_{n0}$	Área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação
$A_n$	Área líquida da seção transversal da barra na região da ligação
$d_f$	Dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação
$n_f$	Quantidade de furos contidos na linha de ruptura
$s$	Espaçamento dos furos na direção da solicitação
$g$	Espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação
$t$	Espessura da parte conectada analisada
$C_t$	Coefficiente de redução da área líquida
$x$	Excentricidade da ligação
$L$	Comprimento da ligação parafusada
$A_e$	Área líquida efetiva da seção transversal da barra
$l_c$	Comprimento efetivo da ligação com chapa concêntrica
$e_c$	Excentricidade da ligação com chapa concêntrica
$d, b$	Dimensões externas de perfis tubulares retangulares
$A_{ef}$	Área efetiva da seção transversal
$N_e$	Força axial de flambagem global elástica
$N_{ex}$	Forças axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x
$N_{ey}$	Forças axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y
$\chi$	Fator de redução
$\lambda_0$	Índice de esbeltez reduzido
$N_l$	Força axial de flambagem local elástica
$k_l$	Coefficiente de flambagem local para a seção completa
$\sigma, \sigma_n$	Tensão normal de compressão
$b$	Largura do elemento
$\sigma_{cr}$	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento
$k$	Coefficiente de flambagem local do elemento

$I_s$	Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido
$I_s$	Momento de inércia de referência do enrijecedor de borda
$b_{ef}$	Largura efetiva do elemento
$b_{ef1}$	Parcela 1 da largura efetiva do elemento
$b_{ef2}$	Parcela 2 da largura efetiva do elemento
$d_{ef}$	Largura efetiva do enrijecedor
$d_s$	Largura efetiva reduzida do enrijecedor
$\theta$	Ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda
$Q$	Fator de redução total associado à flambagem local
$Q_a$	Fator de redução dos elementos AA
$c_a$	Coeficiente para o cálculo da largura efetiva de elementos AA
$W$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
$W_{ef}$	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
$W_c$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida
$W_{c,ef}$	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida
$M_l$	Momento fletor de flambagem local elástica
$\chi_{FLT}$	Fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem lateral com torção
$M_e$	Momento fletor de flambagem lateral com torção em regime elástico
$C_b$	Fator de modificação para momento fletor não uniforme
$M_{max}$	Máximo valor, em módulo, do momento fletor solicitante de cálculo
$M_A$	Valor no 1º quarto, em módulo, do momento fletor solicitante de cálculo
$M_B$	Valor no centro, em módulo, do momento fletor solicitante de cálculo
$M_C$	Valor no 3º quarto, em módulo, do momento fletor solicitante de cálculo
$M_n$	Momento fletor de flambagem local elástica
$I_g$	Momento de inércia da seção bruta
$I_{ef}$	Momento de inércia efetivo da seção
$h$	Largura da alma para o cálculo da força cortante resistente

$k_v$	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento
$V_{pl}$	Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
$t_w$	Espessura da alma
$T_{Rd}$	Momento de torção resistente de cálculo
$T_{Sd}$	Momento de torção solicitante de cálculo
$h$	Maior comprimento entre as partes planas dos lados da seção transversal para o cálculo do momento de torção resistente de cálculo de seções tubulares retangulares
$W_T$	Módulo de resistência à torção
$H, B$	Dimensões dos lados da seção tubular retangular
$f_w$	Resistência à ruptura da solda
$L$	Comprimento do filete de solda
$t_{ef}$	Garganta efetiva da solda
$t$	Menor espessura da ligação
$h$	Altura do enrijecedor para ligações soldadas
$d_b$	Diâmetro nominal do parafuso
$e$	Distância do centro do furo-padrão à borda mais próxima, na direção da força
$A_b$	Área bruta da seção do parafuso
$f_{ub}$	Resistência à ruptura do parafuso
$t_c$	Espessura de referência
$d_f$	Diâmetro dos furos
$t_f$	Espessura mínima das placas dos flanges
$Q_{a1}$	Força decorrente do efeito da alavanca
$F_{t,Sd}$	Força de tração solicitante de cálculo de um parafuso
$F_{t,Rd}$	Força resistente de cálculo de um parafuso
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$G$	Módulo de elasticidade transversal
$\beta$	Coeficiente de dilatação térmica
$\rho$	Massa específica
$Z_x$	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo x
$Z_y$	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo y

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1	PASSARELAS	15
2.2	SISTEMAS ESTRUTURAIS MODULARES	17
2.3	PERFIS FORMADOS A FRIO	22
2.4	ENQUADRAMENTO NORMATIVO	29
<b>2.4.1</b>	<b>Parâmetros Geométricos</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Dimensionamento e Projeto</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E PROCEDIMENTOS</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE PADRONIZAÇÃO</b>	<b>69</b>
4.1	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS	69
4.2	MODELAGEM ESTRUTURAL	70
4.3	DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS	74
<b>4.3.1</b>	<b>Barras Submetidas à Força Axial de Tração</b>	<b>75</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Barras Submetidas à Força Axial de Compressão</b>	<b>76</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Barras Submetidas a Momento de Torção</b>	<b>78</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Barras Submetidas à Flexão Simples</b>	<b>78</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Esforços Solicitantes e Resistentes</b>	<b>85</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Barras Submetidas à Combinação de Esforços Solicitantes</b>	<b>86</b>
<b>4.3.7</b>	<b>Limitação de Esbeltez</b>	<b>87</b>
<b>4.3.8</b>	<b>Verificação da Frequência Natural da Estrutura de Piso</b>	<b>87</b>
<b>4.3.9</b>	<b>Verificação dos Deslocamentos Máximos</b>	<b>88</b>
4.4	LIGAÇÕES TÍPICAS	89
<b>4.4.1</b>	<b>Ligações Inter-modulares</b>	<b>89</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Ligações Intra-modulares</b>	<b>92</b>
4.5	APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE INTERESSE DIMENSIONADA	95
4.6	FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E MONTAGEM	96
<b>4.6.1</b>	<b>Estimativas de Peso</b>	<b>96</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Fabricação</b>	<b>96</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Transporte</b>	<b>96</b>

<b>4.6.4</b>	<b>Montagem</b>	<b>97</b>
4.7	MODULARIZAÇÃO	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>99</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mobilidade de pedestres apresenta-se como um desafio no planejamento das cidades com o aumento da população urbana, a construção de novas vias e o crescimento do tráfego veicular. O acesso entre dois pontos geográficos separados por obstáculos naturais, como rios ou declives, ou por elementos construídos pelo homem, como rodovias de alto tráfego ou ferrovias, requer soluções rápidas, seguras e confortáveis para a locomoção dos pedestres.

Nesse contexto, instalações em desnível, como as passarelas urbanas, podem ser utilizadas para facilitar o trajeto de pedestres entre duas áreas separadas por barreiras viárias. Essas conexões apresentam-se muitas vezes como soluções não atrativas para os usuários pelo maior tempo e esforço de locomoção requeridos (WU *et al.*, 2014; CANTILLO *et al.*, 2015), pela falta de acessibilidade de acesso e pela sensação de insegurança pessoal relacionada com a integridade das estruturas, iluminações precárias e maiores exposições à assaltos e atos de violência, como demonstram diversos estudos recentes (JAMES *et al.*, 2005; RÄSÄNEN *et al.*, 2007; RANKAVAT; TIWARI, 2016; SINCLAIR; ZUIDGEEST, 2016; OVIEDO-TRESPALACIOS; SCOTT-PARKER, 2017).

A exemplo de outro estudo realizado em Izmir na Turquia, após a observação de pedestres em quatro passarelas distintas e respectivas conduções de questionários, constatou-se que os usuários que não utilizaram as passarelas para a travessia das rodovias tinham ciência do perigo envolvido. Também se observou que como as passarelas por si só não evitam a travessia ilegal, é essencial a adoção de outras medidas como a redução da velocidade veicular nas proximidades, instalação de lombadas e barreiras no centro das rodovias, além de campanhas educacionais aos usuários para incentivar a utilização das mesmas (DEMIROZ *et al.*, 2015). Em relação à integridade física das passarelas, também deve-se realizar manutenções periódicas para garantir a segurança dos usuários, evitando patologias em estruturas metálicas como as corrosões (ODROBIŇÁK; HLINKA, 2016).

Ademais, as passarelas são os meios de travessia que se mostram mais seguros quando se trata das colisões entre veículos e pedestres (ANCIAES; JONES, 2018) e também possibilitam o melhor escoamento do tráfego veicular em rodovias de maior movimento.

Além disso, as passarelas podem ser instaladas através de sistemas construtivos modulares os quais proporcionam rapidez na concepção da estrutura, logística do transporte e montagem, escolha de materiais e determinação dos respectivos custos (DE ROOVER *et al.*, 2002). Sistemas modulares são técnicas de construção baseadas na pré-fabricação das estruturas fora do local destinado com posterior transporte e instalação. Nessa perspectiva, esses sistemas apresentam algumas peculiaridades a serem estudadas como: dimensões limitadas dos módulos devido à capacidade de transporte, necessidade de sistemas e materiais eficientemente leves, presença de danos cumulativos na estrutura devido ao efeito de fadiga decorrente da variação das cargas e, conseqüentemente dos esforços, e segurança dos sistemas conectores (LACEY *et al.*, 2018).

Devido a essas características, em sistemas construtivos modulares, a utilização de perfis de aço formados a frio torna-se uma solução alternativa às usuais estruturas de perfis laminados por apresentarem-se mais leves, reduzirem os custos no transporte e manuseio, e facilitarem a produção dos materiais e a pré-fabricação em larga escala (ZEYNALIAN *et al.*, 2016). Perfis de aço formados a frio são obtidos a partir do dobramento, em prensas dobradeiras, de chapas de aço, tiras, placas ou barras chatas (YU; LABOUBE, 2010) em temperatura ambiente. De acordo com Hancock *et al.* (2001), esses perfis podem ser utilizados como membros estruturais de treliças simples ou tridimensionais, apresentando-se, geralmente, em seções circulares, quadradas ou retangulares.

Outras características desses membros estruturais, quando comparados com outros materiais como madeiras ou concretos, são: alta resistência e rigidez, e qualidade uniforme (YU; LABOUBE, 2010). Como apresentam seções mais esbeltas, ou seja, de elevada relação entre largura e espessura, conseqüentemente desenvolvem diferentes comportamentos em relação à ruptura e deslocamentos em serviço. Uma das particularidades é o surgimento de flambagens locais, o que raramente ocorre em perfis laminados a quente (HANCOCK *et al.*, 2001).

Em vista disso, a utilização de treliças compostas por perfis formados a frio apresenta-se como uma alternativa aos projetos de fabricação e instalação de estruturas modulares para as passarelas nas rodovias brasileiras.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como proposta desenvolver projetos estruturais de passarelas modulares para pedestres constituídas por perfis de aço formados a frio para distintos padrões de rodovias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

Os objetivos específicos são:

- Estabelecer um sistema estrutural mais vantajoso para fins de industrialização;
- Determinar valores extremos para as ações aplicáveis às passarelas de pedestres em todo o território nacional;
- Apresentar deslocamentos e esforços máximos dos elementos a partir do dimensionamento pelos estados-limites últimos e verificações dos estados-limites de serviço;
- Estimar os pesos totais dos módulos estruturais;
- Propor padronização de fabricação, transporte e montagem dos módulos estruturais e respectivas ligações.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Traumas e lesões a partir de acidentes no trânsito representam um dos desafios globais mais inerentes de saúde pública a serem debatidos devido às altas taxas de ocorrência e pela ineficácia de diversos países, principalmente aqueles em desenvolvimento, no que diz respeito à diminuição desse quadro alarmante (CANTILLO *et al.*, 2015). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2013, o número de mortes por lesões no trânsito em todo o mundo alcançou 1,25 milhão, e 90% dessas mortes ocorreram em países de baixa e média renda, os quais detêm 54% de todos os veículos no mundo. Outro aspecto considerável é a porcentagem global de mortes no trânsito de pessoas menos protegidas, como motociclistas, pedestres e ciclistas, que atinge 57% desse total de mortes por lesões no mundo. Ainda nesse contexto, as mortes unicamente de pedestres nas Américas alcançam 22% do total registrado em 2013 (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2015). Nota-se, portanto, a relevância em investigar alternativas de mobilidade urbana que visam a segurança e a preferência aos pedestres em suas travessias. Em vista disso, apesar

dos pedestres preferirem se deslocar em um mesmo nível, na sua trajetória natural (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), as passarelas em rodovias de alto tráfego apresentam-se como soluções eficazes à diminuição de lesões em pedestres no trânsito nas rodovias brasileiras.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes não apresenta consolidação de padronização para os projetos de passarelas urbanas a serem desenvolvidos nas rodovias federais típicas brasileiras administradas pela Coordenação-Geral de Desenvolvimento e Projetos (CGDESP) da Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DDP), apesar de apresentar diretrizes para esses projetos geométricos em manuais de travessias urbanas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) e obras de arte especiais pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (2010).

O estudo estrutural de módulos para a composição das passarelas que atendam a essas típicas e distintas rodovias do DNIT, com a utilização de materiais mais leves e versáteis, como os perfis formados a frio, torna-se relevante com a proposição de projetos para futuras padronizações, visando a segurança, economia e rapidez na concepção, transporte e instalação dessas estruturas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PASSARELAS

Passarelas são pontes destinadas à utilização de pedestres e ciclistas com o potencial de conectar de forma segura dois espaços separados por obstáculos naturais ou outras construções (PARKE *et al.*, 2008; KEIL, 2013). Como essas obras de arte são solicitadas por cargas inferiores às das pontes rodoviárias e ferroviárias, elas apresentam-se, geralmente, com estruturas de elementos leves e esbeltos, possibilitando simplicidade no desenvolvimento de seus projetos.

As passarelas além de funcionais também precisam se engajar com o espaço e o contexto aos quais estão inseridas, estabelecendo uma identidade própria e proporcionando uma experiência satisfatória aos usuários. Além disso, essas estruturas têm o potencial de propiciar vistas urbanas ou paisagísticas de distintas perspectivas (KEIL, 2013) e devem ser constantemente exploradas, nesse sentido, para aumentar a atração dos pedestres.

Outro aspecto intrínseco ao planejamento de uma passarela é sua vinculação com as características físicas e dinâmicas do espaço, como suas rotas de maior fluxo, topografia do terreno e contexto do ambiente (KEIL, 2013). O posicionamento dessas estruturas alinhadas ao fluxo histórico de usuários, o aproveitamento da topografia local para diminuir o esforço dos pedestres e ciclistas, e a possibilidade de visualização das rotas com clareza para evitar a exposição ao vandalismo e à violência (PARKE *et al.*, 2008), são circunstâncias que devem ser consideradas quando se projeta uma interligação segura e confortável.

De acordo com Parke *et al.* (2008), passarelas leves são comumente caracterizadas pelo seu sistema estrutural adotado, como a utilização de vigas, treliças, arcos, cabos estaiados ou pontes em suspensão. Apesar dessa convenção, esses sistemas também podem ser combinados, visando o melhor aproveitamento estético dos materiais e das respectivas resistências.

Pontes constituídas de sistemas estruturais em vigas apresentam principalmente esforços de flexão. Estruturas treliçadas e estaiadas, por outro lado, desenvolvem sobretudo esforços axiais, apesar de também apresentarem esforços fletores secundários. Os sistemas em arcos podem carregar esforços de tração ou compressão pelo eixo de sua curvatura. Ao combinar esses três tipos de esforços

(axial, fletor e através da curvatura) pode-se constituir distintos sistemas estruturais para pontes (TANG, 2018) e, conseqüentemente, para passarelas. Na Figura 1 observa-se alguns exemplos de passarelas construídas em rodovias brasileiras que utilizam esses sistemas estruturais e respectivas junções.

Figura 1 – Passarelas em rodovias brasileiras com diferentes sistemas estruturais



- (a) Passarela com vigas em concreto protendido pré-fabricadas com monocordoalha encapada engraxada localizada na BR 369 em Cambé/PR;
- (b) Passarela metálica com sistema de treliças localizada na PR 445 em Cambé/PR;
- (c) Passarela metálica com arco e treliças localizada na Avenida Piracema em Barueri/SP;
- (d) Passarela estaiada com vigas em concreto localizada na Alameda Rio Branco em Barueri/SP;
- (e) Vista aérea de passarela suspensa e estaiada mista de concreto e aço localizada entre a ponte Cidade Jardim e a confluência das ruas Brigadeiro Haroldo Veloso e Franz Schubert, junto ao Parque do Povo, em São Paulo/SP.

Fonte: RP-SUL Engenharia (2018); Metalsoma (2015); Prefeitura De Barueri (2010); Infraestrutura Urbana (2013); Arcelor Mittal (2008).

Outro aspecto importante são os materiais empregados nessas obras de arte. Os mais utilizados são: madeira, concreto, aço, pedras, alumínio, vidro e polímeros reforçados com fibras de carbono e de vidro (KEIL, 2013).

A cooperação entre a arquitetura e a engenharia de pontes torna-se, portanto, primordial para a concepção das passarelas (PARKE *et al.*, 2008; KEIL, 2013), ao garantir que todos os aspectos estéticos e de utilização sejam examinados com enfoque na mais favorável experiência dos usuários. A engenharia de pontes, nesse contexto, constitui-se como a área de estudos que transita desde a concepção do projeto, passando pela análise, construção e gerenciamento, até a manutenção da obra de arte durante sua vida útil.

## 2.2 SISTEMAS ESTRUTURAIS MODULARES

Sistemas modulares construtivos utilizam a pré-fabricação de elementos estruturais e auxiliares fora do local de destino (LAWSON, 2007; LACEY *et al.*, 2018). A utilização desse sistema permite o desenvolvimento de unidades volumétricas estruturais ou secundárias com alto controle de qualidade e rapidez na construção.

As principais vantagens na utilização de sistemas modulares são a redução do cronograma geral da obra; diminuição do desperdício de materiais; economia devido à repetitividade na produção; menor interferência do ambiente no canteiro de obras; adaptabilidade da estrutura para futuras expansões; e redução de congestionamentos em vias de alto tráfego (LAWSON, 2007; KHAN, 2014; LACEY *et al.*, 2018).

Nesse tipo de sistema, contudo, as dimensões e o peso dos módulos são limitados pelas condições de transportes (muitas vezes por longas distâncias) e, conseqüentemente, acabam restringindo também seus *layouts* internos. Com vãos estruturais menores, elementos mais leves e presença de conexões também entre os módulos, as estruturas modulares podem apresentar elementos com menor rigidez e aumento de danos por fadiga devido a cargas repetitivas e acumulativas. O concreto, o aço e a madeira tradicionais são comumente utilizados nesses sistemas e precisam, portanto, apresentar a maior leveza possível (LACEY *et al.*, 2018), sem prejudicar suas capacidades estruturais.

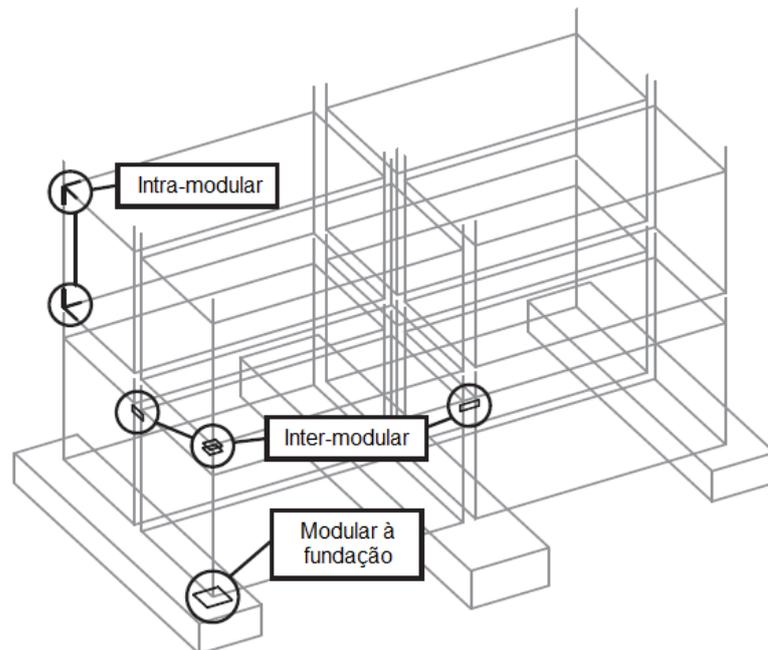
Segundo Lacey *et al.* (2018), a utilização de sistemas estruturais modulares apresenta-se em expansão, bem como a condução de estudos relevantes

relacionados ao comportamento de módulos em aço. Esse material, constituindo elementos metálicos leves, apresenta-se, portanto, como uma alternativa em projetos estruturais que buscam agilidade e redução de custos e prazos.

Nesse contexto, o estudo das ligações dos módulos metálicos é imprescindível na análise das capacidades e deformações dessas estruturas. Essas ligações classificam-se, essencialmente, em três tipos distintos: as intra-modulares, as inter-modulares e as modulares às fundações. As ligações intra-modulares são geralmente realizadas com solda ou parafusos e caracterizam-se pelas ligações dos elementos para a própria formação dos módulos. Em relação às ligações inter-modulares, é relatada a preferência pela utilização de parafusos ou pinos em vez da soldagem no local. Elas podem conectar módulos nas direções horizontal e vertical, e quando os locais a serem parafusados durante a instalação apresentam-se acessíveis, é possível realizar ligações complexas acomodando módulos empilhados nas três dimensões (LACEY *et al.*, 2018).

Na Figura 2 pode-se observar alguns exemplos desses três tipos de ligações.

Figura 2 – Tipos de ligações estruturais modulares



Fonte: Adaptado de Lacey *et al.* (2018)

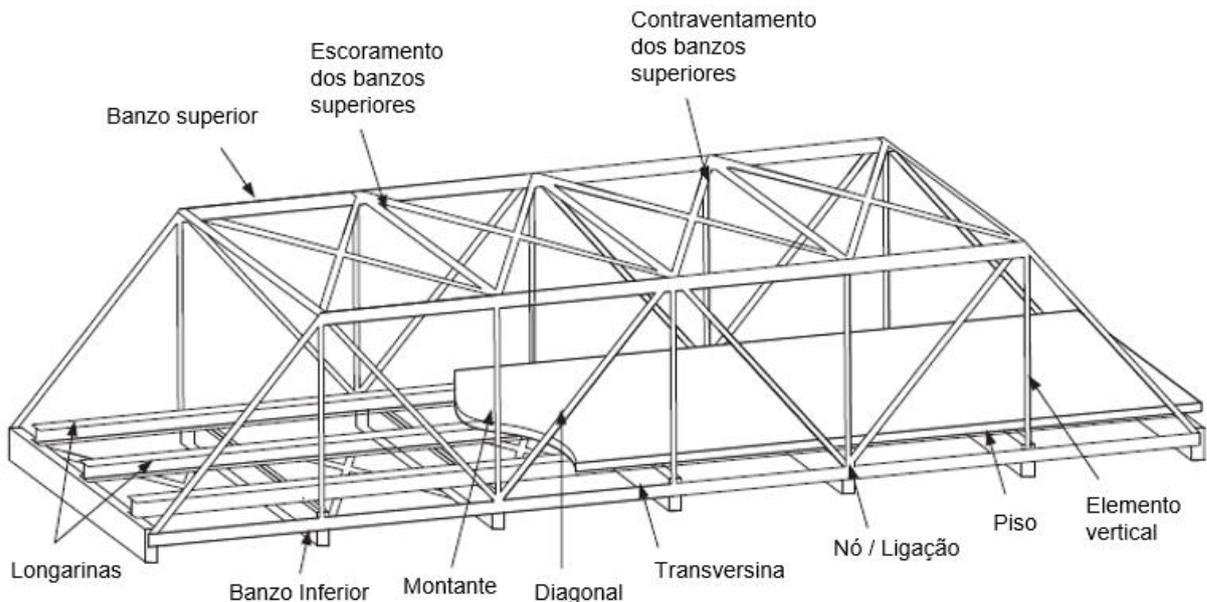
No contexto de sistemas modulares, as pontes metálicas são exemplos de estruturas que normalmente são pré-fabricadas industrialmente em unidades

maneáveis as quais são transportadas e conectadas *in situ*. Por serem constituídas de estruturas leves, também acabam proporcionando fundações econômicas (PARKE *et al.*, 2008). De acordo com Lin e Yoda (2017), estruturas metálicas são largamente utilizadas em pontes ao redor do mundo para configurações e vãos, apresentando soluções para o transporte de automóveis, trens, pedestres e ciclistas. A resistência, a ductilidade, a facilidade de fabricação e o rápido processo construtivo de pontes utilizando o aço são as principais vantagens encontradas quando comparadas aos outros materiais.

Nesse sentido, a utilização do aço nas passarelas metálicas pode apresentar-se em forma de vigas, treliças, cabos suspensos, arcos, ou a combinação desses sistemas. Segundo Parke *et al.* (2008), a utilização de treliças, além de apresentarem elementos leves para o transporte e instalação, também configuram elementos conectados a nós com disposições triangulares, carregando essencialmente esforços axiais em seus limites ao distribuir de maneira mais uniforme suas solicitações. Outra vantagem desse tipo de sistema é a facilidade da sua análise gráfica e da checagem dos seus respectivos resultados.

A terminologia dos principais elementos que constituem as pontes em treliça pode ser observada na Figura 3.

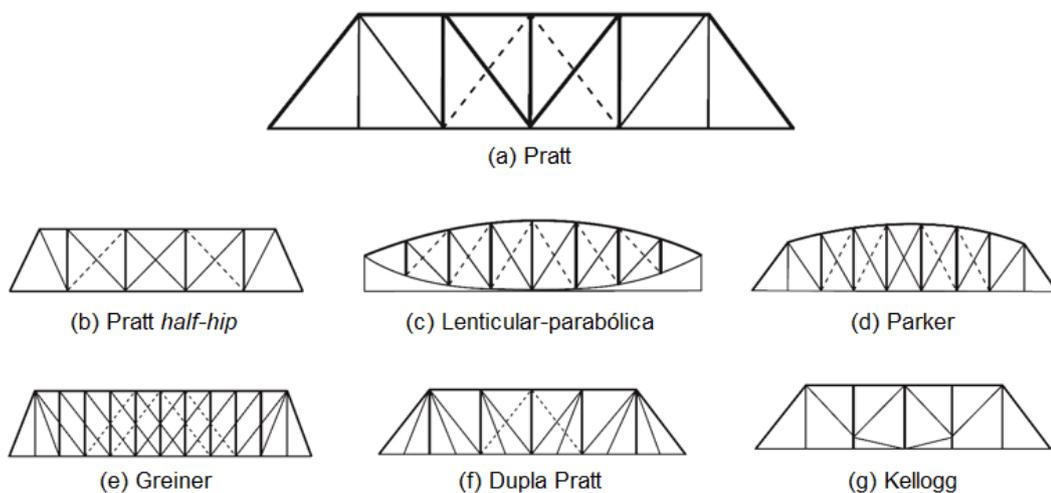
Figura 3 – Terminologia de pontes treliçadas



Fonte: Adaptado de Lin e Yoda (2017).

De acordo com Pipinato (2015), os tipos de treliças mais utilizados para pequenos vãos de até 30 m são as treliças Pratt, Howe, Warren e suas modificações. As treliças Pratt apresentam diagonais em tração descendentes para o centro da estrutura (BROCKENBROUGH; MERRITT, 2011; PIPINATO, 2015). As barras verticais, por sua vez, apresentam esforços de compressão, exceto as barras montantes adjacentes às diagonais extremas da treliça. Na Figura 4 pode-se analisar as configurações principais da treliça Pratt, bem como suas modificações mais usuais.

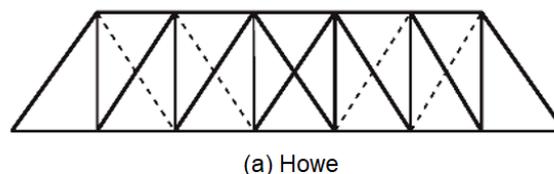
Figura 4 – Treliça Pratt e suas modificações



Fonte: Adaptado de Pipinato (2015).

A treliça Howe apresenta suas diagonais em compressão e as barras verticais em tração (PIPINATO, 2015), representando o inverso da treliça Pratt. Na Figura 5 pode-se analisar a configuração estrutural da treliça Howe.

Figura 5 – Treliça Howe

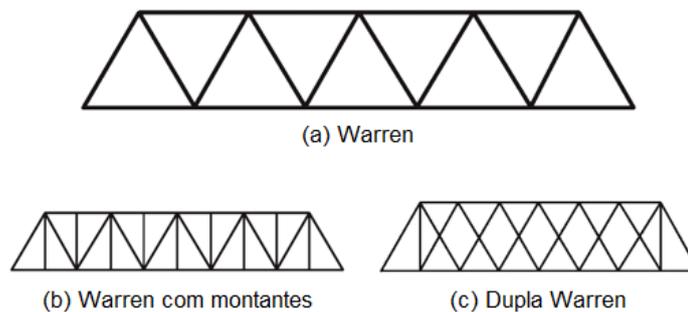


Fonte: Adaptado de Pipinato (2015).

As treliças Warren são caracterizadas pela presença de diagonais alternadas carregando esforços de tração e compressão, também de forma alternada. Essa

configuração apresenta-se favorável, quando ligações rígidas são utilizadas, pois constituem um sistema eficiente em rede. Montantes podem ser incorporados nesse tipo de treliça para reduzir as dimensões dos painéis (PARKE *et al.*, 2008; BROCKENBROUGH; MERRITT, 2011; PIPINATO, 2015). A configuração da treliça Warren e suas principais modificações podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Treliça Warren e suas modificações



Fonte: Adaptado de Pipinato (2015).

Pode-se observar no Quadro 1 as primeiras ocorrências e os vãos típicos em que são utilizadas as treliças Pratt, Warren e Howe, bem como suas respectivas modificações.

Quadro 1 – Tipos de treliças para pequenos vãos e suas primeiras ocorrências

Designação	Vãos típicos	Primeira ocorrência
Pratt	9 - 75 m	1844
Pratt <i>half-hip</i>	9 - 45 m	Final do século XIX
Lenticular-parabólica	5 - 110 m	1878
Parker	12 - 75 m	Final do século XIX
Dupla Pratt	21 - 90 m	1847
Greiner	23 - 75 m	1894
Kellogg	23 - 30 m	Final do século XIX
Warren	15 - 120 m	1848
Warren com montantes	15 - 120 m	Meados do século XIX
Dupla Warren	23 - 120 m	Meados do século XIX
Howe	9 - 45 m	1840

Fonte: Adaptado de Pipinato (2015).

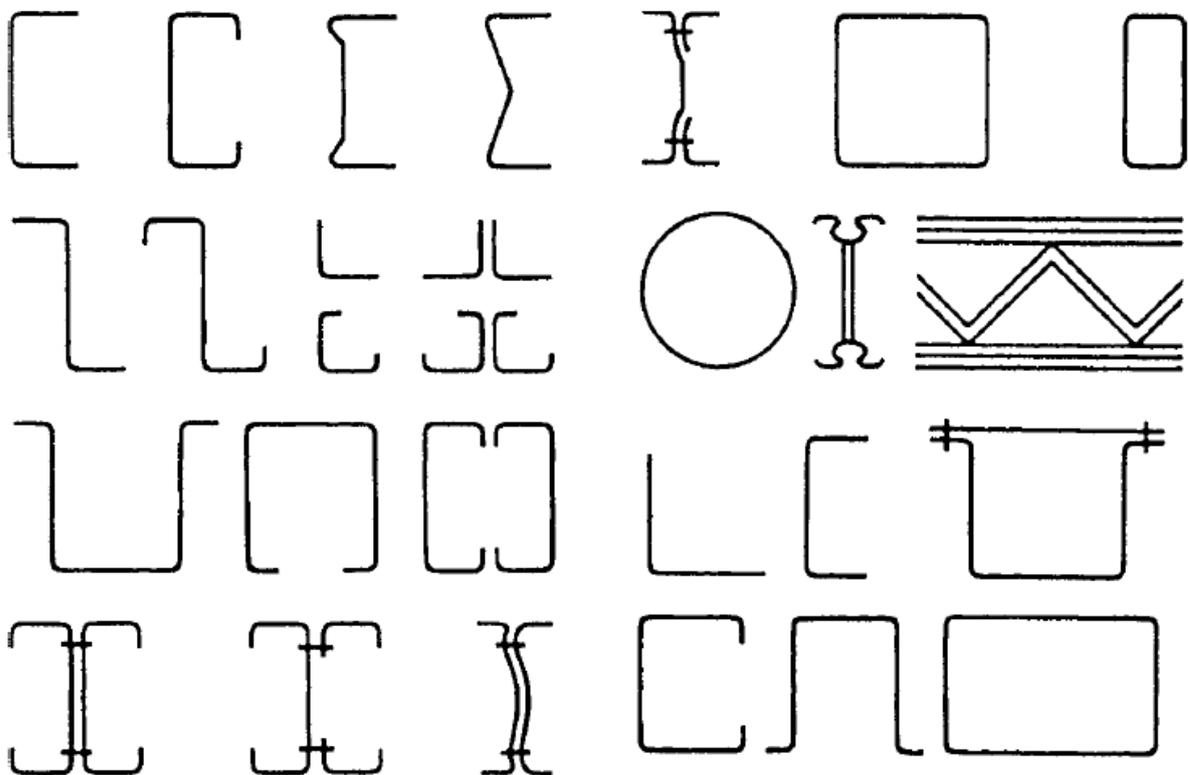
### 2.3 PERFIS FORMADOS A FRIO

Perfis formados a frio são obtidos através do dobramento de chapas planas de aço em temperatura ambiente, modificando suas características mecânicas iniciais (BROCKENBROUGH; MERRITT, 2011; JAVARONI, 2015). Esse dobramento é obtido através de prensas hidráulicas ou pelo uso de perfiladeiras, principalmente quando se realiza a conformação de telhas e tubos.

A utilização desses perfis encontra-se, geralmente, em obras de menor porte, com pequenos vãos e carregamentos de pouca intensidade. Segundo Javaroni (2015), além de estarem presentes em edifícios de pequena altura, residências e galpões, eles também são utilizados como formas para concretagem, andaimes e escoramentos, terças, estruturas em *steel framing*, armações para ferros e longarinas, proporcionando uma vasta versatilidade.

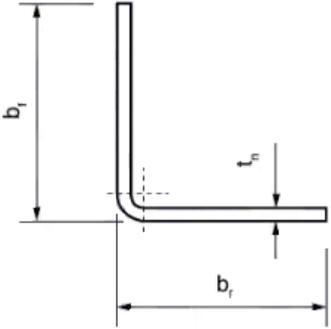
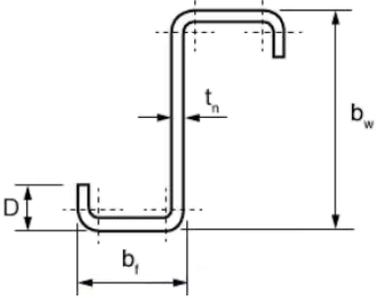
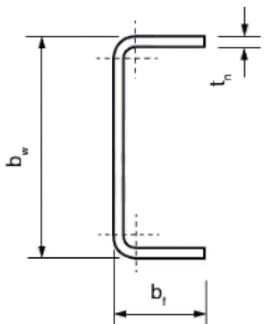
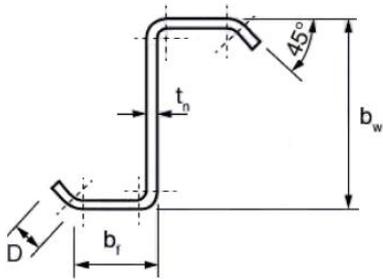
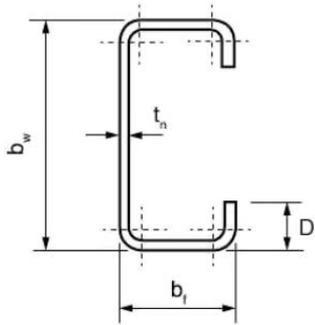
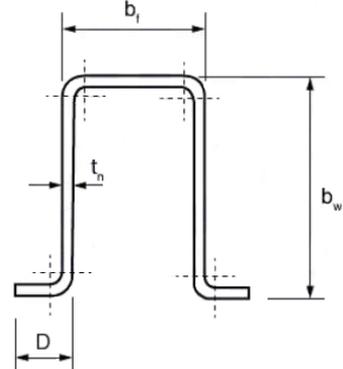
Esses perfis podem apresentar uma diversa variedade de formas de seções transversais, como pode-se observar na Figura 7.

Figura 7 – Formatos típicos de perfis formados a frio



Nesse panorama, a Norma Brasileira (NBR) 6355 de 2012 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), referente aos “Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio – Padronização”, apresenta as características geométricas das principais seções comerciais desses perfis (ABNT, 2012), conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Séries comerciais de perfis estruturais e respectivas designações (NBR 6355:2012)

Série	Seção Transversal e Designação <sup>1</sup>	Série	Seção Transversal e Designação <sup>1</sup>
Cantoneira de abas iguais	 <p><math>L \ b_f \times t_n</math> Exemplo: <b>L</b> 50x3,00</p>	Z enrijecido a 90°	 <p><math>Z_{90} \ b_w \times b_f \times D \times t_n</math> Exemplo: <b>Z</b><sub>90</sub> 200x75x20x2,25</p>
U simples	 <p><math>U \ b_w \times b_f \times t_n</math> Exemplo: <b>U</b> 150x50x2,65</p>	Z enrijecido a 45°	 <p><math>Z_{45} \ b_w \times b_f \times D \times t_n</math> Exemplo: <b>Z</b><sub>45</sub> 200x75x20x2,25</p>
U enrijecido	 <p><math>Ue \ b_w \times b_f \times D \times t_n</math> Exemplo: <b>Ue</b> 150x60x20x2,65</p>	Cartola	 <p><math>Cr \ b_w \times b_f \times D \times t_n</math> Exemplo: <b>Cr</b> 100x50x20x3,35</p>

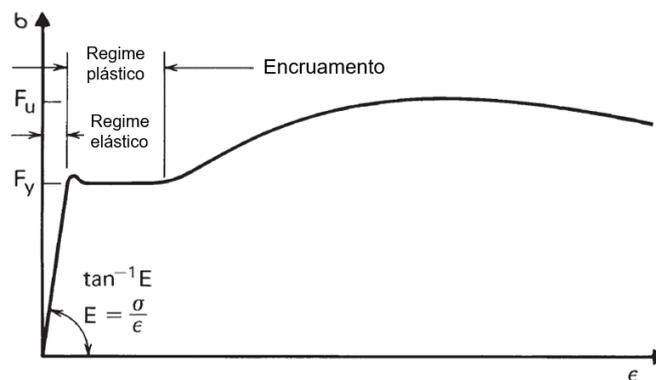
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012).

Nota: <sup>1</sup>As dimensões devem ser apresentadas em milímetros

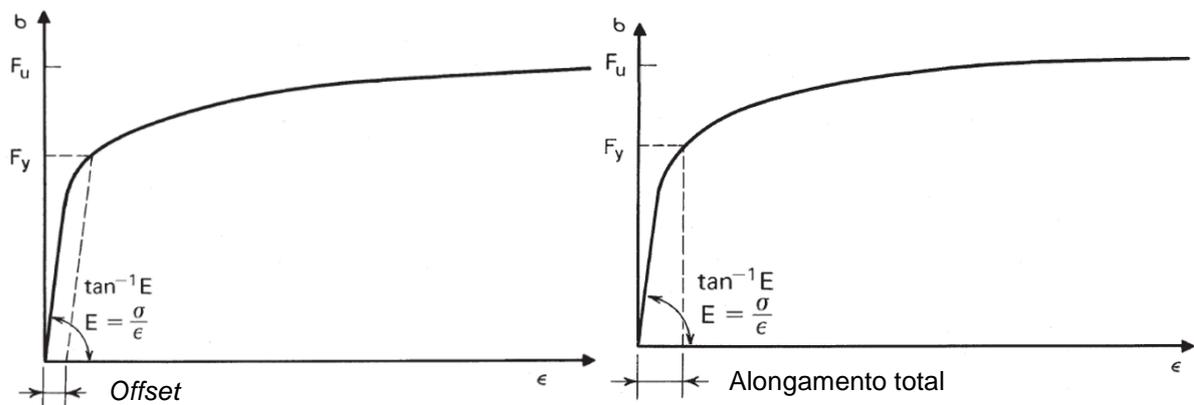
Os perfis formados a frio apresentam algumas diferenças quando comparados aos perfis laminados e soldados como: a favorável relação entre a resistência e a massa; a sua facilidade de produção; e a composição de elementos não combustíveis e leves (BROCKENBROUGH; MERRITT, 2011; YU, 2016). Quanto às características mecânicas, esses perfis apresentam acréscimo na tensão limite de escoamento e na de resistência à tração, redução na ductilidade do aço e surgimento de tensões residuais que se sobrepõem às existentes antes da conformação a frio (JAVARONI, 2015). Esses efeitos são mais pronunciados nas regiões onde se encontram os cantos dobrados dos perfis.

A diferença entre o comportamento de perfis de aço laminados a quente e de perfis de aço formados a frio podem ser observados na Figura 8 com suas respectivas curvas de tensão e deformação.

Figura 8 – Curvas típicas de tensão e deformação do aço



(a) Perfis de aço laminados a quente



(b) Perfis de aço formados a frio com a determinação do limite de escoamento,  $f_y$ , pelos métodos *offset* e *strain-underload*, respectivamente

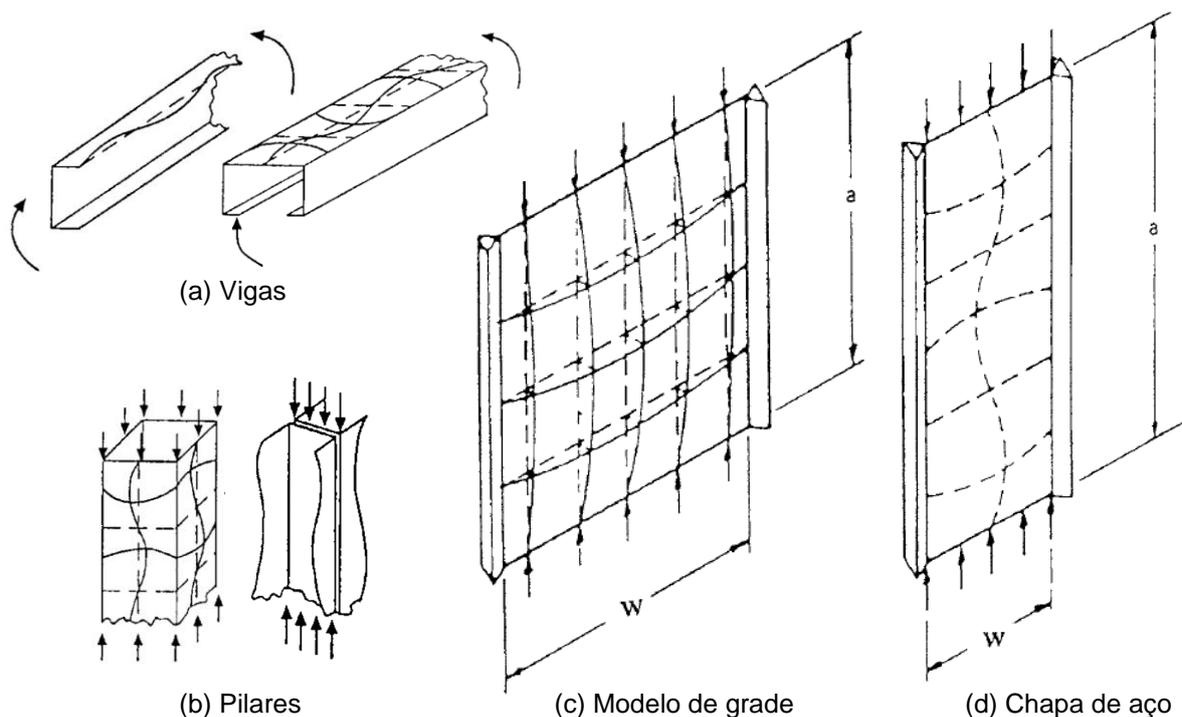
Fonte: Adaptado de Yu e Laboube (2010).

De acordo com Yu e Laboube (2010), existem tipicamente dois tipos de comportamentos para as curvas de tensão e deformação do aço. Uma delas apresenta um limite acentuado entre os regimes plástico e elástico, comportamento típico de aços produzidos por laminação a quente. Outro tipo de curva é quando o limite entre os dois regimes se desenvolve de maneira gradual e ocorre, normalmente, em aços formados a frio.

Para a determinação do limite de escoamento,  $f_y$ , a partir dos gráficos de tensão e deformação dos perfis formados a frio, o autor apresenta dois métodos: o *offset* e o *strain-underload*, recomendados pela norma americana A307 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2012). O primeiro utiliza uma reta paralela à curva no regime elástico, a uma distância de 0,2% de deformação  $\epsilon$ . A projeção no eixo das tensões  $\sigma$  da interseção dessa reta com a curva representa o limite de escoamento  $f_y$ . No segundo método traça-se uma reta vertical cruzando em 0,5% o eixo das deformações, correspondendo a um alongamento total específico, e projeta-se a interseção da reta com a curva de maneira análoga ao método do *offset*.

Nesse contexto, segundo Javaroni (2015), devido à elevada relação entre a largura e a espessura desses perfis, eles estão sujeitos ao surgimento de flambagens locais quando solicitados à compressão, como observa-se na Figura 9.

Figura 9 – Flambagem local de elementos em compressão



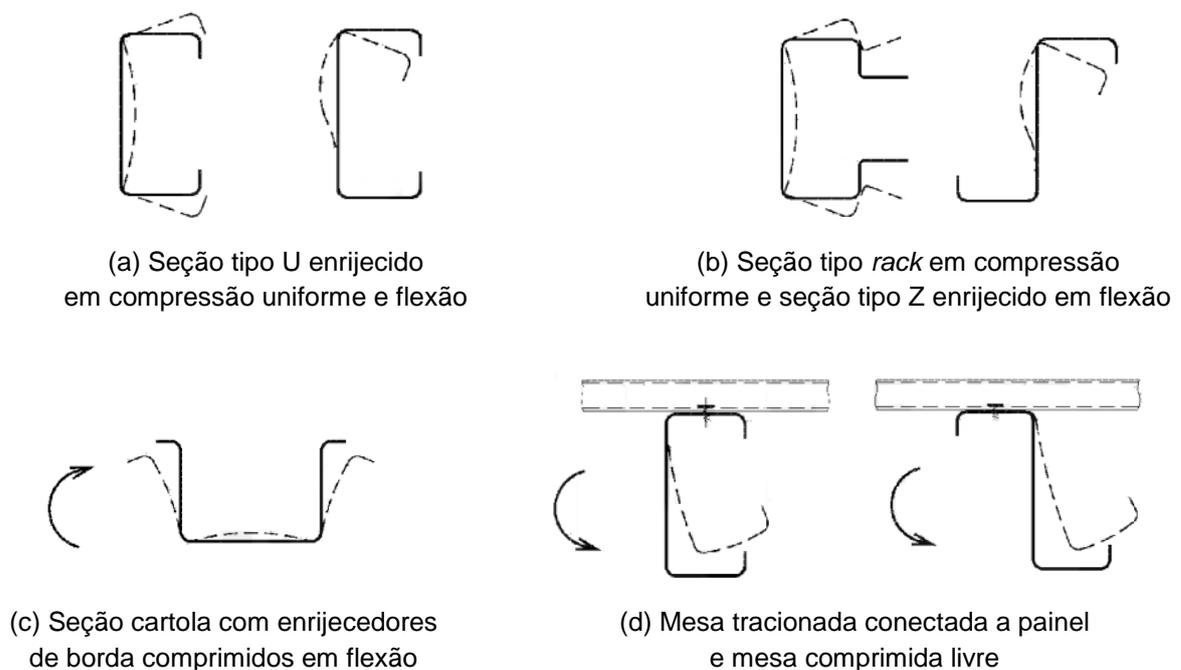
Fonte: Adaptado de Brockenbrough e Merritt (2011).

De acordo com Javaroni (2015), quando essas instabilidades locais surgem, elas não representam, em geral, que a capacidade de resistência das barras se esgotou. Isso se deve pela presença de uma reserva de resistência pós-flambagem antes que o elemento atinja seu escoamento. Ademais, a flambagem local ou o escoamento dos perfis têm início sempre nas partes planas das seções, pois são os locais onde se permanece a resistência ao escoamento do aço virgem.

Um conceito imprescindível ao estudo de perfis formados a frio é o da largura efetiva. Com a reserva de resistência após a flambagem, os perfis ainda apresentam uma região que se demonstra “efetiva” em resistir à carga de compressão antes do escoamento (HANCOCK *et al.*, 2001). Essas larguras são utilizadas para a determinação da resistência desses perfis e variam conforme o enrijecimento dos mesmos (JAVARONI, 2015).

Podem ocorrer também nesses perfis flambagens por distorção da seção, tanto em solicitações de compressão como de tração. Esse tipo de flambagem ocorre quando há mudança na forma da seção transversal, e não somente nos planos das chapas. A reserva de resistência de pós-flambagem nesse caso não existe, o que acaba ocasionando a falha do perfil (JAVARONI, 2015). Exemplos de flambagem por distorção da seção transversal podem ser analisados na Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal (NBR 14762:2010)



Nesse sentido, as propriedades mecânicas de interesse dos perfis formados a frio são as tensões limites do aço de escoamento,  $f_y$ , as de resistência à tração,  $f_u$ , e a ductilidade. Quanto à resistência ao escoamento do aço modificada após a conformação, Javaroni (2015) apresenta a Equação 1 de Lind e Schroff (1975). Essa fórmula adota o limite de resistência à tração do aço virgem para os casos em que se apresenta um ângulo de dobramento  $90^\circ$  sobre um comprimento de cinco vezes a espessura do material. Esse comprimento do arco deve ser modificado proporcionalmente para demais ângulos.

$$f_{ya} = f_y + \frac{5 \cdot D}{w^*} (f_u - f_y) \quad (1)$$

Onde:  $f_{ya}$  = resistência ao escoamento do aço modificada;

$D$  = soma dos ângulos de dobramento dividida por  $90^\circ$ ;

$w^*$  = relação entre o comprimento da linha do esqueleto da mesa da seção transversal de uma barra fletida, ou do comprimento total da seção transversal de uma barra comprimida ou tracionada, e a espessura.

Javaroni (2015) também apresenta outra expressão adotada por Karren (1967), limitada pelas relações ( $f_u/f_y \geq 1,20$ ) e ( $r_i/t \leq 7$ ), e ângulos internos de dobramento até  $120^\circ$ .

As Equações 2, 2.1 e 2.2 representam essa formulação.

$$\frac{f_{yc}}{f_y} = \frac{B_c}{(r_i/t)^m} \quad (2)$$

Onde:  $B_c = 3,69 \frac{f_u}{f_y} - 0,819 \left( \frac{f_u}{f_y} \right)^2 - 1,79$  (2.1)

$$m = 0,192 \frac{f_u}{f_y} - 0,068 \quad (2.2)$$

$f_{yc}$  = resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil;

$r_i$  = raio interno do dobramento;

$t$  = espessura nominal da chapa.

A partir da resistência ao escoamento do aço na região das dobras, obtém-se a resistência ao escoamento do aço modificada,  $f_{ya}$ , realizando-se a média ponderada entre os limites de escoamento dos cantos pelo dos planos, conforme a Equação 3.

$$f_{ya} = C f_{yc} + (1 - C) f_y \quad (3)$$

Onde:  $C$  = razão entre a área total das dobras e a da seção transversal para barras submetidas à compressão ou à tração. No caso de barras submetidas à flexão, é a relação entre a área das dobras da mesa comprimida e a área total da mesa comprimida.

O Estado Limite Último (ELU) para elementos em tração pode representar, portanto, o próprio escoamento da seção bruta, bem como a ruptura da seção transversal efetiva. Quanto aos elementos em compressão, o ELU ocorre pelo escoamento ou pela falha por perda de estabilidade local ou global (JAVARONI, 2015).

Os perfis formados a frio apresentam, em geral, alturas de 50 a 400 mm e espessuras de 2 a 6,35 mm. De acordo com a ABNT (2012), permite-se a utilização de aços de qualidade estrutural, como os aços ASTM, bem como de aços sem qualidade estrutural, como os do tipo SAE, quando apresentarem  $f_y < 180$  MPa e  $f_u < 300$  MPa.

Apesar de amplamente utilizados em construção de pequenos edifícios, eles também estão presentes em carrocerias de automóveis, torres de transmissão e construção de pontes. Para esses casos, também se faz necessário o estudo de solicitações por efeitos dinâmicos e por fadiga, bem como efetivas proteções à corrosão (YU; LABOUBE, 2010).

Nesse sentido, faz-se o uso, normalmente, de tratamentos por galvanização. Além da promover a proteção à corrosão, criando uma barreira à umidade pela excelente aderência e resistência à abrasão, também atua como metal de sacrifício, quando necessário, pela ação do zinco (YU, 2016). Ainda mais, esse tratamento proporciona um acabamento estético externo para esses perfis (HANCOCK *et al.*, 2001).

Quanto às ligações, os perfis formados a frio apresentam-se soldados, através de soldas de filete e as de penetração total ou parcial, e também parafusadas. Quando se analisa as ligações parafusadas, a falha ocorre, geralmente, pelo esmagamento das chapas, em vez do cisalhamento dos parafusos (JAVARONI, 2015).

Nesse panorama, um projeto estrutural econômico visa atingir o menor peso dos elementos constituintes, bem como sua máxima eficiência estrutural. Essa eficiência obtém-se quando todos os elementos estruturais apresentam a mesma resistência para todos os tipos de falhas ao mesmo tempo. Segundo Yu e Laboube (2010), a flexibilidade dos perfis formados a frio, devido a facilidade e diversa variedade de formatos a serem conformados, torna-se uma solução ideal para esse propósito.

## 2.4 ENQUADRAMENTO NORMATIVO

### 2.4.1 Parâmetros Geométricos

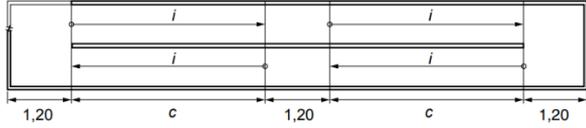
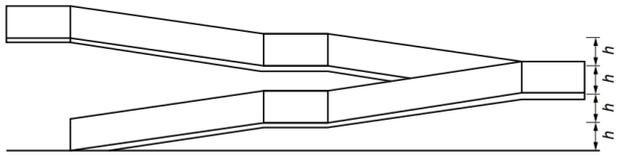
As características geométricas das faixas de domínio para as estradas de rodagem nacionais são apresentadas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1973) no documento “Normas para o Projeto das Estradas de Rodagem” de 1950 e reeditado em 1973. Segundo o artigo 5º dessa normatização, deverão ser consideradas as Classe I, para os projetos das estradas federais do Plano Rodoviário Nacional, e Classe Especial, quando forem previstos tráfegos mistos muito intensos em futuro próximo nessas estradas. Em relação ao transporte dos elementos estruturais de passarelas, os veículos considerados normais apresentam limites geométricos conforme a Resolução N.º 12/98 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 1998).

As informações pertinentes às dimensões admissíveis da seção transversal das passarelas de pedestres, bem como às telas de proteção, encontram-se nos manuais de Projeto de Obras-de-Arte Especiais do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996) e de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas do DNIT (2010). Os parâmetros relacionados à acessibilidade das passarelas, como rampas, escadas, guias de balizamento, corrimãos, guarda-corpos, pisos e relevos táteis de alerta e direcionais e iluminação, são descritos na NBR 9050 (ABNT, 2015). Outros aspectos inerentes ao projeto das passarelas são a ventilação e a drenagem,

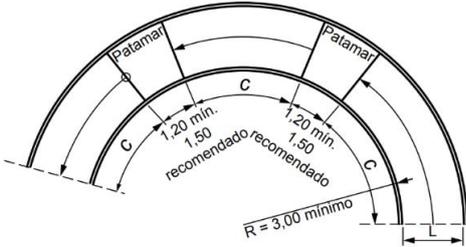
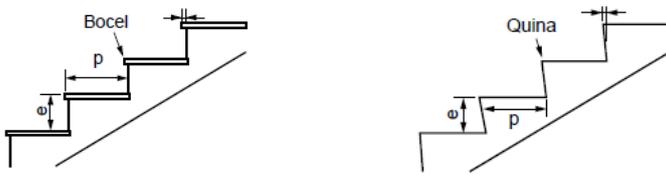
bem como a possibilidade de incorporação de elementos eletromecânicos de circulação vertical, como elevadores.

Nesse contexto, os parâmetros geométricos básicos para projetos de passarelas para pedestres em rodovias típicas do DNIT são dispostos no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros geométricos básicos para projetos de passarelas em rodovias típicas do DNIT (continua)

Aspectos	Designação	Valores	Fonte
Rodovias DNIT	Largura das pistas de rolamento	Classe Especial: 7,50 m Classe I: 7,00 m	DNER, 1973
	Largura dos acostamentos em regiões planas	Classe Especial: 3,00 m Classe I: 2,50 m	
	Largura mínima do refúgio central	6,00 m	
	Altura mínima livre admissível para passagens cobertas	5,50 m	
Transporte com ou sem carga	Largura máxima	2,60 m	CONTRAN, 1998
	Altura mínima livre do solo	4,40 m	
	Comprimento total em veículos simples (exemplo: caminhão trucado)	14,40 m	
Passarelas	Altura mínima livre para passagens cobertas	2,20 m	DNIT, 2010; DNER, 1996
	Largura mínima	2,40 m (recomendável 2,50 m)	
Rampas em trechos retos	Inclinação máxima longitudinal em cada segmento de rampa, $i$	8,33 % (1:12)	NBR 9050 (ABNT, 2015)
	Desnível máximo de cada segmento de rampa, $h_d$	0,80 m	
	Comprimento máximo de rampa entre patamares	50 m	
	Número máximo de segmentos de rampa	15	
	Comprimento mínimo para patamares inicial, intermediários e final	1,20 m	
	Largura das rampas	Conforme fluxo de pessoas (mínima 1,20 m e recomendável 1,50 m)	
	Inclinação máxima transversal para rampas e patamares em ambientes externos	3 %	
 <p>(a) vista superior com dimensões em metros</p>			
 <p>(b) vista lateral</p>			

Quadro 3 – Parâmetros geométricos básicos para projetos de passarelas em rodovias típicas do DNIT  
(continuação)

Aspectos	Designação	Valores	Fonte
Rampas em curva	Inclinação máxima em cada segmento de rampa, $i$	8,33 % (1:12)	NBR 9050 (ABNT, 2015)
	Raio mínimo medido no perímetro interno à curva	3,00 m	
	Comprimento máximo de rampa entre patamares	50 m	
	Número máximo de segmentos de rampa	15	
	Comprimento mínimo para patamares inicial, intermediários e final	1,20 m (recomendável 1,50 m)	
	Largura das rampas	Conforme fluxo de pessoas (mínima 1,20 m e recomendável 1,50 m)	
	Inclinação máxima transversal para rampas e patamares em ambientes externos	3 %	
 <p>(a) vista superior com dimensões em metros</p>			
Escadas	Alturas dos espelhos, $e$ , e larguras dos pisos, $p$	$0,63 \text{ m} \leq p + 2e \leq 0,65 \text{ m}$ $0,28 \text{ m} \leq p \leq 0,32 \text{ m}$ $0,16 \text{ m} \leq e \leq 0,18 \text{ m}$	NBR 9050 (ABNT, 2015)
	Largura das escadas	Conforme fluxo de pessoas (mínima 1,20 m)	
	Distância mínima entre o primeiro e último degrau, de um lance, das áreas de circulação adjacentes	0,30 m	
	Desnível máximo de cada patamar	3,20 m ou sempre quando houver mudança de direção	
	Inclinação máxima transversal para escadas e patamares em ambientes externos	2 %	
	Avanço máximo de bocel e quina de degraus sobre piso	1,5 cm, sem espelhos vazados	
 <p>(a) Bocel <math>\leq 1,5 \text{ cm}</math>      (b) Espelho inclinado com quina <math>\leq 1,5 \text{ cm}</math></p>			

Quadro 3 – Parâmetros geométricos básicos para projetos de passarelas em rodovias típicas do DNIT  
(conclusão)

Aspectos	Designação	Valores	Fonte
Guias de balizamento, corrimãos e guarda-corpos	Altura mínima da guia de balizamento	0,05 m	NBR 9050 (ABNT, 2015)
	Projeção máxima de corrimãos sobre largura de passagem mínima admissível	10 cm de cada lado	
	Prolongamentos longitudinais mínimos para corrimãos	0,30 m	
	Alturas de corrimãos	0,70 m e 0,92 m	
	<p>(a) seção transversal com dimensões em metros</p>		
	Altura mínima de guarda-corpos em relação à via acessível	1,05 m	NBR 9077 (ABNT, 2001)
Telas de proteção	Devem ser consideradas em passarelas nas áreas próximas a escolas, grandes áreas urbanas sem vigilância da polícia, ou com recorrência de lançamentos de objetos		DNIT, 2010
Outros aspectos	Iluminância mínima medida a 1,00 m do piso a partir de iluminação natural ou artificial	150 lux	NBR 9050 (ABNT, 2015)
	Pisos e relevos táteis de alerta e direcionais		

Fonte: Autoria própria.

## 2.4.2 Dimensionamento e Projeto

O projeto de estruturas de aço em perfis formados a frio segue as diretrizes da norma NBR 14762 (ABNT, 2010b), que trata do dimensionamento, à temperatura ambiente, de perfis estruturais formados a frio destinados a estruturas de edifícios ou outras estruturas. Para o dimensionamento de perfis tubulares, por sua vez, é utilizada a NBR 8800 (ABNT, 2008). Em ambas as normas são utilizados os métodos de estados-limites, divididos em estados-limites últimos (ELU) ou estados-limites de serviço (ELS).

São consideradas no método dos ELU as combinações mais desfavoráveis de ações previstas durante toda a vida útil do projeto, durante a construção ou quando houver a atuação de uma ação especial ou excepcional. Já nos estados-limites de serviço, é analisado o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização,

como deformações ou vibrações excessivas as quais podem comprometer a durabilidade da construção. A segurança de cada um dos esforços atuantes na estrutura quanto aos estados limites últimos é expressa pela desigualdade apresentada da Equação 5.

$$R_d \geq S_d \quad (5)$$

Em que  $R_d$  é a resistência de cálculo e  $S_d$  é a solicitação de cálculo dos esforços atuantes, a partir de combinações de forças e fatores de segurança.

Já em relação aos estados-limites de serviço, as condições usuais são expressas pela Equação 6.

$$S_{ser} \leq S_{lim} \quad (6)$$

Em que  $S_{ser}$  representa os valores dos efeitos estruturais de interesse, a partir das combinações de ações, e  $S_{lim}$  representa os valores-limites adotados para esses efeitos.

Nessas normas também são definidas todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura, classificadas em: permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes devem ser consideradas com seus valores representativos com fatores mais desfavoráveis para a segurança, e apresentam-se praticamente constantes durante toda a vida útil da construção. Essas ações representam o próprio peso da estrutura, seus elementos construtivos fixos e instalações permanentes, obtidos através de seus pesos específicos a partir de dados de fornecedores ou da NBR 6120 (ABNT, 1980).

As ações variáveis apresentam variações significativas durante a vida útil da estrutura, e são causadas, comumente, pelo uso e ocupação da edificação, definidas pelas NBR 6120, NBR 8800 (ABNT, 2008) e para passarelas de pedestres, pela NBR 7188 (ABNT, 2013a). Outra ação variável é a decorrente do vento, determinada pela NBR 6123 (ABNT, 1988).

Os esforços causados pela variação uniforme de temperatura da estrutura são causados pela insolação direta e variação da temperatura da atmosfera. Recomenda-se adotar um valor de variação de temperatura na atmosfera “considerando 60% da diferença entre as temperaturas médias máxima e mínima, no local da obra, com um mínimo de 10° C” (ABNT, 2010b). Para elementos estruturais com distribuição não

uniforme, deve-se adotar uma variação linear maior de 5° C entre uma face e outra da estrutura, e para a insolação direta, deve ser feito um estudo específico.

A NBR 7188 (ABNT, 2013a) descreve que em passarelas em estruturas de aço esbeltas, leves, sensíveis a vento e a ação dinâmica dos pedestres “é necessária a comprovação de sua estabilidade global e verificação dos diversos elementos estruturais através de modelos dinâmicos e verificação à fadiga”.

Em relação às ações excepcionais, para passarelas, a NBR 7188 determina uma carga pontual horizontal excepcional sob a passarela no ponto mais desfavorável da estrutura no sentido do tráfego.

Os valores de cálculo das ações são obtidos pela multiplicação de seus valores representativos,  $F_r$ , pelos respectivos coeficientes de ponderação,  $\gamma_f$ , definidos pela Equação 7.

$$\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f2}\gamma_{f3} \quad (7)$$

Em que  $\gamma_{f1}$  é a parcela que considera a variabilidade das ações,  $\gamma_{f2}$  considera a simultaneidade de atuação das ações e  $\gamma_{f3}$  considera possíveis erros de avaliação dos efeitos dessas ações. Para o ELU,  $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$  é representado pelos coeficientes  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$ , apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, e  $\gamma_{f2}$  é igual ao fator de combinação  $\psi_0$ .

Tabela 1 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes (NBR 14762:2010)

Combinações	Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>a</sup>					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Notas: <sup>a</sup> Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis a segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis a segurança não devem ser incluídas nas combinações

Tabela 2 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações variáveis (NBR 14762:2010)

Combinações	Ações variáveis ( $\gamma_q$ )			
	Efeito da temperatura	Ação do vento	Ações truncadas	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Adaptado de Associação Brasileiras de Normas Técnicas (2010b).

Para o ELS, o coeficiente de ponderação  $\gamma_f$ , em geral, é igual a 1,0, e são utilizados fatores de redução  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  para a obtenção dos valores frequentes e quase permanentes das ações variáveis, respectivamente.

Os valores dos fatores de ponderação  $\Psi_0$ ,  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores  $\Psi_0$ ,  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  para as ações variáveis (NBR 14762:2010)

Ações		$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>a</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>b</sup>	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturais em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperaturas em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Notas: <sup>a</sup> Edificações residenciais de acesso restrito;

<sup>b</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

Para a obtenção das solicitações normais de projeto,  $F_d$ , realiza-se a combinação de ações no estado limite último pela Equação 8.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G_{i,k}}) + \gamma_{q1} F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Q_{j,k}}) \quad (8)$$

Onde  $\gamma_{gi}$ ,  $\gamma_{q1}$  e  $\gamma_{qj}$  são os coeficientes de ponderação,  $F_{G_{i,k}}$  representa o valor característico de ações permanentes,  $F_{Q_{1,k}}$  o valor característico de ação variável principal e  $\Psi_{0j}F_{Q_{j,k}}$  os valores reduzidos de combinação das demais ações variáveis.

Também podem ser calculadas combinações últimas para ações especiais ou de construção e ações excepcionais, representadas respectivamente pelas equações 9 e 10.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi}F_{G_{i,k}}) + \gamma_{q1}F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj}\Psi_{0j,ef}F_{Q_{j,k}}) \quad (9)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi}F_{G_{i,k}}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qj}\Psi_{0j,ef}F_{Q_{j,k}}) \quad (10)$$

Onde  $\Psi_{0j,ef}$  representa os fatores de combinação efetivos, iguais aos fatores  $\Psi_{0j}$ , menos quando a ação variável especial  $F_{Q_1}$  tiver um tempo de atuação muito pequeno, adotando-se, então, os valores correspondentes aos fatores  $\Psi_{2j}$ . E por sua vez,  $F_{Q,exc}$  representa o valor da ação transitória excepcional, e as outras parcelas são definidas conforme as combinações normais.

Os coeficientes  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$  representam, respectivamente, as ponderações a serem consideradas em ações permanentes e variáveis. Seus valores variam conforme os tipos de combinações (normais, especiais ou de construção e excepcionais) e também possuem seus valores para os casos favoráveis e desfavoráveis de utilização.

Em relação às combinações de serviço,  $F_{ser}$ , elas classificam-se de acordo com a permanência na estrutura em: quase permanentes, frequentes e raras. As quase permanentes podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, as frequentes se repetem muitas vezes durante esse período e as raras atuam no máximo em algumas horas. Suas formulações são representadas pelas Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j}F_{Q_{j,k}}) \quad (11)$$

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \Psi_1 F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{2j}F_{Q_{j,k}}) \quad (12)$$

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j}F_{Q_{j,k}}) \quad (13)$$

Para a resistência de cálculo desses perfis,  $f_d$ , utiliza-se a Equação 14.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (14)$$

Onde  $f_k$  é a resistência característica ou nominal e  $\gamma_m$  é o coeficiente de ponderação da resistência. No estado limite de serviço o valor de  $\gamma_m$  é igual a 1,0.

As normas também determinam os parâmetros de análise estrutural relativos a diferentes esforços solicitantes nos elementos. As barras submetidas à força axial de tração devem atender a Equação 15, onde,  $N_{t.Sd}$  representa a força axial de tração solicitante e  $N_{t.Rd}$  a força axial de tração resistente de cálculo.

$$N_{t.Sd} \leq N_{t.Rd} \quad (15)$$

Para as barras submetidas à força axial de compressão, de maneira análoga aos esforços de tração, devem atender a Equação 16, onde,  $N_{c.Sd}$  representa a força axial de compressão solicitante e  $N_{c.Rd}$  a força axial de compressão resistente de cálculo.

$$N_{c.Sd} \leq N_{c.Rd} \quad (16)$$

Para as barras submetidas à flexão simples, devem ser atendidas as condições expressas nas Equações 17 e 18.

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (17)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (18)$$

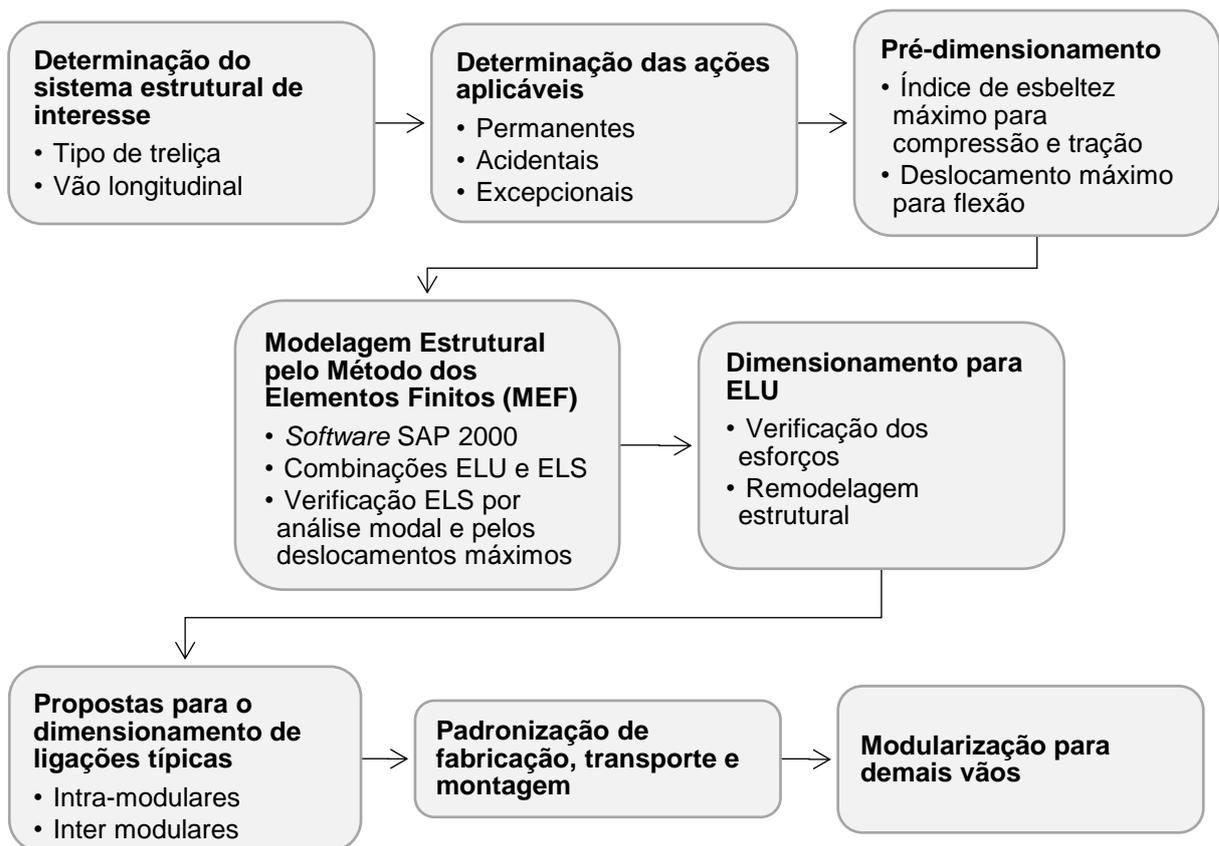
Onde,  $M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo,  $M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo, e os  $V_{Sd}$  e  $V_{Rd}$  são as forças cortantes solicitante e resistente de cálculo, respectivamente. Também devem ser atendidas solicitações de momento torsor e de combinações de esforços.

### 3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas os métodos, procedimentos e ferramentas utilizadas para a proposição de projetos estruturais, padronização de fabricação, transporte e montagem de passarelas modulares para pedestres constituídas por perfis formados a frio para distintos padrões de rodovias brasileiras do DNIT, bem como suas respectivas ligações. Com o intuito de dimensionar e realizar a análise da estrutura, os cálculos foram desenvolvidos de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010b) e NBR 8800 (ABNT,2008).

Os procedimentos do projeto são apresentados no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma de procedimentos

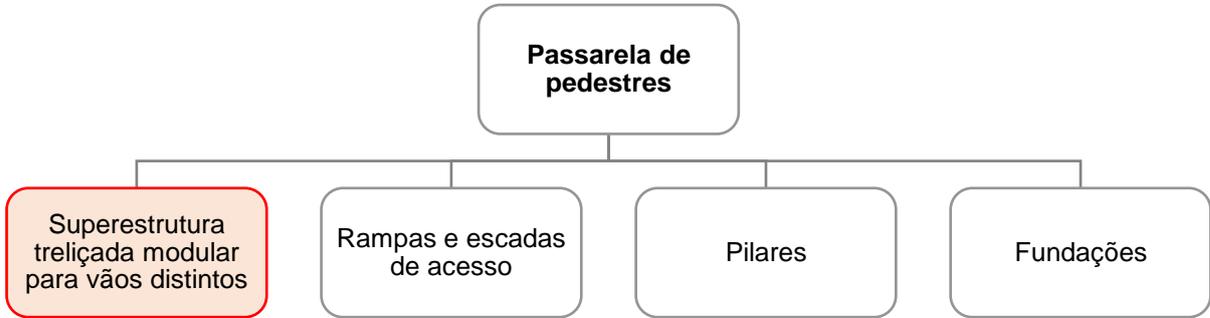


Fonte: Autoria própria.

Para a determinação do sistema estrutural de interesse, primeiramente estabeleceu-se a estrutura a ser estudada. Nesse trabalho foram desenvolvidas propostas de projetos para a superestrutura treliçada modular. Os projetos para as

estruturas dos pilares, fundações, rampas e escadas para o acesso não foram abrangidos nesse trabalho, conforme o esquema da Figura 12.

Figura 12 – Constituição estrutural de passarelas com estrutura de interesse em destaque

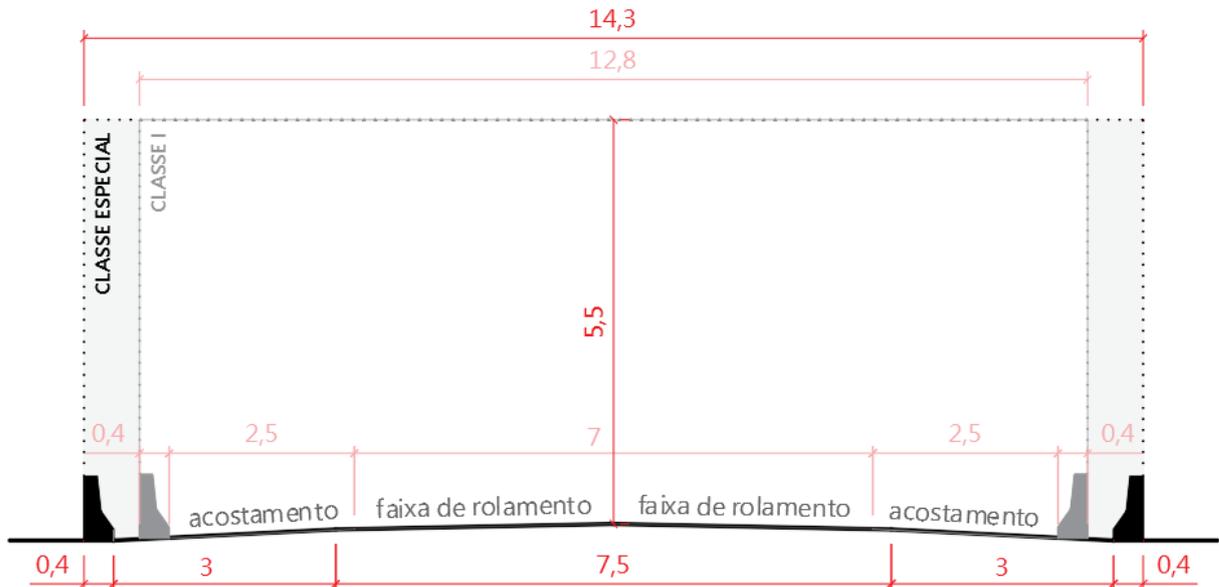


Fonte: Autoria própria.

Para o estabelecimento das dimensões longitudinais da passarela, foram considerados três vãos típicos de rodovias existentes a partir das dimensões de larguras mínimas das pistas de rolamento e seus respectivos acostamentos e refúgios centrais. Também foram consideradas as duas classes para rodovias federais pelo DNIT: Especial e I.

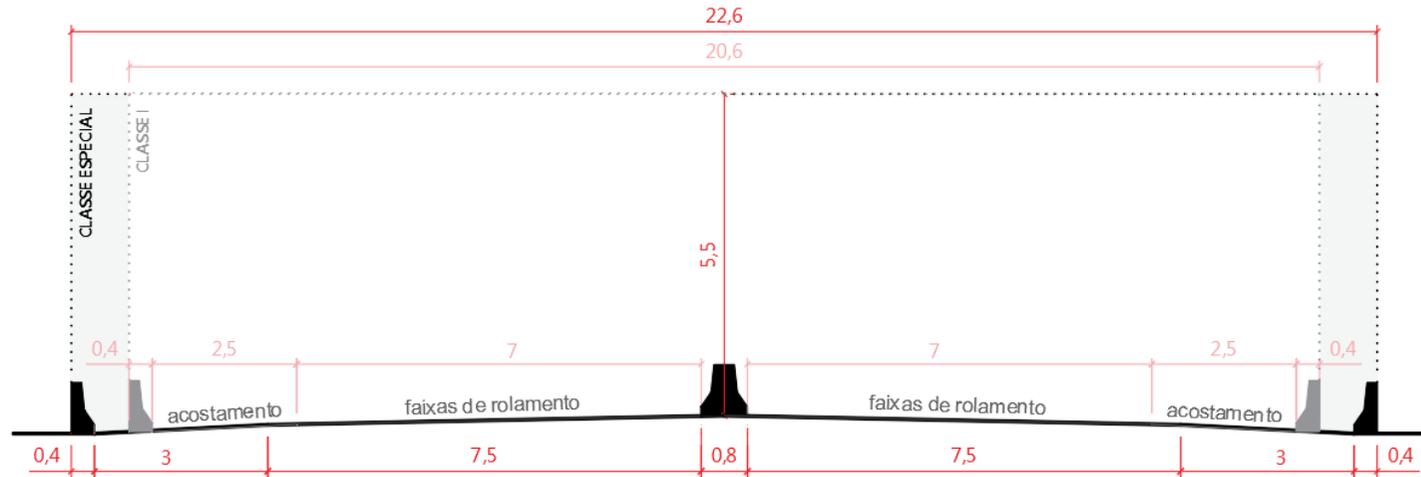
Os vãos típicos para rodovias com pistas simples e rodovias com pistas duplas com e sem refúgio central, são apresentados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. As dimensões encontram-se em metros.

Figura 13 – Seção transversal de vias de pistas simples para Classes Especial e I

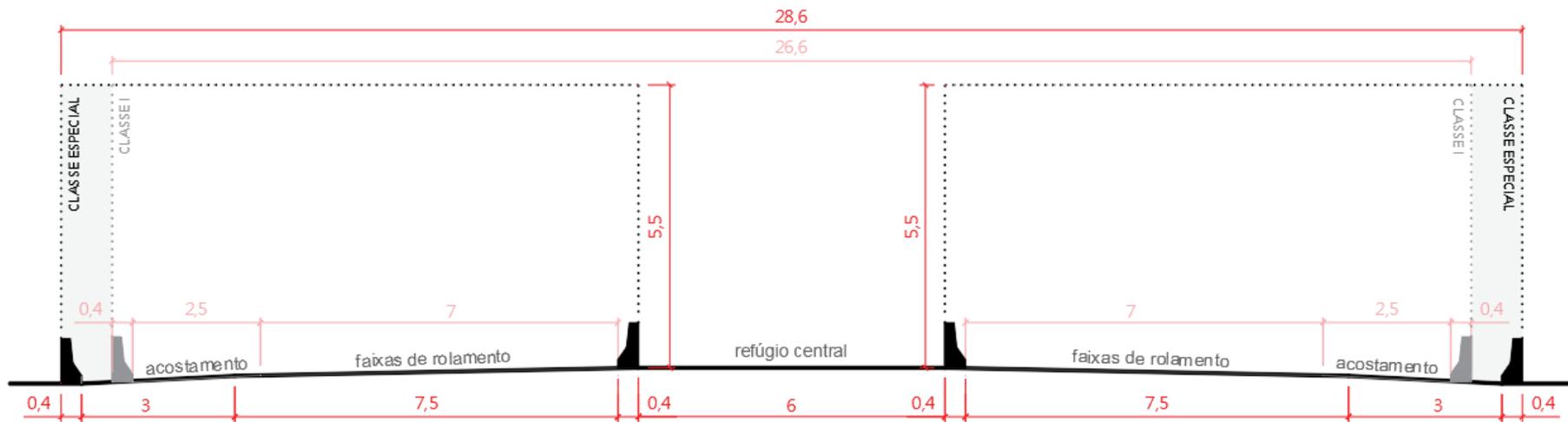


Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Seção transversal de vias de pistas duplas para Classes Especial e I



(a) sem refúgio central



(b) com refúgio central

Fonte: Autoria própria.

A partir dos desenhos esquemáticos, pode-se obter os dados dos gabaritos horizontais, em metros, para três padrões de rodovias do DNIT, conforme a Tabela 4.

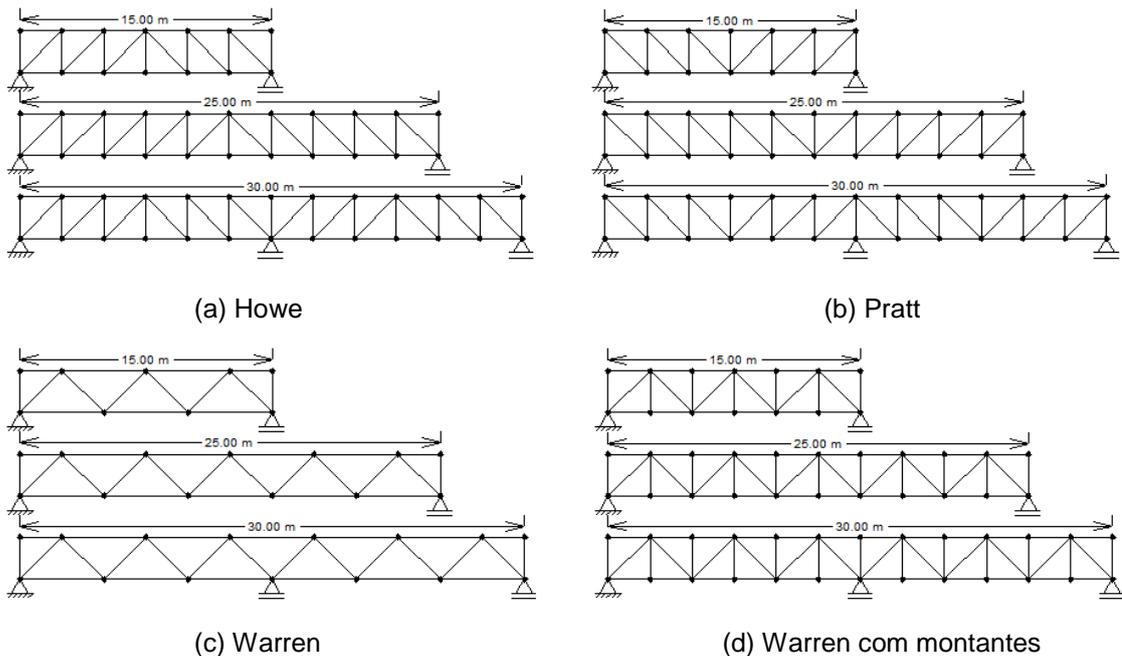
Tabela 4 – Dimensões horizontais de rodovias das Classes Especial e I

Rodovias	Pista simples		Pista dupla sem refúgio central		Pista dupla com refúgio central	
	I	Especial	I	Especial	I	Especial
Barreira de concreto I	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Acostamento I	2,50	3,00	2,50	3,00	2,50	3,00
Faixa de rolamento I	3,50	3,75	3,50	3,75	3,50	3,75
Faixa de rolamento II	-	-	3,50	3,75	3,50	3,75
Barreira de concreto II	-	-	0,40	0,40	0,40	0,40
Refúgio central	-	-	-	-	6,00	6,00
Barreira de concreto III	-	-	0,40	0,40	0,40	0,40
Faixa de rolamento III	-	-	3,50	3,75	3,50	3,75
Faixa de rolamento IV	3,50	3,75	3,50	3,75	3,50	3,75
Acostamento II	2,50	3,00	2,50	3,00	2,50	3,00
Barreira de concreto IV	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Total</b>	<b>12,80</b>	<b>14,30</b>	<b>20,60</b>	<b>22,60</b>	<b>26,60</b>	<b>28,60</b>

Fonte: Autoria própria.

A partir dos parâmetros geométricos básicos, para cada vão de 15, 25 e 30 m, foi estabelecido um sistema estrutural de interesse, a partir dos sistemas treliçados mais utilizados: Howe, Pratt, Warren e Warren com montantes, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Sistemas estruturais treliçados mais utilizados para três vãos padrões de rodovias

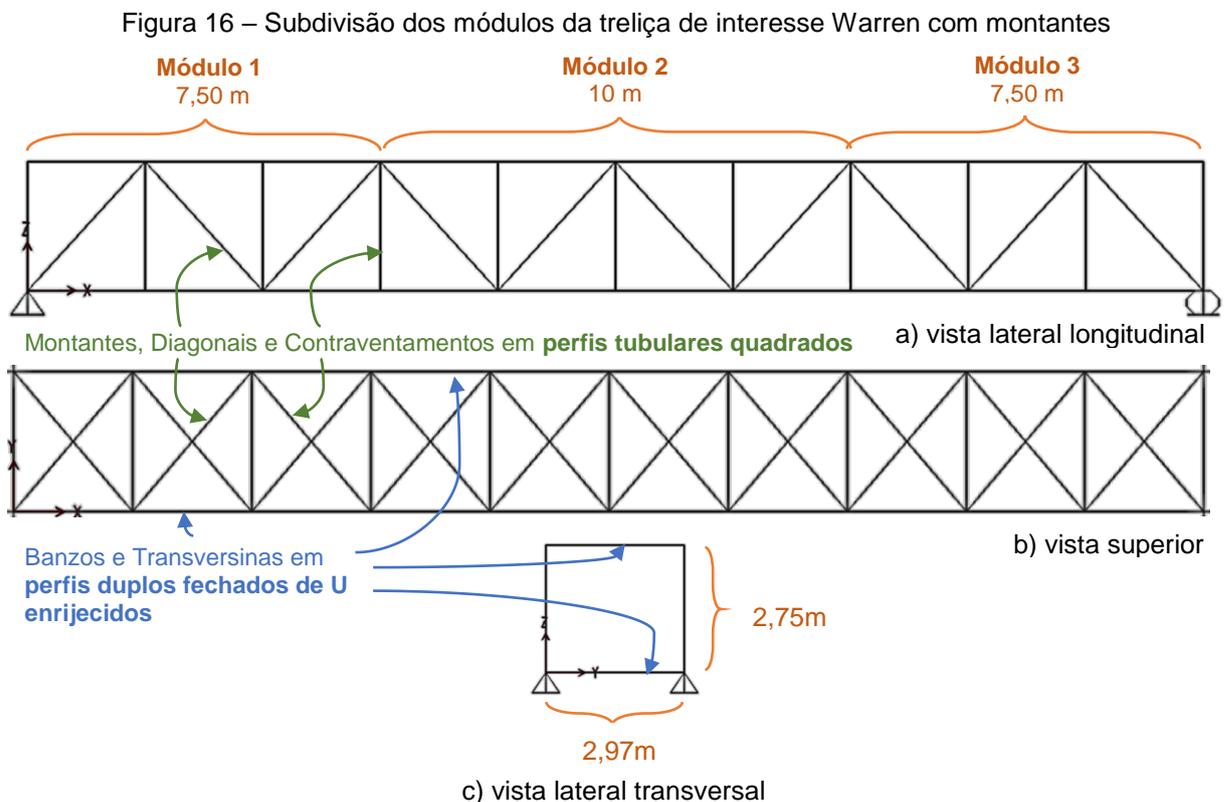


Fonte: Autoria própria.

Para esse trabalho, foi utilizada a treliça tipo Warren com montantes como o sistema estrutural de interesse, devido a alternância de esforços de compressão e tração nas diagonais, possibilitando o estudo de suas máximas capacidades quanto a distintas solicitações. Em relação ao vão, foi utilizado o de 25 m, possibilitando a divisão da passarela em três módulos distintos: 1, 2 e 3, com comprimento de eixos, de 7,50 m, 10 m e 7,50 m, respectivamente, conforme a Figura 16. Os módulos 1 e 3 foram projetados para também constituir as passarelas dos demais vãos.

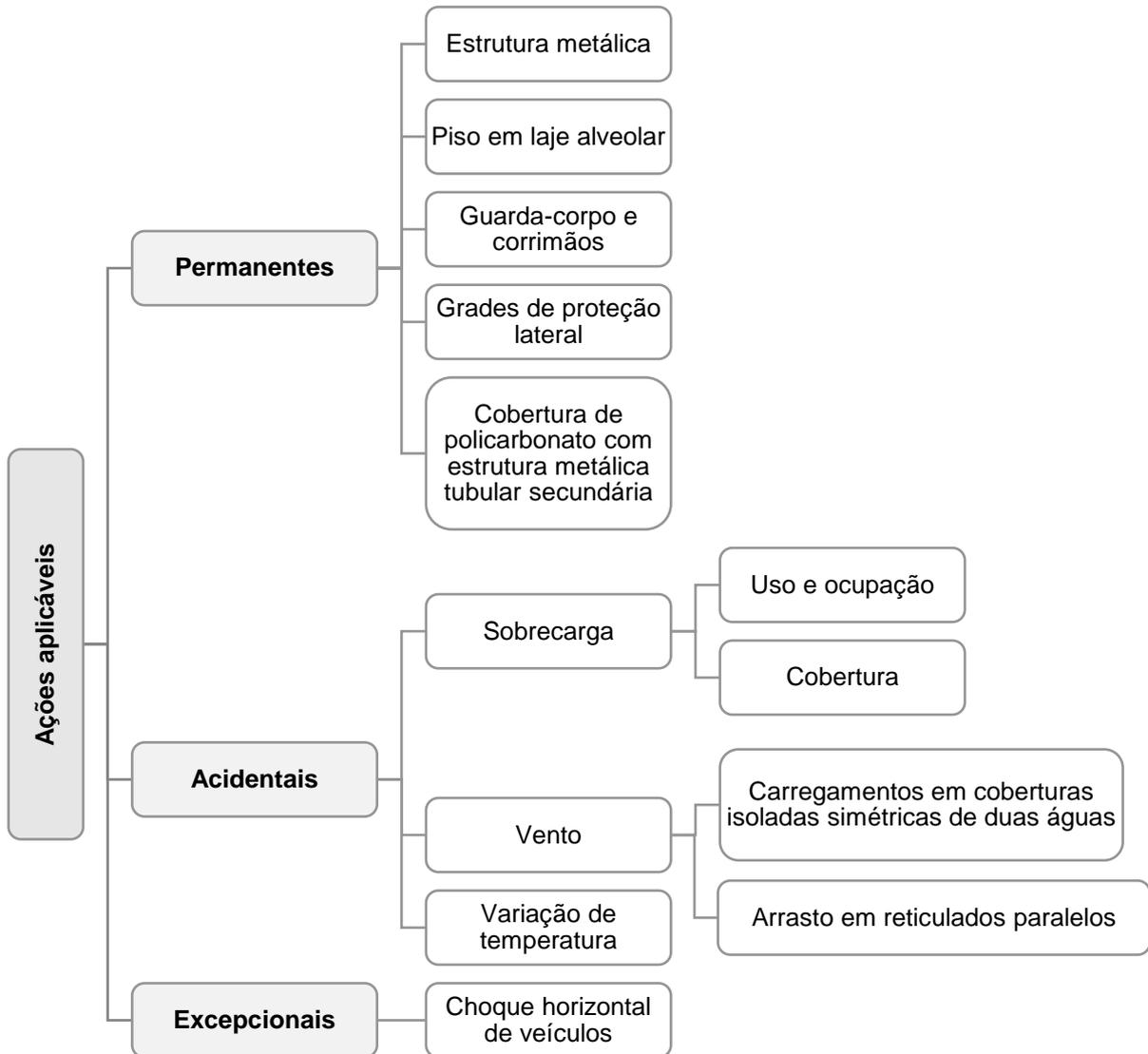
Também foram consideradas transversinas nos planos inferior e superior da passarela, e contraventamentos ligando os nós dos dois planos verticais de treliças Warren com montantes. Serão utilizados perfis duplos fechados com U enrijecidos para os banzos e transversinas e perfis tubulares quadrados para os montantes, diagonais e contraventamentos, devido à maior rigidez de seus elementos.

Também são estabelecidas as dimensões de eixo da largura e altura da passarela: 2,97 m e 2,75 m, respectivamente. Essa largura foi estabelecida a partir das larguras das lajes em *steel deck*, do espaço entre a laje e os demais elementos ligados às transversinas e também das larguras dos banzos. A altura foi determinada para atender a altura mínima livre para passarelas, de 2,20 m.



Em relação às ações aplicáveis, são apresentadas na Figura 17 as respectivas ações permanentes, acidentais e excecional consideradas nesse projeto.

Figura 17 – Esquema das ações aplicáveis consideradas no projeto



Fonte: Autoria própria.

As ações referentes ao peso próprio da estrutura foram consideradas diretamente na modelagem estrutural, com a inserção dos elementos com cada perfil utilizado, junto com suas respectivas áreas de seção transversal e pesos específicos.

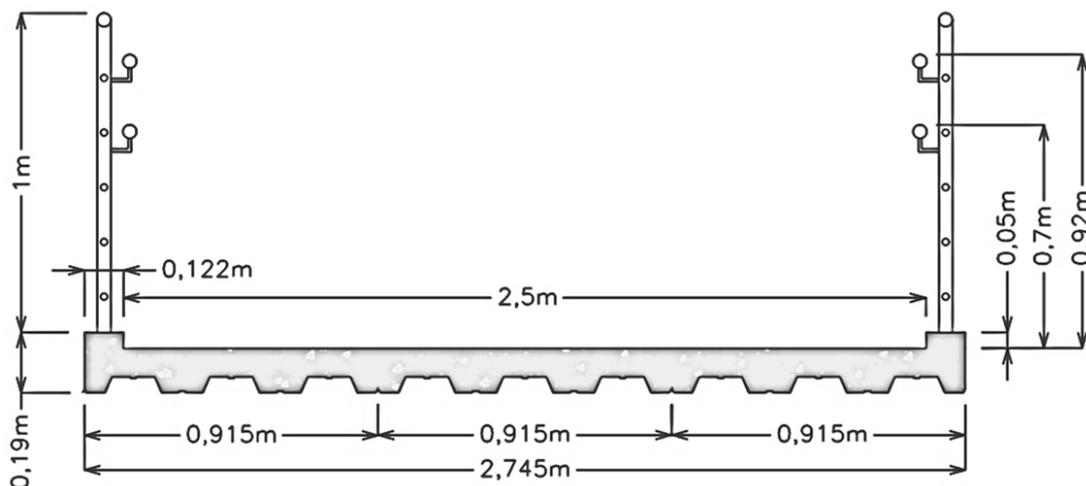
O piso também foi considerado como peso permanente. Para esse projeto foram utilizadas lajes com três *steel decks* de aço galvanizado ASTM A 653 Grau 40 com tensão de escoamento,  $f_y$ , de 280 MPa sobrepostos por concreto de 24 kN/m<sup>3</sup> e  $f_{ck}$  de 20 MPa com armadura em tela soldada. Cada *steel deck* apresenta comprimento de 2,50 m, espessura de 0,95 mm e largura de 915 mm (totalizando

2,745 m). Essa laje em *steel deck* possui peso próprio de  $2,80 \text{ kN/m}^2$  e será biapoiada e ligada às transversinas por conectores de cisalhamento *stud bolts*.

Foram considerados guarda-corpos com corrimãos acoplados em tubos de aço inox instalados sobre guias de balizamento das lajes em *steel deck*. A carga distribuída vertical para essas estruturas foi de  $2,0 \text{ kN/m}$ , a partir da NBR 7188 (ABNT 2013) que estabelece essa carga mínima para guarda-corpos para pontes e viadutos. Esses elementos podem ser observados na Figura 18 com suas respectivas dimensões.

A partir desses dados, o peso das lajes com guias de balizamento, guarda-corpos e corrimãos será considerado como uma carga distribuída de  $10,08 \text{ kN/m}$  nas transversinas centrais e  $5,04 \text{ kN/m}$  nas transversinas extremas.

Figura 18 – Seção transversal da laje em *steel deck* com guias de balizamento e guarda-corpos



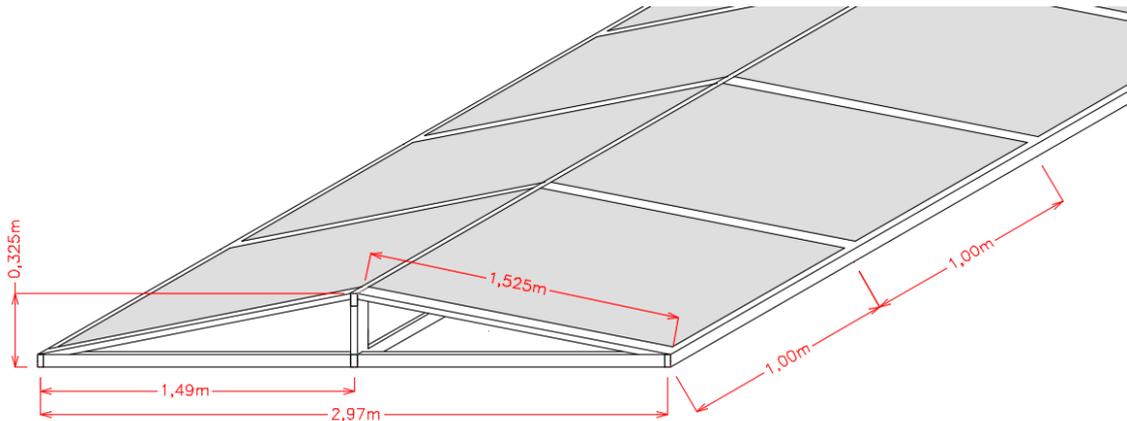
Fonte: Autoria própria.

As grades laterais de proteção, instaladas internamente às diagonais, montantes e banzos, foram consideradas como chapas expandidas de  $0,1 \text{ kN/m}^2$ .

Também foram consideradas coberturas de duas águas planas simétricas de policarbonato alveolar de  $10 \text{ mm}$  de espessura com peso de  $0,017 \text{ kN/m}^2$ . Essas coberturas apresentam estruturas metálicas secundárias tubulares para a sustentação e instalação do policarbonato. Considerando perfis tubulares retangulares de  $30 \times 60 \text{ mm}$  e espessura de  $0,9 \text{ mm}$ , o peso linear dos perfis da estrutura da cobertura é de  $0,0267 \text{ kN/m}$ , a partir de catálogo de fabricantes.

O peso total da cobertura de policarbonato com a estrutura metálica secundária será transmitido verticalmente nos nós dos banzos superiores (a cada 2,50 m), com cargas de 0,22 kN nos nós extremos dos banzos e 0,45 kN nos nós centrais. Na Figura 19 pode ser observada essa proposta de cobertura, bem como suas dimensões. Foram utilizadas inclinações para as coberturas de 21,81%.

Figura 19 – Proposta de cobertura de policarbonato alveolar com estrutura metálica tubular



Fonte: Autoria própria

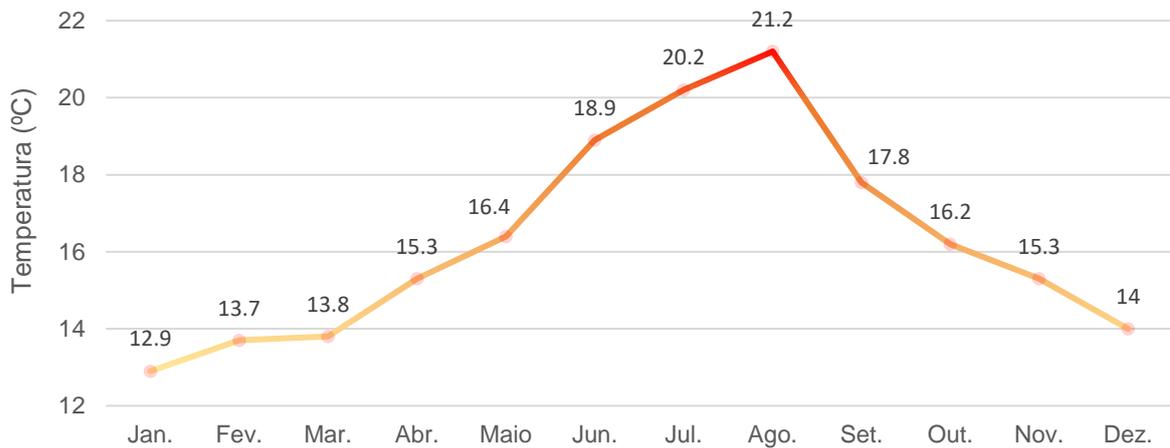
Serão consideradas nesse projeto a aplicação de sobrecarga de cobertura, carga móvel em passarelas, vento e variação de temperatura. Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), em coberturas comuns, deve ser prevista a sobrecarga mínima característica de 0,25 kN/m<sup>2</sup>, em projeção horizontal. Essa sobrecarga será transmitida sobre os nós dos banzos superiores como forças verticais de 1,86 kN sobre os nós centrais e 0,93 kN sobre os nós nas extremidades.

A carga móvel é definida pela NBR 7188 (ABNT, 2013a) como uma carga uniformemente distribuída, aplicada sobre o pavimento entre os guarda-corpos, de 5,0 kN/m<sup>2</sup>. Essa solicitação será aplicada como uma carga uniformemente distribuída de 10,86 kN/m sobre as transversinas centrais e 5,43 kN/m sobre as transversinas extremas.

As ações devido a variações de temperaturas serão analisadas a partir dos dados de amplitudes médias térmicas máximas brasileiras obtidas a partir de 332 estações meteorológicas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dos Normais Climatológicas do Brasil de 1981 até 2010. Foram obtidos os valores das temperaturas médias máximas e mínimas mensais de todos esses anos, e calculadas suas respectivas amplitudes máximas médias mensais e anual. A amplitude média

máxima anual encontrada foi de 15,8 °C e as mensais podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 – Amplitudes máximas médias mensais de 1981 até 2010 (Normais Climatológicas do Brasil – Instituto Nacional de Meteorologia)



Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Meteorologia (2010).

Considerando a maior amplitude média em território nacional como 21,2 °C, durante o mês de agosto, a amplitude térmica na análise estrutural corresponderá a 60% desse valor, portanto, 12,72 °C.

As ações de vento são definidas conforme NBR 6123 (ABNT, 1988), com base na pressão dinâmica do vento,  $q$ , abrangendo as situações mais desfavoráveis encontradas no território nacional, onde poderiam ser instaladas as passarelas pelo DNIT. A velocidade característica deve ser calculada conforme as Equações 27 e 28.

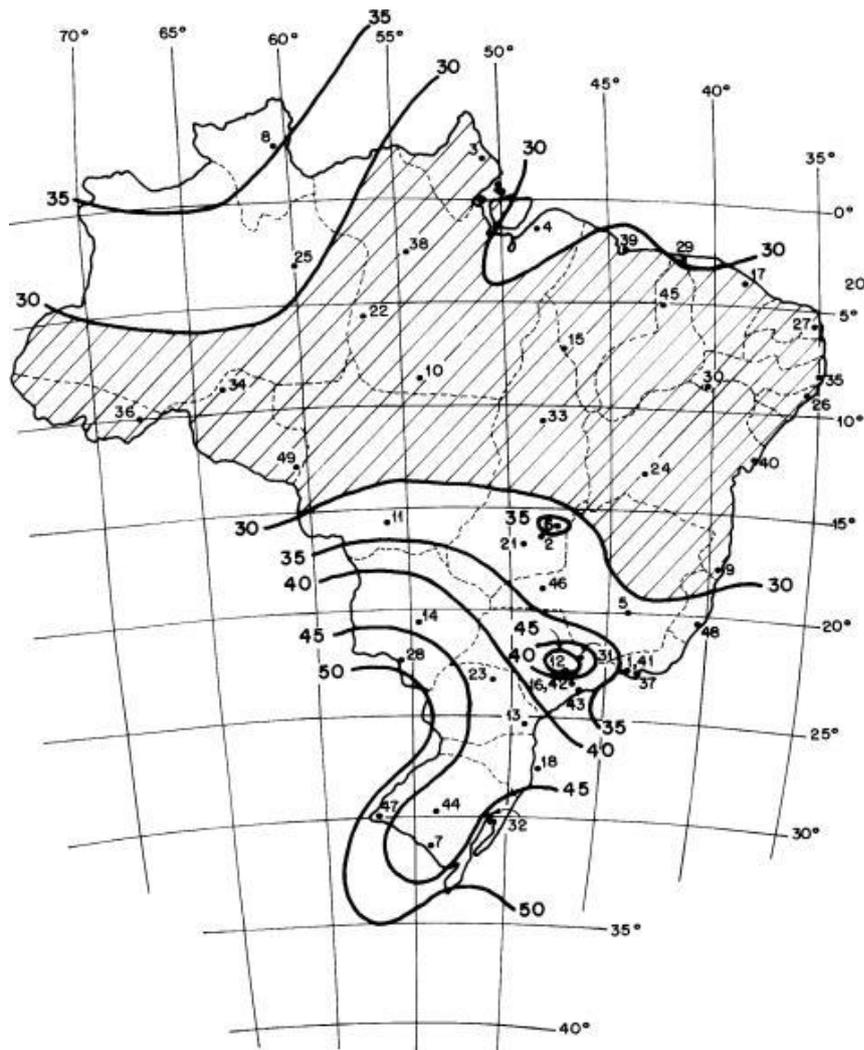
$$q = 0,613V_k^2 \quad (27)$$

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (28)$$

Onde,  $V_k$  é a velocidade característica do vento e  $V_0$  é a velocidade básica do vento a qual varia conforme a posição geográfica no território brasileiro. Os fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  consideram a topografia; a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno; e a estatística de ocorrência da velocidade básica, respectivamente.

Será considerada nesse projeto a velocidade básica de 50 m/s, representando o valor extremo da faixa sudoeste brasileira e também de todo o território nacional. A velocidade básica do vento,  $V_0$ , pode ser determinada a partir do mapa de isopletas ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Mapa de isopletas da velocidade básica do vento (m/s) (NBR 6123:1988)

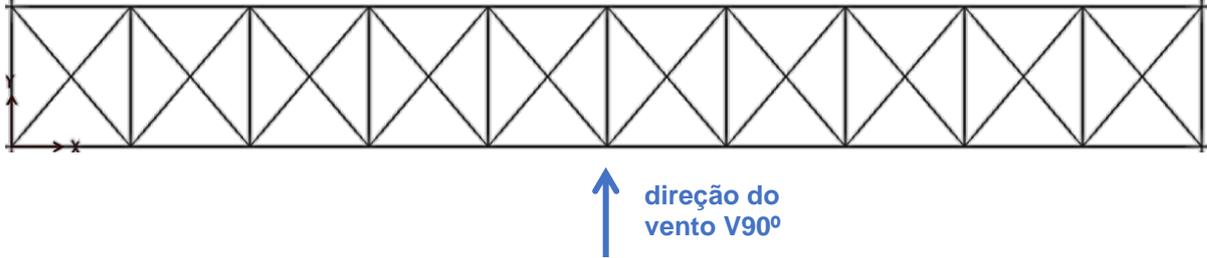


Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

Considerando terrenos planos ou fracamente acidentados, o fator  $S_1$  apresenta o valor 1,0. Por se tratarem de passarelas a serem instaladas em rodovias, será considerada a Categoria IV para a rugosidade do terreno, que abrange terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada com cota média do topo dos obstáculos de 10 m.

Em relação à Classe das dimensões da edificação, será considerada a Classe B para os ventos referentes à direção 90°, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Vista superior da passarela com direção V90



Fonte: Autoria própria.

O fator  $S_2$  é obtido através da Equação 29, considerando os parâmetros  $b$ ,  $F_r$  e  $p$ . O valor de  $z$  representa a altura da edificação acima do nível geral do terreno, considerado como 8 m (5,50 m do vão vertical e 3,00 m da altura da passarela).

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (29)$$

Os valores dos parâmetros  $b$ ,  $F_r$  e  $p$  podem ser obtidos através da Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros meteorológicos (NBR 6123:1988)

Categoria	Parâmetro	Classes		
		A	B	C
	$F_r$	1	0,98	0,95
I	$b$	1,1	1,11	1,12
	$p$	0,06	0,065	0,07
II	$b$	1	1	1
	$p$	0,085	0,09	0,1
III	$b$	0,94	0,94	0,93
	$p$	0,1	0,105	0,115
IV	$b$	0,86	0,85	0,84
	$p$	0,12	0,125	0,135
V	$b$	0,74	0,73	0,71
	$p$	0,15	0,16	0,175

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

O fator estatístico  $S_3$  considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Considerando as passarelas como edificações cuja ruína total ou parcial

pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva, seu valor será considerado como 1,10.

A partir desses dados, são calculadas a velocidade característica do vento,  $V_k$ , e a pressão dinâmica do vento,  $q$ , na direção  $90^\circ$ , encontrando os valores 44,89 m/s e 1,235 kN/m<sup>2</sup>, respectivamente. Com esses valores, são calculadas as forças devidas ao vento considerando os coeficientes de pressão para uma cobertura isolada de duas águas e os de forças para reticulados paralelos múltiplos, conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988).

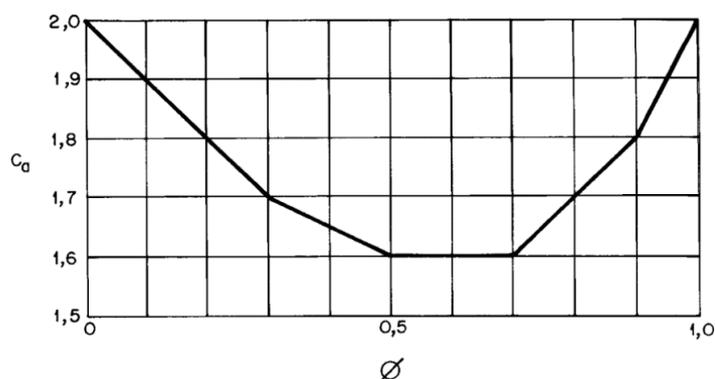
Considerando a passarela desse projeto como uma estrutura constituída por dois reticulados planos paralelos e equidistantes, serão consideradas as ações do vento na direção  $V90$  para a determinação dos respectivos coeficientes e forças de arrasto. A força de arrasto,  $F_a$ , é calculada conforme a Equação 22.

$$F_a = C_a q A_e \quad (22)$$

Onde,  $C_a$  é o coeficiente de arrasto e  $A_e$  é a área frontal efetiva do reticulado. Para o reticulado de barlavento, os coeficientes de arrasto para cada elemento são obtidos a partir do índice de área exposta,  $\phi$ , que representa a relação entre a área frontal efetiva do reticulado,  $A_e$ , dividida pela área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado.

No caso de reticulados compostos por barras prismáticas de faces planas, os coeficientes são aplicados proporcionalmente às áreas frontais das respectivas barras. A Figura 23 apresenta o gráfico para a obtenção dos coeficientes de barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados.

Figura 23 – Coeficiente de arrasto para reticulados com barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados (NBR 6123:1988)



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

Considerando uma área frontal efetiva do reticulado de 19,91 m<sup>2</sup> e uma área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado de 75,30 m<sup>2</sup>, é obtido índice de área exposta,  $\phi$ , de 0,26.

Os respectivos coeficientes proporcionais de arrasto obtidos para cada tipo de elemento e seção dos perfis podem ser analisados na Tabela 6.

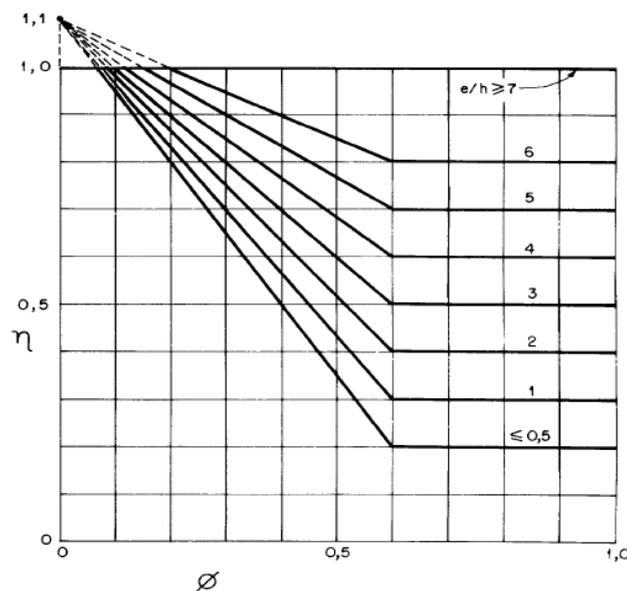
Tabela 6 – Coeficientes de arrasto de plano reticulado para V90

Tipo de elemento	Seção do perfil	$l_b$ (m)	$c$ (m)	Número de barras	$Ae$ (m <sup>2</sup> )	$Ca$	$Ca$ proporcional
Banzos superior e inferior	Duplo U enrijecido fechado <b>2 Ue 150 x 60 x 20 x 2,00</b>	25,10	0,250	2,00	12,55	1,75	1,10
Diagonais	Tubular quadrado <b>120x120mm (e=4,75mm)</b>	3,38	0,120	10,00	4,06	1,75	0,36
Montantes	Tubular quadrado <b>120x120mm (e=4,75mm)</b>	2,50	0,120	11,00	3,30	1,75	0,29

Fonte: Autoria própria.

Onde,  $c$  é a projeção ortogonal da seção da barra sobre uma reta perpendicular à direção do vento e  $l_b$  é o comprimento da barra prismática. Para reticulados protegidos pelo reticulado de barlavento, deve-se obter um fator de proteção,  $\eta$ , a partir do gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Fator de proteção para reticulados planos paralelos equidistantes (NBR 6123:1988)



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

As forças de vento devem ser multiplicadas pelo fator de proteção,  $\eta$ , dependente do índice de área exposta do reticulado imediatamente a barlavento do reticulado em estudo,  $\varphi$ , e do respectivo afastamento relativo  $e/h$ .

Considerando um afastamento,  $e$ , de 2,97 m e uma largura do reticulado,  $h$ , de 3,00 m, o afastamento relativo será considerado como 0,99. A partir desses dados, é obtido um fator de proteção,  $\eta$ , de 0,76. Nesse contexto, serão considerados os coeficientes e valores de força de arrasto apresentados na Tabela 7 para ambos os reticulados.

Tabela 7 – Forças de arrasto para reticulados

Tipo de elemento	Seção do perfil	Fa do reticulado a barlavento (kN/m)	Fa do reticulado protegido (kN/m)
Banzos superior e inferior	Duplo U enrijecido fechado <b>2 Ue 150 x 60 x 20 x 2,00</b>	0,341	0,259
Montantes	Tubular quadrado <b>120x120mm (e=4,75mm)</b>	0,043	0,033
Diagonais	Tubular quadrado <b>120x120mm (e=4,75mm)</b>	0,053	0,040

Fonte: Autoria própria.

Também são consideradas as pressões de vento atuantes na cobertura de policarbonato. Essa cobertura será considerada como isolada e serão considerados os seguintes parâmetros para a determinação dos respectivos coeficientes de pressão: altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa da cobertura,  $h_c$ ; profundidade da cobertura,  $l_2$ ; e ângulo de inclinação das águas da cobertura,  $\theta$ . A partir desses dados, são obtidos os coeficientes de pressão conforme o Quadro 4.

Quadro 4 – Coeficientes de pressão para coberturas planas simétricas (NBR 6123:1988)

Coeficientes	Primeiro carregamento		Segundo carregamento	
	$0,07 \leq \text{tg } \theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \text{tg } \theta \leq 0,6$	$0,07 \leq \text{tg } \theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \text{tg } \theta \leq 0,6$
$c_{pb}$	$2,4 \text{ tg } \theta + 0,6$	$2,4 \text{ tg } \theta + 0,6 \leq 2,0$	$0,6 \text{ tg } \theta - 0,74$	$6,5 \text{ tg } \theta - 3,1$
$c_{ps}$	$3,0 \text{ tg } \theta - 0,5$	+ 0,7	- 1,0	$5,0 \text{ tg } \theta - 3,0$
Sentidos positivos dos coeficientes de pressão				

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

A altura livre,  $h$ , será adotada como 8,50 m, a profundidade da cobertura como 2,97 m e o ângulo de inclinação de  $12,34^\circ$ . Com  $tg \theta$  igual a 0,22, são obtidos os seguintes valores para os coeficientes de pressão para o primeiro carregamento:

- $c_{pb,1}$  é o coeficiente de pressão do barlavento, igual a 1,13;
- $c_{ps,1}$  é o coeficiente de pressão do sotavento, igual a 0,16.

Em relação ao segundo carregamento, são obtidos os seguintes valores:

- $c_{pb,2}$  é o coeficiente de pressão do barlavento, igual a -0,61;
- $c_{ps,2}$  é o coeficiente de pressão do sotavento, igual a -1,00.

A partir desses dados, são obtidas as pressões atuantes na cobertura multiplicando esses coeficientes pela pressão dinâmica do vento,  $q$ . Esses esforços são transmitidos para os nós dos banzos superiores da estrutura principal da passarela por forças pontuais verticais e horizontais, advindas das respectivas áreas de influência, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Ações do vento em coberturas aplicadas nos banzos a barlavento e sotavento

Banzos superiores	Nós	Área de influência (m <sup>2</sup> )	Primeiro carregamento			Segundo carregamento		
			$p_{p,1}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p_{p,1}$		$p_{p,2}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p_{p,2}$	
				$F_x$ (kN)	$F_y$ (kN)		$F_x$ (kN)	$F_y$ (kN)
Barlavento	Centrais	3,80	1,39	1,13	5,16	-0,75	-0,61	-2,79
	Extremos	1,90	1,39	0,56	2,58	-0,75	-0,31	-1,40
Sotavento	Centrais	3,80	0,19	0,16	0,72	-1,24	-1,00	-4,59
	Extremos	1,90	0,19	0,08	0,36	-1,24	-0,50	-2,29

Fonte: Autoria própria.

Segundo a NBR 7188 (ABNT, 2013a), deverá ser considerada uma carga horizontal pontual excepcional de 100 kN aplicada no ponto mais desfavorável da estrutura da passarela no sentido do tráfego sob a passarela, no centro do banzo inferior.

O resumo das ações permanentes, acidentais e excepcionais aplicáveis nesse projeto com seus respectivos valores pode ser analisado no Quadro 5.

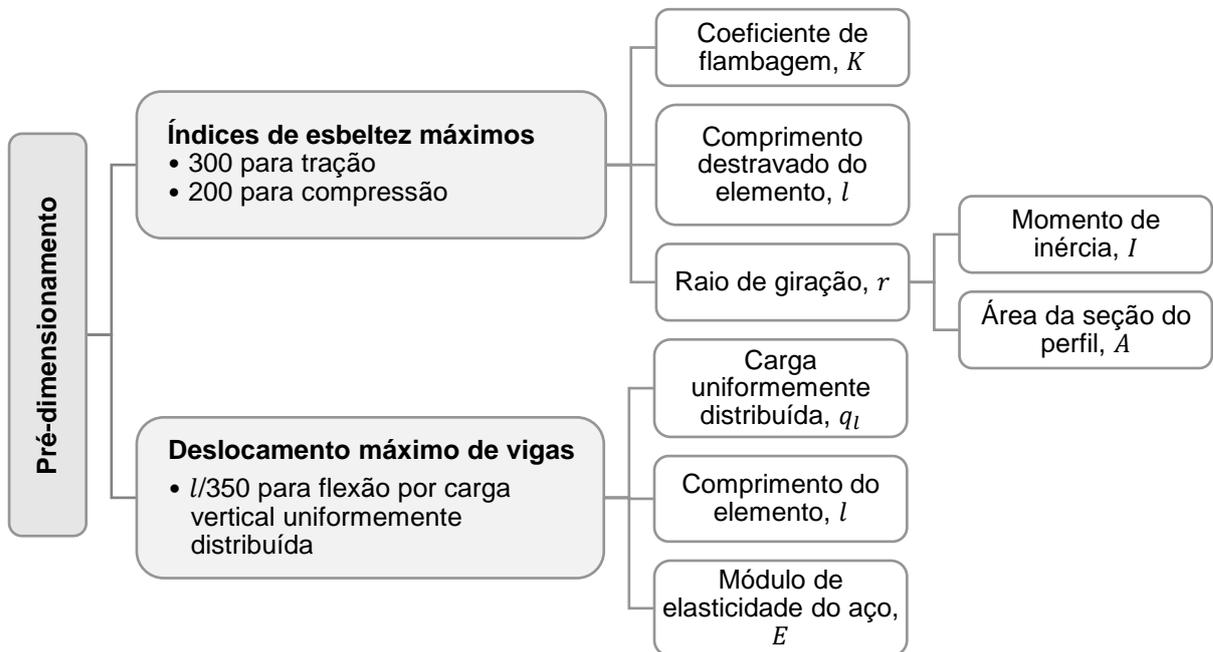
Quadro 5 – Ações aplicáveis ao projeto

Ações	Designação		Valores	Fontes		
Permanentes	Peso próprio da estrutura metálica		Software SAP 2000	-		
	Peso próprio da laje em <i>steel deck</i> , guarda-corpos e corrimãos	Transversinas centrais	10,8 kN/m	NBR 7188 (ABNT,2013) e catálogos de fabricantes		
		Transversinas extremas	5,04 kN/m			
	Peso próprio de grade de proteção		0,1 kN/m <sup>2</sup>	Catálogos de fabricantes		
	Peso próprio da cobertura de policarbonato com estrutura metálica tubular secundária	Nós centrais	0,45 kN			
		Nós extremos	0,22 kN			
Acidentais	Sobrecarga de uso e ocupação de passarelas		Transversinas centrais	10,86 kN/m	NBR 7188 (ABNT, 2013a)	
			Transversinas extremas	5,43 kN/m		
	Sobrecarga de cobertura		Nós centrais	1,86 kN	NBR 8800 (ABNT, 2008)	
			Nós extremos	0,93 kN		
	Variação da temperatura		12,72 °C	NBR 14762 (ABNT, 2010b); INMET (2010)		
	Ação do vento na cobertura isolada simétrica de duas águas (Fx ; Fy)	Primeiro carregamento	Barlavento	Nós centrais	1,13 kN ; 5,16 kN	NBR 6123 (ABNT, 1988)
				Nós extremos	0,56 kN ; 2,58 kN	
			Sotavento	Nós centrais	0,16 kN ; 0,72 kN	
				Nós extremos	0,08 kN ; 0,36 kN	
		Segundo carregamento	Barlavento	Nós centrais	-0,61 kN ; -2,79 kN	
				Nós extremos	-0,31 kN ; -1,40 kN	
	Sotavento		Nós centrais	-1,00 kN ; -4,59 kN		
			Nós extremos	-0,50 kN ; -2,29 kN		
Ação do vento em reticulados paralelos		Barlavento	Banzos: 0,341 kN/m			
			Montantes: 0,043 kN/m			
			Diagonais: 0,053 kN/m			
		Sotavento	Banzos: 0,259 kN/m			
			Montantes: 0,033 kN/m			
			Diagonais: 0,040 kN/m			
Excep.	Choque horizontal de veículos		100 kN	NBR 7188 (ABNT, 2013a)		

Fonte: Autoria própria.

A partir dos parâmetros básicos geométricos dos módulos estruturais e de transporte, do sistema estrutural de interesse e das ações aplicáveis, o pré-dimensionamento dos elementos foi desenvolvido utilizando dois critérios: as limitações do índice de esbeltez, para todos os elementos sob considerável compressão ou tração, e do deslocamento máximo de vigas sob esforços de flexão com força horizontal distribuída uniformemente, seguindo limites estabelecidos pela NBR 14762 (ABNT, 2010b), conforme esquema da Figura 25.

Figura 25 – Critérios e parâmetros para pré-dimensionamento dos elementos estruturais



Fonte: Autoria própria

O índice de esbeltez refere-se a barras submetidas a esforços axiais, pela relação entre o produto  $Kl$  e o raio de giração  $r$ , ou seja  $Kl/r$ , sendo  $K$  o coeficiente de flambagem e  $l$  o comprimento destravado do elemento. Segundo a NBR 14762, o índice de esbeltez das barras comprimidas não deve exceder 200 e para barras tracionadas não deve exceder 300.

Os raios de giração,  $r$ , são relacionados com o momento de inércia,  $I$ , e a área da seção dos perfis,  $A$ , segundo a Equação 19.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (19)$$

Nesse contexto, serão determinados os tipos de perfis e respectivas dimensões, baseadas na NBR 6355 que trata da padronização de perfis estruturais de aço formados a frio (ABNT, 2012) e na NBR 8261 que determina os parâmetros para tubos estruturais de aço carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular (ABNT, 2010a). Os valores para os coeficientes de flambagem,  $K$ , podem ser obtidos a partir do Quadro 6.

Quadro 6 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados (NBR 8800:2008)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de $K$ ou $K$	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,8	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Para elementos sob esforços de flexão, como as transversinas devido ao carregamento das lajes, também serão pré-dimensionadas a partir do deslocamento máximo admitido em norma para vigas de pisos de  $l/350$ . A partir das flechas máximas da linha elástica de vigas com carga uniformemente distribuída, o valor mínimo de momento de inércia em torno do eixo neutro,  $I_x$ , será dado conforme a Equação 20.

$$I_x = \left(\frac{350}{l}\right) \frac{5q_l l^4}{384E} = \frac{875q_l l^3}{192E} \quad (20)$$

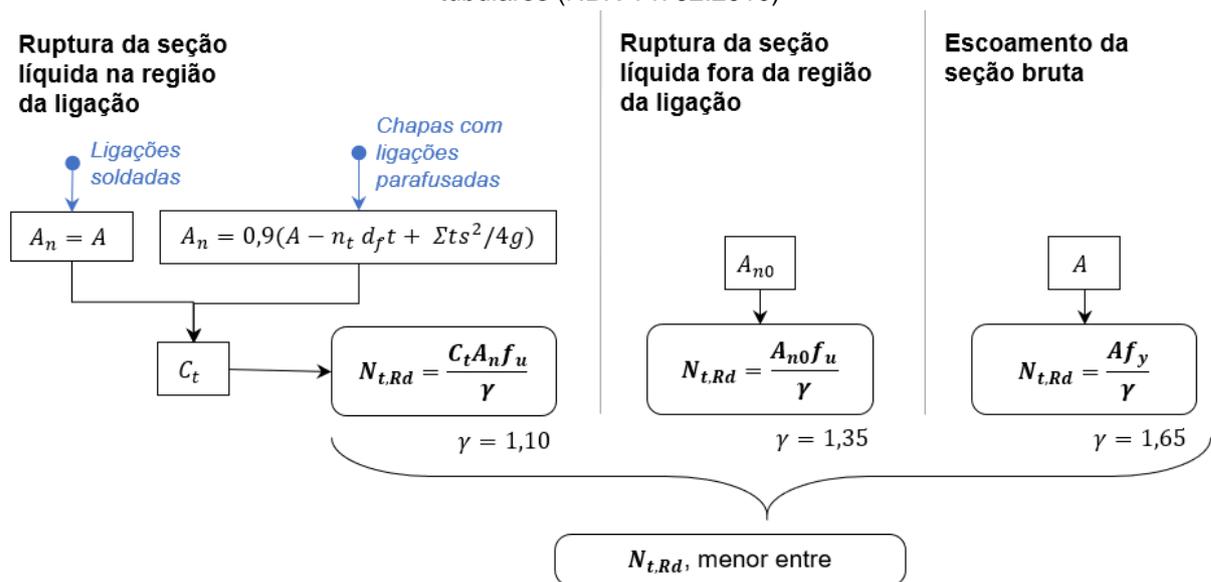
Onde  $q_l$  é a carga uniformemente distribuída sobre a viga, considerando a soma dos valores das cargas distribuídas uniformemente devido a ação permanente da laje e a ação variável de pedestres, combinados sem fatores de redução;  $l$  é o comprimento do elemento; e  $E$  é o módulo de elasticidade do aço de 200 000 MPa.

A modelagem e análise estrutural pelo método dos elementos finitos é realizada através do *software* SAP 2000 do *Computers and Structures, Inc.* (CSI). Foram aplicadas sobre o modelo todas as ações permanentes, acidentais e excepcionais. Os pesos próprios dos elementos de barra foram considerados pela própria modelagem com a inserção dos perfis específicos estabelecidos anteriormente, com suas respectivas características geométricas e dos materiais adotados.

São consideradas as combinações normais do estado-limite último, assim como as combinações de ações excepcionais. Essas combinações constituem envoltórias de ações para a determinação dos maiores esforços solicitantes da estrutura. Também são consideradas as combinações de serviço, possibilitando a análise dos maiores deslocamentos dos elementos e ligações, podendo, então, ser comparados com os parâmetros mínimos estabelecidos em norma. Também é realizada a análise modal da passarela, para estudo de vibrações excessivas.

A próxima etapa é o dimensionamento da estrutura a partir do cálculo dos esforços resistentes de cada tipo de perfil, analisando respectivamente as combinações mais desfavoráveis. Para o cálculo de  $N_{t,Rd}$ , é considerado o menor valor obtido entre os casos apresentados na Figura 26, para perfis formados a frio não tubulares.

Figura 26 – Fluxograma de cálculo da força axial de tração resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)



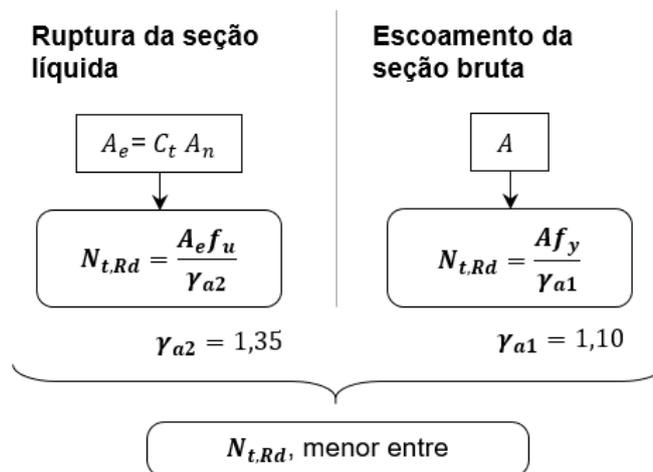
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Onde  $A$  é a área bruta da seção transversal da barra,  $A_{n0}$  é a área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação,  $A_n$  é a área líquida da seção transversal da barra na região da ligação,  $d_f$  é a dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação,  $n_f$  é a quantidade de furos contidos na linha de ruptura,  $s$  é o espaçamento dos furos na direção da solicitação,  $g$  é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação,  $t$  é a espessura da parte conectada analisada e  $C_t$  é o coeficiente de redução da área líquida.

$C_t$  é igual a 1,0 para perfis com apenas ligações soldadas transversais e igual a  $1,0 - 1,2(x/L)$ , onde  $x$  é a excentricidade da ligação (distância entre o centroide da seção da barra e o plano de cisalhamento da ligação) e  $L$  é o comprimento da ligação parafusada.

Para perfis formados a frio tubulares, é utilizado o fluxograma da Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma de cálculo da força axial de tração resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

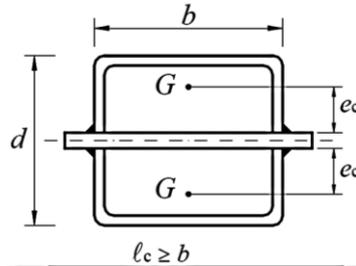
Onde  $A_e$  é a área líquida efetiva da seção transversal da barra. Para a obtenção do  $C_t$  nas barras com seções tubulares retangulares, quando a força de tração for transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica, é utilizada a Equação 16. Onde  $l_c$  é o comprimento efetivo da ligação e  $e_c$  é a excentricidade da ligação, obtidos conforme as Equações 22 e 23.

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c} \quad (21)$$

$$e_c = \frac{d^2 + 2bd}{4(d+b)} \quad (22)$$

Onde  $d$  e  $b$  são as dimensões da seção do perfil, conforme a Figura 28.

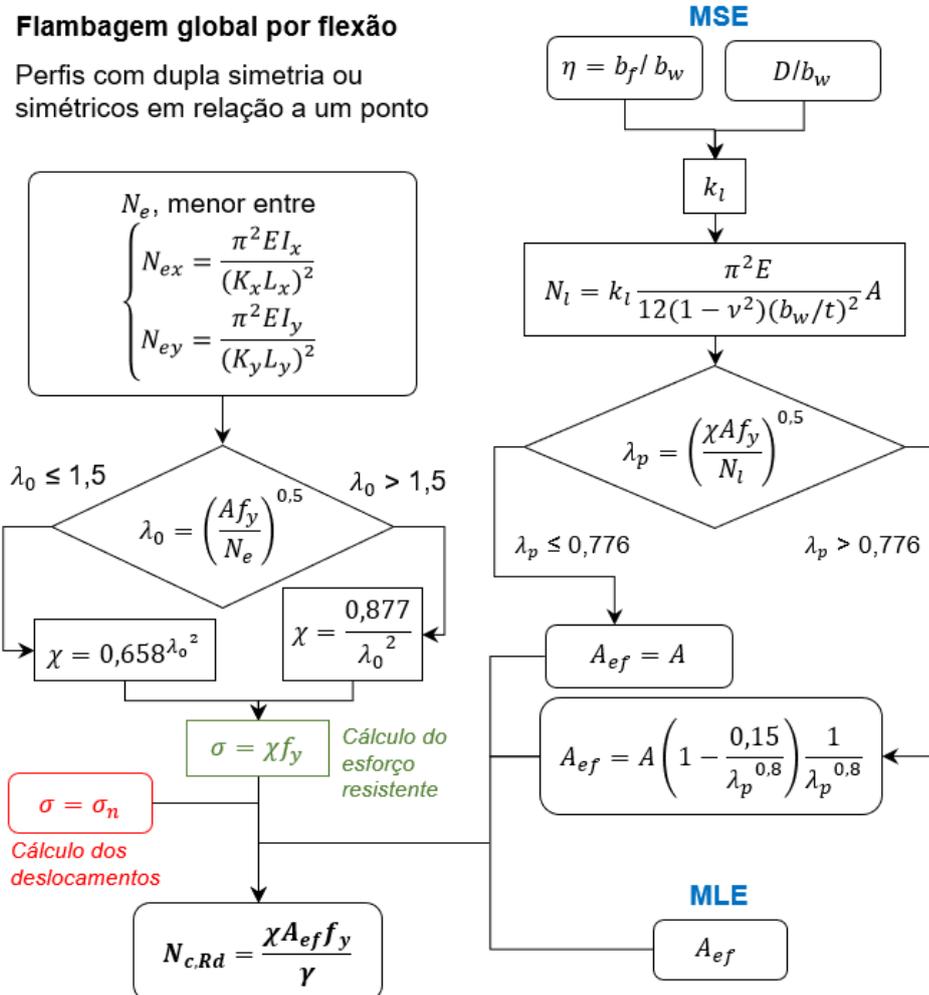
Figura 28 – Ilustração do valor de  $e_c$  em seção tubular retangular (NBR 8800:2008)



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Para o cálculo de  $N_{c,Rd}$ , em seções fechadas, são primeiramente obtidas as forças axiais de flambagem global elástica para perfis com dupla simetria e as respectivas áreas efetivas,  $A_{ef}$  conforme o fluxograma da Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma de cálculo da força axial resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)

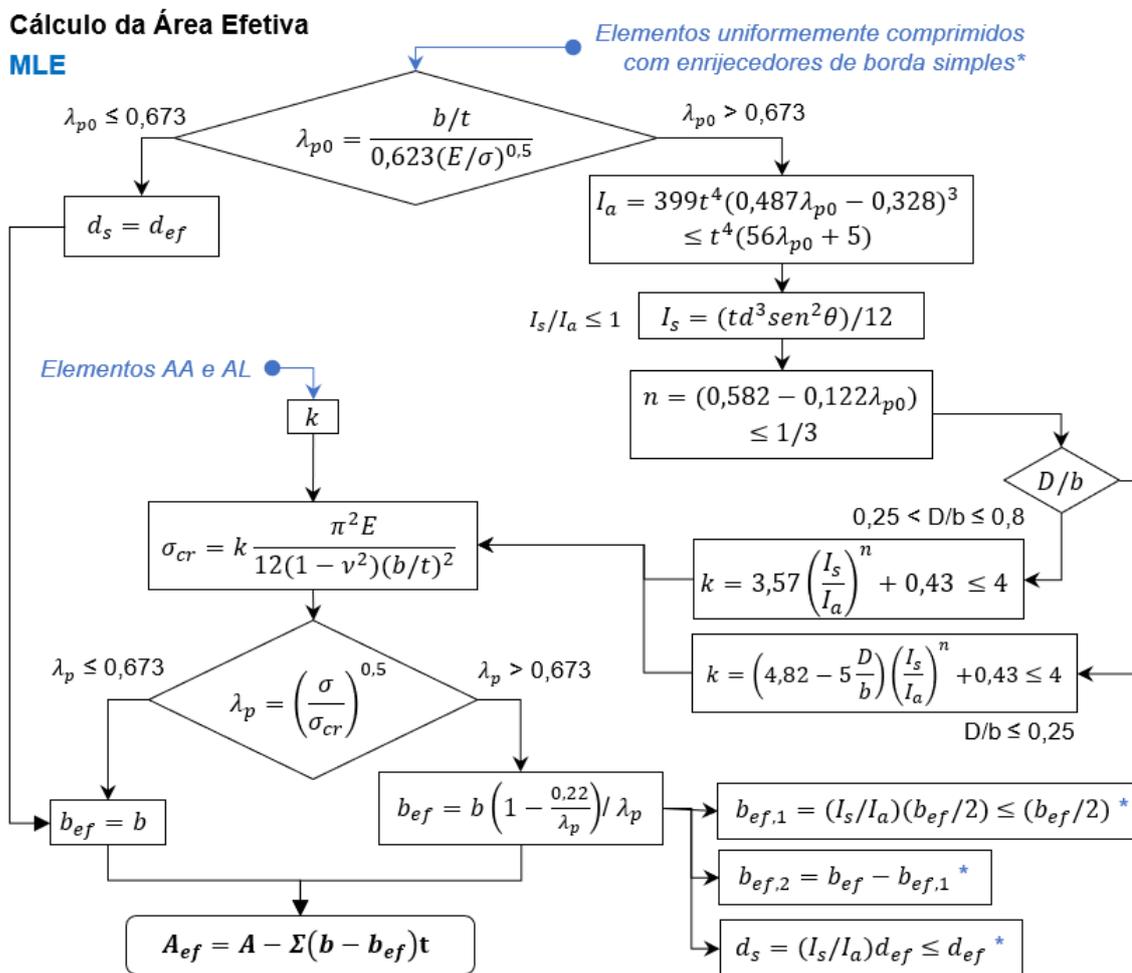


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Onde,  $N_e$  é a força axial de flambagem global elástica,  $N_{ex}$  e  $N_{ey}$  são as forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos principais x e y, respectivamente,  $K_x L_x$  e  $K_y L_y$  são os comprimentos efetivos de flambagem global por flexão em relação aos eixos x e y,  $\chi$  é o fator de redução,  $\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido,  $N_l$  é a força axial de flambagem local elástica e  $k_l$  é o coeficiente de flambagem local para a seção completa.

A área efetiva da seção transversal da barra pode ser calculada a partir de dois métodos: o da largura efetiva (MLE) e o da seção efetiva (MSE). O MSE é apresentado na Figura 29 e o MLE na Figura 30. Realizando o cálculo do esforço resistente, a tensão normal de compressão,  $\sigma$ , é igual a  $\chi f_y$ , e para o cálculo dos deslocamentos, utiliza-se a tensão calculada considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço,  $\sigma_n$ .

Figura 30 – Fluxograma de cálculo da área efetiva (MLE) para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)

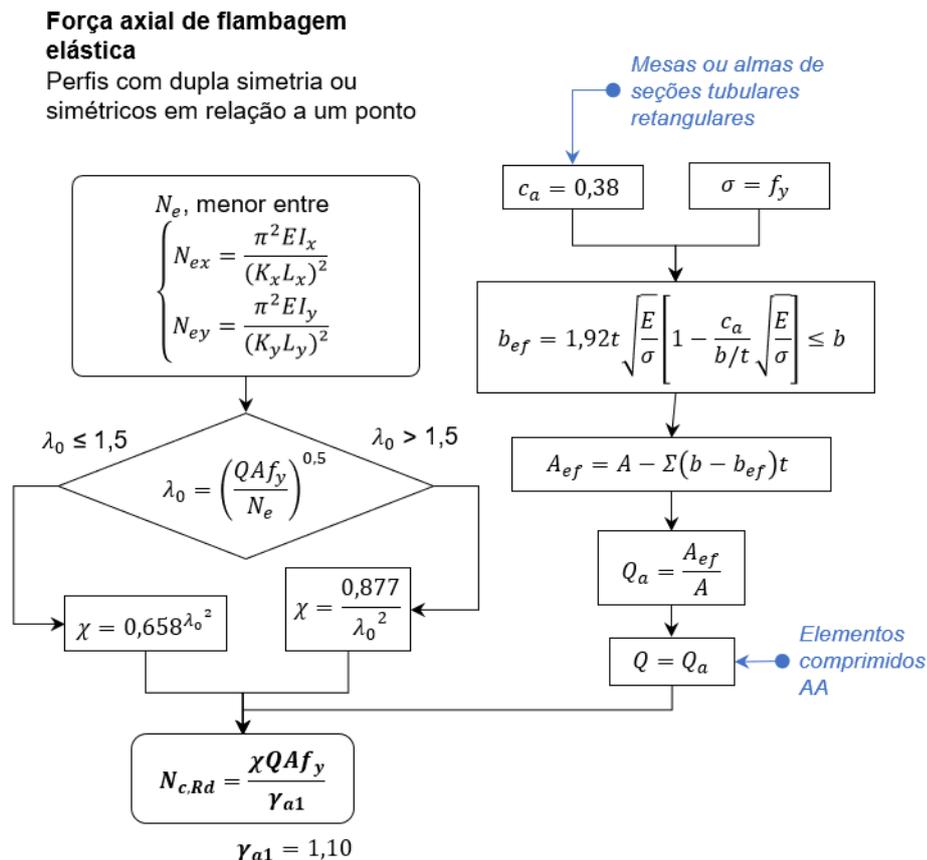


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Onde  $b$  é a largura do elemento,  $\sigma_{cr}$  é a tensão convencional de flambagem elástica do elemento,  $k$  é o coeficiente de flambagem local do elemento,  $I_s$  é o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido,  $I_s$  é o momento de inércia de referência do enrijecedor de borda,  $b_{ef}$  é a largura efetiva do elemento,  $b_{ef1}$  e  $b_{ef2}$  são as parcelas da largura efetiva do elemento,  $d_{ef}$  é a largura efetiva do enrijecedor,  $d_s$  é a largura efetiva reduzida do enrijecedor e  $\theta$  é o ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda.

Em relação aos perfis formados a frio tubulares retangulares, o  $N_{c,Rd}$  é obtido conforme a Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma de cálculo da força axial resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)

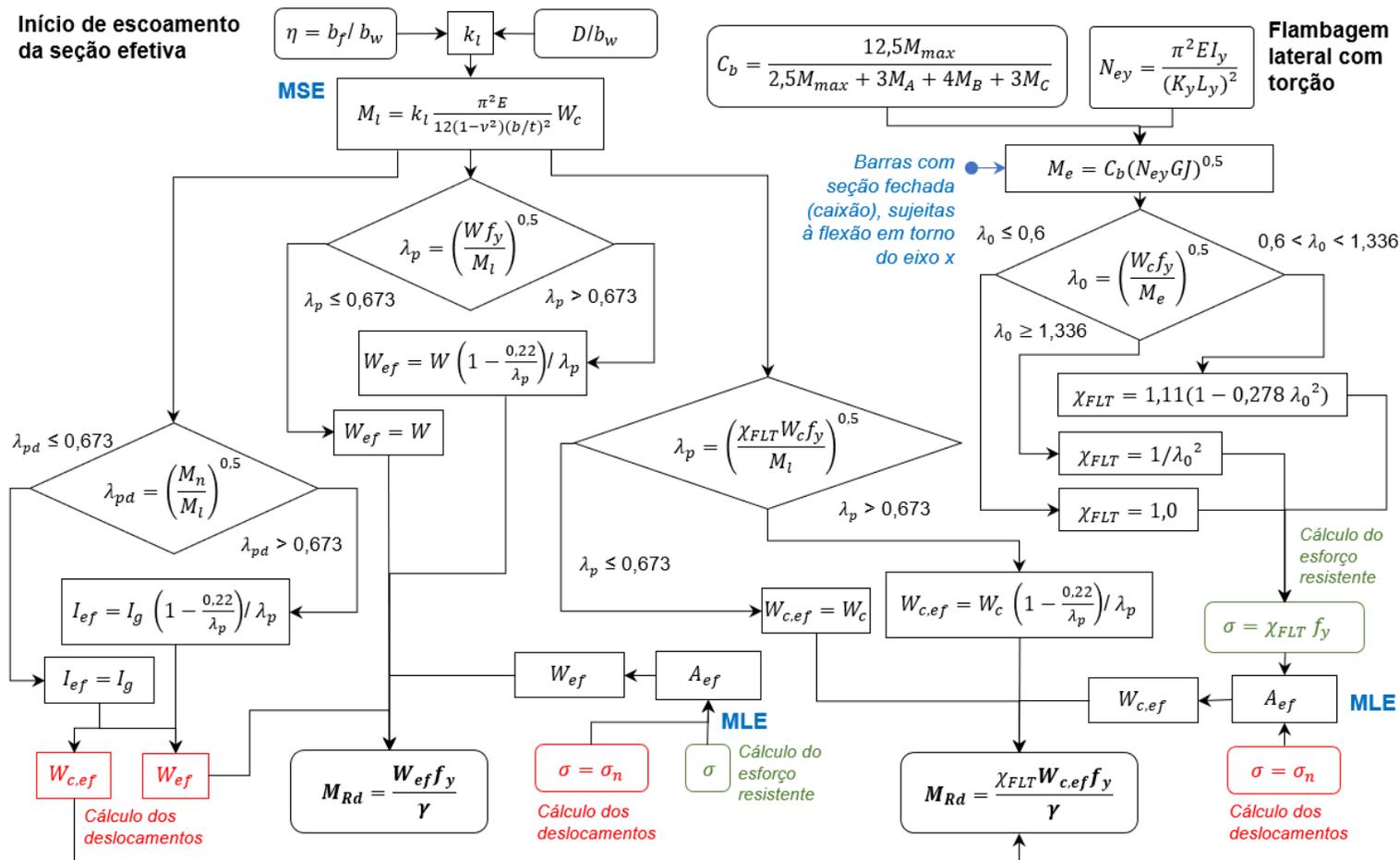


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Onde,  $Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local,  $Q_a$  é o fator de redução dos elementos AA e  $c_a$  é um coeficiente para o cálculo da largura efetiva de elementos AA.

Para o cálculo de  $M_{Rd}$ , em perfis formados a frio fechados e não tubulares, é considerado o menor valor entre os momentos resistentes de cálculo do início de escoamento da seção efetiva e da flambagem lateral com torção, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Fluxograma de cálculo do momento fletor resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)

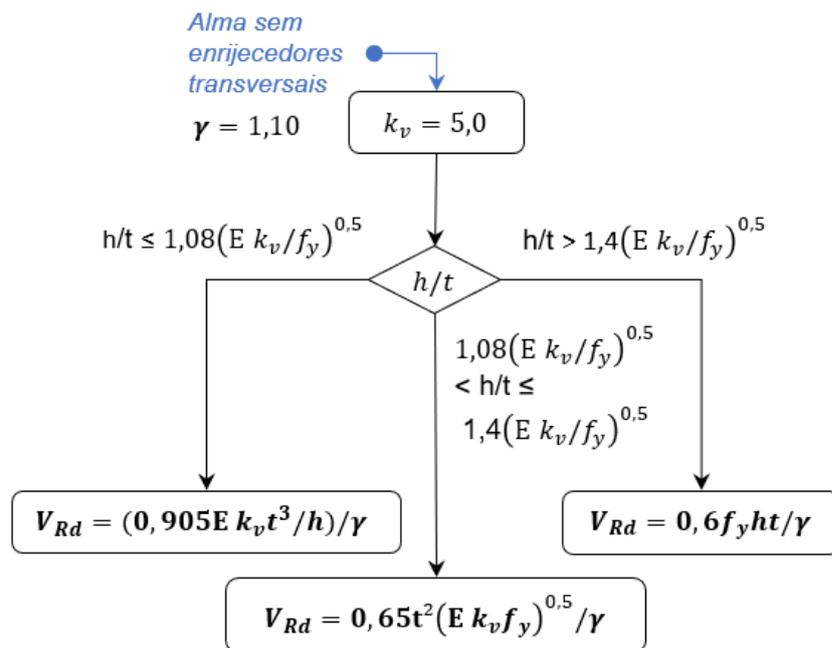


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Onde  $W$  e  $W_{ef}$  são o módulo de resistência elástico da seção bruta e efetiva, respectivamente, em relação à fibra extrema que atinge o escoamento,  $W_c$  e  $W_{c,ef}$  são o módulo de resistência elástico da seção bruta e efetiva, respectivamente, em relação à fibra extrema comprimida,  $M_l$  é o momento fletor de flambagem local elástica,  $\chi_{FLT}$  é o fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem lateral com torção,  $M_e$  é o momento fletor de flambagem lateral com torção em regime elástico,  $C_b$  é o fator de modificação para momento fletor não uniforme,  $M_{max}$ ,  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$  são o máximo valor, o valor no 1º quarto, no centro e no 3º quarto do trecho analisado, em módulo, respectivamente, do momento fletor solicitante de cálculo,  $M_n$  é o momento fletor de flambagem local elástica,  $I_g$  é o momento de inércia da seção bruta e  $I_{ef}$  é o momento de inércia efetivo da seção.

A  $V_{Rd}$  de perfis formados a frio não tubulares é calculado conforme a Figura 33.

Figura 33 – Fluxograma de cálculo da força cortante resistente para perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010)

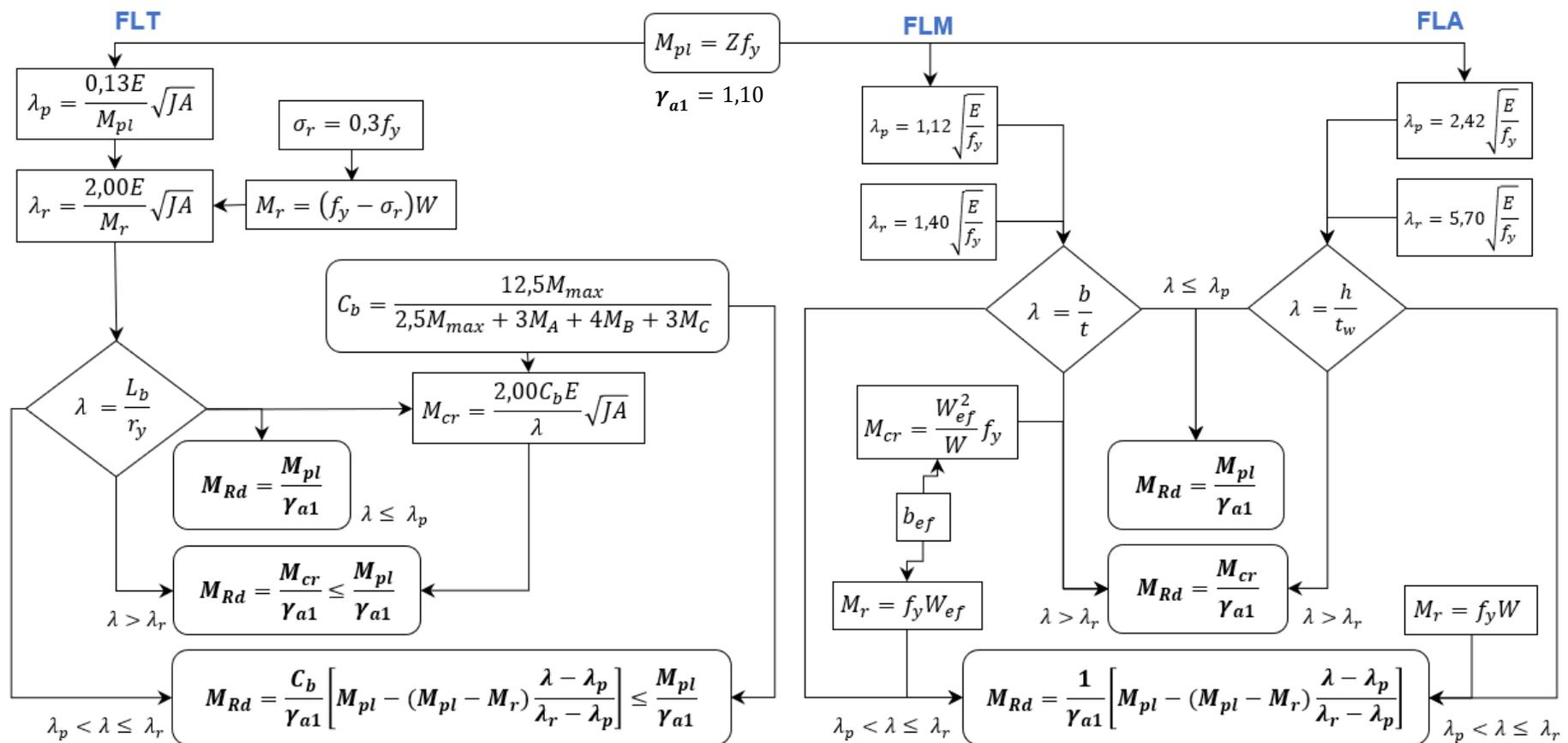


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

Onde  $h$  é a largura da alma e  $k_v$  é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, igual a 5,0 para alma sem enrijecedores transversais. Para seções com duas ou mais almas, devem ser analisadas cada alma separadamente resistindo à sua parcela de força cortante.

Em relação ao  $M_{Rd}$  de perfis formados a frio tubulares, utiliza-se a rotina de cálculo da Figura 34, a partir dos estados-limites últimos de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da alma (FLA). Esse momento não deve ser maior do que  $1,50Wf_y/\gamma_{a1}$ .

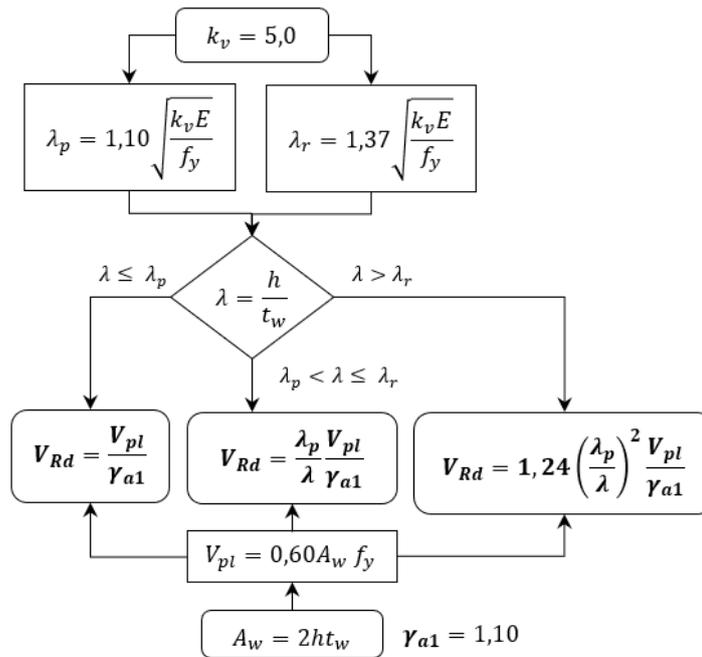
Figura 34 – Fluxograma de cálculo do momento fletor resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

A  $V_{Rd}$  de perfis formados a frio tubulares retangulares é calculado conforme a Figura 35, onde  $V_{pl}$  é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento e  $t_w$  é a espessura da alma.

Figura 35 – Fluxograma de cálculo da força cortante resistente para perfis formados a frio tubulares (NBR 8800:2008)



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Para as seções tubulares retangulares submetidas exclusivamente à torção, o momento de torção resistente de cálculo,  $T_{Rd}$ , deve ser calculado conforme as Equações 23 a 25.

$$- \text{para } \frac{h}{t} \leq 2,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} : T_{Rd} = \frac{0,60 W_T f_y}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

$$- \text{para } 2,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t} \leq 3,07 \sqrt{\frac{E}{f_y}} : T_{Rd} = \frac{0,60 W_T f_y \left( 2,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right)}{\gamma_{a1} \left( \frac{h}{t} \right)} \quad (24)$$

$$- \text{para } 3,07 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t} \leq 260 : T_{Rd} = \frac{0,46 \pi^2 W_T E}{\gamma_{a1} \left( \frac{h}{t} \right)^2} \quad (25)$$

Onde  $h$  é o maior comprimento entre as partes planas dos lados da seção transversal e  $W_T$  é o módulo de resistência à torção, obtido conforme a Equação 26.  $H$  e  $B$  são as dimensões dos lados da seção.

$$W_T = 2(B - t)(H - t)t - 4,5(4 - \pi)t^3 \quad (26)$$

Também devem ser verificadas as combinações de solicitações apresentadas no Quadro 7 para cada tipo de perfil analisado.

Quadro 7 – Combinações de esforços solicitantes

Combinação	Perfis formados a frio não tubulares (NBR 14762:2010b)	Perfis tubulares retangulares (NBR 8800:2008)
<b>Momento fletor e força cortante</b> para barras sem enrijecedores transversais de alma	$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0$	-
<b>Flexão composta</b>	$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$	a) para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$ $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$ b) para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$ $\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$
<b>Forças cortantes simultâneas nas direções dos dois eixos centrais de inércia</b>	-	a) escoamento $\tau_{Sd} \leq \frac{0,60f_y}{\gamma_{a1}}$ b) instabilidade ou flambagem $\tau_{Sd} \leq \frac{0,60\chi f_y}{\gamma_{a1}}$
<b>Momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante</b>	-	$\left(\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0$

Fonte: Autoria própria

Em relação à verificação de vibrações em pisos, a NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta a frequência natural máxima da estrutura do piso como 3Hz. Essa verificação é realizada através de análise modal.

Após o dimensionamento das barras, é realizado o dimensionamento e detalhamento das ligações, conforme o Quadro 8, a partir da NBR 14762 (ABNT 2010b), para ligações onde a espessura da parte mais fina não ultrapassa 4,75mm.

Quadro 8 – Forças resistentes para ligações soldadas e parafusadas,  $t \leq 4,75\text{mm}$  (NBR 14762:2010)

Ligações soldadas		Ligações parafusadas	
Soldas de penetração em juntas de topo	a) tração ou compressão normal à seção efetiva ou paralela ao eixo da solda: $F_{Rd} = Lt_{ef}f_y/1,10$	Espaçamentos mínimos	– bordas de dois furos adjacentes: $2d_b$ – borda de um furo à extremidade do elemento: $d_b$
	b) cisalhamento na seção efetiva: $F_{Rd} = Lt_{ef}(0,6f_w)/1,25$ $F_{Rd} = Lt_{ef}(0,6f_y)/1,10$	Rasgamento entre furos ou entre furo e borda	$F_{Rd} = tef_u/1,45$
Soldas de filete em superfícies planas	a) ELU de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda: – para $L/t < 25$ : $F_{Rd} = \frac{\left[1 - \frac{0,01L}{t}\right] tLf_u}{1,65}$ – para $L/t \geq 25$ : $F_{Rd} = 0,25tLf_u/2,00$	Pressão de contato	a) para $t \leq 4,75\text{ mm}$ $F_{Rd} = \alpha_e d_b t f_u / 1,55$ $\alpha_e = (0,183t + 1,53)$ [mm] b) para $t > 4,75\text{ mm}$ $F_{Rd} = 2,5d_b t f_u / 1,35$
	b) ELU de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda: $F_{Rd} = Lt f_u / 1,55$ c) ELU de ruptura da solda: $F_{Rd} = 0,75t_{ef}L f_w / 1,65$	Força de tração resistente de cálculo do parafuso	$F_{v,Sd} = 0,75A_b f_{ub} / 1,35$
Soldas de filete em superfícies curvas	a) ELU de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda: $F_{Rd} = 0,83Lt f_u / 1,65$	Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso	a) plano de corte passa pela rosca: $F_{v,Rd} = 0,4A_b f_{ub} / 1,35$ b) plano de corte não passa pela rosca: $F_{v,Rd} = 0,5A_b f_{ub} / 1,35$
	b) ELU de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda: – para $t_{ef} \geq 2t$ e $h \geq L$ : $F_{Rd} = 1,50tLf_u / 1,80$ – para $t \leq t_{ef} < 2t$ ou $h < L$ : $F_{Rd} = 0,75tLf_u / 1,80$ c) ELU de ruptura da solda: $F_{Rd} = 0,75t_{ef}L f_w / 1,65$	Tração e cisalhamento combinados	– para parafusos com qualificação estrutural: $\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$
$f_w$ é a resistência à ruptura da solda $L$ é o comprimento do filete de solda $t_{ef}$ é a garganta efetiva da solda $t$ é a menor espessura da ligação $h$ é a altura do enrijecedor		$d_b$ é o diâmetro nominal do parafuso $e$ é a distância do centro do furo-padrão à borda mais próxima, na direção da força $A_b$ é a área bruta da seção do parafuso $f_{ub}$ é a resistência à ruptura do parafuso	

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010b).

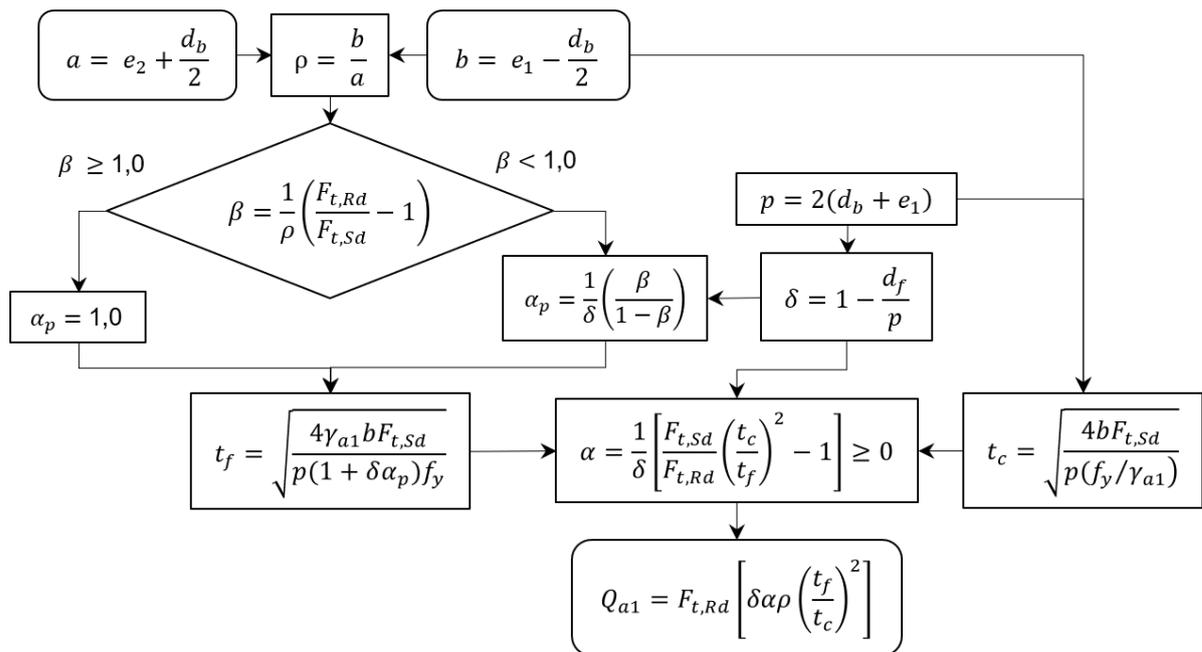
Para ligações flangeadas entre perfis tubulares retangulares, sob atuação de força axial de tração devem ser observados: o escoamento das placas do flange, ruptura por tração dos parafusos e ruptura por cisalhamento da solda de filete. Essas ligações são constituídas por duas placas ligadas por solda de filete na extremidade dos perfis a serem conectados, com essas placas unidas por parafuso entre si.

Para o dimensionamento do estado-limite último de escoamento por ruptura por tração dos parafusos, também deve ser considerado o efeito da alavanca, conforme determina as NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 16239 (ABNT, 2013b).

O efeito da alavanca é calculado conforme o fluxograma da Figura 36.

Figura 36 – Fluxograma de cálculo do efeito de alavanca e espessura mínima da chapa do flange retangular (NBR 16239:2013b)

#### Cálculo do efeito de alavanca e espessura mínima da chapa do flange



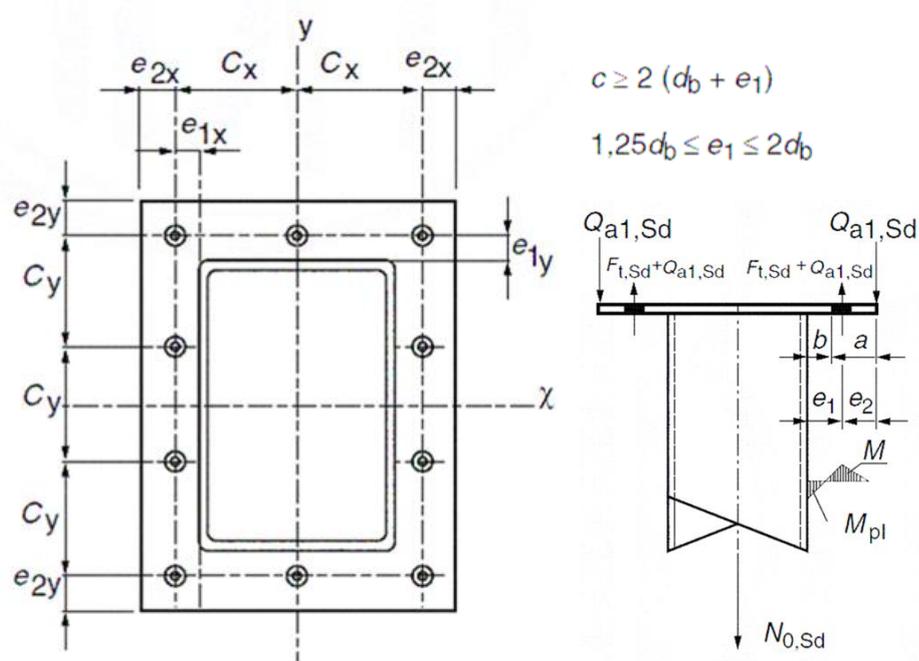
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013b).

Onde  $t_c$  é uma espessura de referência,  $d_f$  é o diâmetro dos furos,  $t_f$  é a espessura mínima das placas dos flanges,  $Q_{a1}$  é a força decorrente do efeito da alavanca,  $F_{t,Sd}$  é a força de tração solicitante de cálculo de um parafuso, desconsiderando o efeito de alavanca e  $F_{t,Rd}$  é a força resistente de cálculo de um parafuso, e deve obedecer a condição da Equação 27.

$$F_{t,Sd} + Q_{a1} \leq F_{t,Rd} \quad (27)$$

Os demais parâmetros apresentados no fluxograma da Figura 36 são obtidos a partir da representação da Figura 37.

Figura 37 – Ligação flangeada em perfis tubulares retangulares e efeito de alavanca (NBR 16239:2013b)



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013b).

Também serão verificados os deslocamentos máximos da estrutura, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 14762 (2010b), conforme o Quadro 9.

Quadro 9 – Deslocamentos máximos

Descrição		$\delta$
Vigas de cobertura	Transversinas	$L/250$
	Banzos superiores	$L/250$
Vigas de piso	Transversinas	$L/350$
	Banzos inferiores	$L/350$
Edifícios de um pavimento: deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	Montantes	$H/300$

Fonte: Autoria própria

Onde  $L$  é o vão teórico entre apoios e  $H$  é a altura total do pilar.

## 4 PROPOSTA DE PADRONIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os cálculos e análise dos resultados obtidos para a proposta de padronização dos módulos estruturais, suas ligações e para os respectivos processos de fabricação, transporte e montagem. Também é apresentada a proposta de modularização para os demais vãos típicos para rodovias do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.

### 4.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS

Para barras submetidas a esforços axiais, de compressão ou tração, foram estabelecidos primeiramente os respectivos comprimentos máximos destravados e raios mínimos de giração para cada tipo de elemento, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Raios de giração mínimos para cada tipo de elemento

Elementos	Comprimento máximo destravado, $l$ (cm)	Condições de apoio		$K$ recomendável	Raio de giração mínimo, $r$ (cm)	
		Translação	Rotação		Compressão	Tração <sup>a</sup>
Banzos inferior e superior	250,00	Impedida	Livre	1,00	1,25	0,83
Diagonais	371,65	Impedida	Livre	1,00	1,86	1,24
Montantes	275,00	Impedida	Livre	1,00	1,38	0,92
Transversinas	297,00	Impedida	Livre	1,00	1,49	0,99
Contra-ventamentos	388,21	Impedida	Livre	1,00	1,94	1,29

Fonte: Autoria própria.

Notas: <sup>a</sup> Em barras compostas tracionadas, também deverão ser considerados os índices de esbeltez máximos para cada perfil componentes

Para as transversinas, sujeitas à flexão devido às cargas da laje e de uso e ocupação, serão também considerados em seu pré-dimensionamento o momento de inércia mínimo em relação ao eixo  $x$ , de maior inércia.

São consideradas as seguintes cargas distribuídas uniformemente sobre as transversinas centrais de 2,97 m: permanente de 10,8 kN/m e a acidental de 10,86 kN/m. Admitindo o módulo de elasticidade,  $E$ , do aço de 200 000 MPa, e  $q_l$  igual a

21,66 kN/m (considerando a soma das cargas permanente e acidental com fatores 1,0 de combinação), o momento de inércia mínimo calculado, conforme a Equação 20, em relação ao eixo x,  $I_x$ , é igual a 1293,02 cm<sup>4</sup>.

A partir desses dados, foram determinadas as dimensões dos perfis formados a frio que satisfazem os critérios do pré-dimensionamento pelos índices de esbeltez máximos para todos os elementos, a partir das respectivas áreas de seções e momento de inércia mínimo em relação ao eixo x para as transversinas.

O pré-dimensionamento dos elementos pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 – Pré-dimensionamento dos elementos pelos  $r$  e  $I_x$  mínimos

Elementos	$I_x, \text{mín}$ (cm <sup>4</sup> )	$r, \text{mín}$ (cm)	Perfis	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$r_x$ (cm)	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$r_y$ (cm)
Transversinas	1293,02	1,25	Duplo U enrijecido fechado <b>2Ue 200x75x25x3,00</b>	22,82	1391,10	7,81	784,65	5,86
Banzos	1293,02	1,86	Duplo U enrijecido fechado <b>2Ue 200x75x25x2,00</b>	15,08	934,84	7,87	536,20	5,96
Diagonais	1293,02	1,38	Tubular quadrado <b>35x35mm (e=0,75mm)</b>	1,01	1,97	1,39	1,97	1,39
Montantes	1293,02	1,49	Tubular quadrado <b>38x38mm (e=0,9mm)</b>	1,31	2,99	1,51	2,99	1,51
Contra-ventamentos	1293,02	1,94	Tubular quadrado <b>50x50mm (e=1,06mm)</b>	2,05	8,11	1,99	8,11	1,99

Fonte: Autoria própria.

Esses perfis foram inseridos na modelagem estrutural e substituídos por outros perfis dos mesmos tipos com diferentes áreas de seções transversais quando superdimensionados ou não atendendo aos critérios resistivos normativos.

## 4.2 MODELAGEM ESTRUTURAL

A partir do pré-dimensionamento, realizou-se a modelagem estrutural através do *software SAP 2000* da *Computers and Structures, Inc. (CSI)*, com a inserção do material utilizado, das propriedades geométricas dos elementos e da aplicação das ações solicitadas, bem como as respectivas combinações para estados-limites últimos e de serviço. O material utilizado para todos os perfis e chapas de ligações foi o aço ASTM A653 com qualificação estrutural de grau 50.

As propriedades mecânicas do aço ASTM A653 SQ Gr 50 podem ser observadas do Quadro 10.

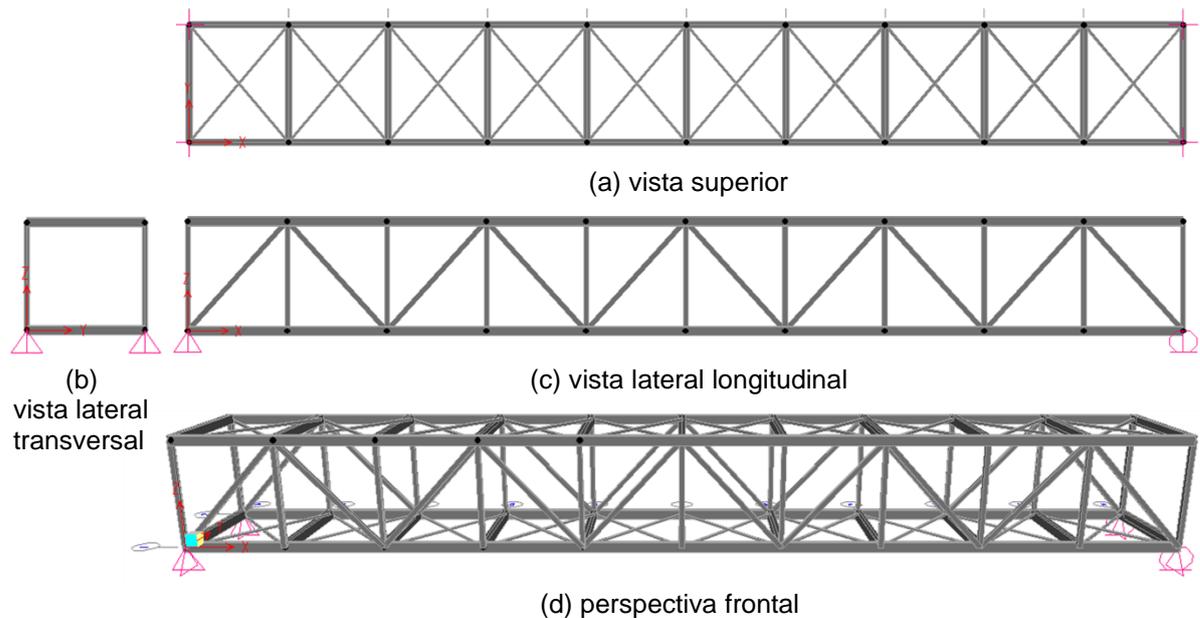
Quadro 10 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A653 SQ Gr 50

Propriedade mecânica	Símbolo	Valor	Unidade
Módulo de elasticidade	$E$	20.000,00	kN/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,30	-
Módulo de elasticidade transversal	$G$	7.692,31	kN/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatação térmica	$\beta$	1,20E-05	°C <sup>-1</sup>
Massa específica	$\rho$	7.850,00	kg/m <sup>3</sup>
Resistência ao escoamento do aço	$f_y$	34,47	kN/cm <sup>2</sup>
Resistência a ruptura do aço na tração	$f_u$	44,82	kN/cm <sup>2</sup>

Fonte: Autoria própria.

Com o material estabelecido, realizou-se a inserção das propriedades geométricas de cada perfil pré-dimensionado e a modelagem tridimensional da estrutura treliçada da passarela. A modelagem estrutural da passarela pode ser observada na Figura 38.

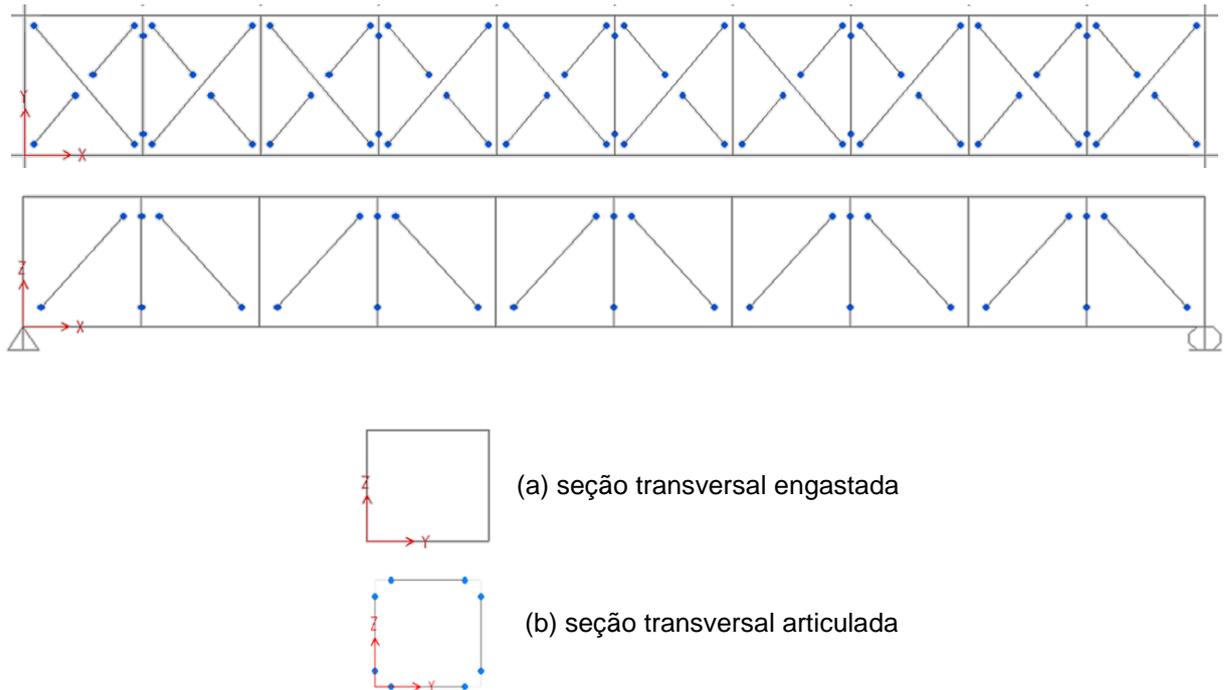
Figura 38 – Modelagem estrutural da passarela no *software SAP 2000*



Fonte: Autoria própria.

Foram considerados apoios articulados em ambas as extremidades, com restrição de deslocamento longitudinal apenas nos dois apoios da extremidade inicial, conforme a Figura 38. Em relação às condições de apoio das barras, foram configuradas restrições articuladas ou engastadas de acordo com a Figura 39.

Figura 39 – Restrições de apoio das barras da passarela no *software SAP 2000*



Fonte: Autoria própria.

Foram considerados pórticos quadrados engastados transversalmente a cada 5,0 m, intercalados com pórticos articulados para as demais seções transversais. Essa solução foi estabelecida para limitar o deslocamento horizontal de topo de pilar dos montantes. As diagonais e contraventamentos são todas estabelecidas como articuladas. Os banzos são considerados contínuos e engastados aos dois pórticos quadrados nas extremidades.

Após a modelagem e inserção das ações solicitantes do Quadro 5, também foram configuradas as combinações para os estados-limites últimos e de serviço com seus respectivos coeficientes de ponderação. Foram considerados os estados-limites últimos normais (N) e excepcionais (E), e os estados-limites de serviço quase-permanente (QP), frequentes (F) e raros (R), para as ações permanentes, acidentais e excepcionais. Os coeficientes de ponderação para as ações permanentes nos

estados-limites últimos foram estabelecidos como 1,4 e para os estados-limites de serviço como 1,0, conforme o Quadro 11.

Quadro 11 – Combinações de estados-limites com respectivos coeficientes de ponderação

Estados -limites	Designação	Permanente				Acidental							Excep.
		Estrutura metálica	Laje alveolar, guarda-corpos e corrimãos	Grade de proteção	Cobertura de policarbonato com estrutura metálica tubular secundária	Sobrecarga de uso e ocupação	Sobrecarga de cobertura	Variação de Temperatura	Ação do vento em reticulados paralelos	Ação do vento em cobertura isolada plana de duas águas		Choque horizontal de veículos	
										Primeiro carregamento	Segundo carregamento		
		DEAD				LIVE	TEMP	WIND		EXCEP			
ELU N	COMB 1	1,4	1,4	1,4	1,4	<b>1,5</b>	1,2	0,72	0,84	0,84	-	-	
	COMB 2	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	<b>1,5</b>	0,72	0,84	0,84	-	-	
	COMB 3	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	1,2	<b>1,2</b>	0,84	0,84	-	-	
	COMB 4	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	1,2	0,72	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>	-	-	
	COMB 5	1,4	1,4	1,4	1,4	<b>1,5</b>	-	0,72	0,84	-	0,84	-	
	COMB 6	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	<b>1,5</b>	0,72	0,84	-	0,84	-	
	COMB 7	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	-	<b>1,2</b>	0,84	-	0,84	-	
	COMB 8	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	-	0,72	<b>1,4</b>	-	<b>1,4</b>	-	
ELU E	COMB 1	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	1,2	0,72	0,84	0,84	-	<b>1,0</b>	
	COMB 2	1,4	1,4	1,4	1,4	0,9	-	0,72	0,84	-	0,84	<b>1,0</b>	
ELS QP	COMB 1	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,6	0,3	-	-	-	-	
ELS F	COMB 1	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>0,4</b>	0,6	0,3	-	-	-	-	
	COMB 2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	<b>0,7</b>	0,3	-	-	-	-	
	COMB 3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,6	<b>0,5</b>	-	-	-	-	
	COMB 4	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,6	0,3	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	-	-	
	COMB 5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	-	0,3	<b>0,3</b>	-	<b>0,3</b>	-	
ELS R	COMB 1	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>	0,7	0,5	0,3	0,3	-	-	
	COMB 2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	<b>1,0</b>	0,5	0,3	0,3	-	-	
	COMB 3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	0,7	<b>1,0</b>	0,3	0,3	-	-	
	COMB 4	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	0,7	0,5	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	-	-	
	COMB 5	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>	-	0,5	0,3	-	0,3	-	
	COMB 6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	<b>1,0</b>	0,5	0,3	-	0,3	-	
	COMB 7	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	-	<b>1,0</b>	0,3	-	0,3	-	
	COMB 8	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	-	0,5	<b>1,0</b>	-	<b>1,0</b>	-	

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS

As propriedades geométricas das barras dimensionadas para o ELU são apresentadas no Quadro 12.

Quadro 12 – Propriedades geométricas das barras dimensionadas para o ELU

Propriedades Geométricas	Símbolo	Un.	Transversinas	Banzos	Montantes	Diagonais	Contrav.
			2Ue 250x85x25x2,65	2Ue 250x85x25x3,75	120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
							
Comprimento destravado das barras	<b>Lb</b>	cm	297,00	250,00	275,00	371,65	388,21
Altura externa do perfil	<b>bw</b>	cm	25,00	25,00	12,00	12,00	6,00
Largura externa do perfil	<b>bf</b>	cm	8,50	8,50	12,00	12,00	6,00
Altura externa do enrijecedor	<b>D</b>	cm	2,50	2,50	-	-	-
Espessura do elemento	<b>t</b>	cm	0,265	0,375	0,475	0,475	0,360
Raio interno de dobramento	<b>ri</b>	cm	0,265	0,375	0,475	0,475	0,360
Raio externo de dobramento	<b>re</b>	cm	0,530	0,750	0,950	0,950	0,720
Área bruta das seções transversais	<b>A</b>	cm <sup>2</sup>	23,97	33,37	21,29	21,29	7,77
Constante de torção da seção	<b>J</b>	cm <sup>4</sup>	2192,89	3044,27	745,49	745,49	66,81
Momento de inércia em relação ao eixo x	<b>Ix</b>	cm <sup>4</sup>	2260,75	3099,13	464,49	464,49	40,26
Momento de inércia em relação ao eixo y	<b>Iy</b>	cm <sup>4</sup>	1111,72	1537,37	464,49	464,49	40,26
Módulo de resistência elástico em relação ao eixo x	<b>Wx</b>	cm <sup>3</sup>	180,86	247,93	77,42	77,42	13,42
Módulo de resistência elástico em relação ao eixo y	<b>Wy</b>	cm <sup>3</sup>	130,79	180,87	77,42	77,42	13,42
Módulo de resistência plástico em relação ao eixo x	<b>Zx</b>	cm <sup>3</sup>	-	-	91,12	91,12	16,18
Módulo de resistência plástico em relação ao eixo y	<b>Zy</b>	cm <sup>3</sup>	-	-	91,12	91,12	16,18
Raio de giração em relação ao eixo x	<b>rx</b>	cm	9,71	9,64	4,67	4,67	2,28
Raio de giração em relação ao eixo y	<b>ry</b>	cm	6,81	6,79	4,67	4,67	2,28
Largura do elemento (mesa)	<b>b (mesa)</b>	cm	7,44	3,09	10,10	10,10	4,56
Largura do elemento (alma)	<b>b (alma)</b>	cm	23,94	24,09	10,10	10,10	4,56
Largura do elemento (enrijecedor)	<b>d</b>	cm	1,97	0,74	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

### 4.3.1 Barras submetidas à força axial de tração

As forças axiais de tração resistentes de cálculo dimensionadas das barras para o ELU são apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13 – Forças axiais de tração resistentes de cálculo das barras dimensionadas para o ELU

Barras submetidas à força axial de tração				Trans-versinas	Banzos	Montantes	Diagonais	Contra-ventamentos
Item	Designação	Símb.	Un.	2Ue 250x85x25x2,65	2Ue 250x85x25x3,75	120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=3,60mm)
a)	Força axial de tração resistente de cálculo de escoamento da seção bruta	<i>Nt, Rd</i>	kN	751,26	1045,83	667,30	667,30	243,63
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
b)	Força axial de tração resistente de cálculo de ruptura na seção líquida fora da região da ligação	<i>Nt, Rd</i>	kN	-	-	-	-	-
		$\gamma$	-	-	-	-	-	-
	Área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação	<i>An0</i>	cm <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
c)	Força axial de tração resistente de cálculo de ruptura da seção líquida na região da ligação	<i>Nt, Rd</i>	kN	-	-	441,78	441,78	161,29
		$\gamma$	-	-	-	1,35	1,35	1,35
	Área líquida da seção transversal da barra na região da ligação	<i>An</i>	cm <sup>2</sup>	-	-	21,29	21,29	7,77
	Dimensão do furo na direção perpendicular à sollicitação	<i>df</i>	cm	-	-	-	-	-
	Quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada	<i>nf</i>	-	-	-	-	-	-
	Excentricidade da ligação parafusada	<i>x</i>	cm	-	-	-	-	-
	Comprimento da ligação parafusada	<i>L</i>	cm	-	-	-	-	-
	Coeficiente de redução da área líquida para perfis U com dois ou mais parafusos na direção da sollicitação, sendo que nem todos os elementos estão conectados	<i>Ct</i>	-	-	-	-	-	-
	Área líquida efetiva da barra na região da ligação	<i>Ae</i>	cm <sup>2</sup>	-	-	13,31	13,31	4,86
	Excentricidade da ligação	<i>ec</i>	cm	-	-	4,50	4,50	2,25
Comprimento efetivo da ligação com solda na direção da força axial	<i>lc ≥ b</i>	cm	-	-	12,00	12,00	6,00	
Coeficiente de redução da área líquida para barras com seção tubular quadrada quando a força de tração for transmitida somente por soldas longitudinais	<i>Ct</i>	-	-	-	0,63	0,63	0,63	

Fonte: Autoria própria.

### 4.3.2 Barras submetidas à força axial de compressão

As forças axiais de compressão resistentes de cálculo dimensionadas das barras são apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Forças axiais de compressão resistentes de cálculo das barras dimensionadas para o ELU

Barras submetidas à força axial de compressão				Transversinas		Banzos		Montantes	Diagonais	Contrav.
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75		120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo						
				Esforço resistente	Desloca-mentos	Esforço resistente	Desloca-mentos	Esforço resistente (ER)		
a)	<b>Força axial de flambagem global elástica por flexão para perfis com dupla simetria</b>	$N_e$	<b>kN</b>	<b>2487,77</b>	-	<b>4855,44</b>	-	<b>1212,39</b>	<b>663,80</b>	<b>52,73</b>
	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x	$N_{ex}$	kN	5059,06	-	9787,89	-	1212,39	663,80	52,73
	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y	$N_{ey}$	kN	2487,77	-	4855,44	-	1212,39	663,80	52,73
	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x	$K_x L_x$	cm	297,00	-	250,00	-	275,00	371,65	388,21
	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y	$K_y L_y$	cm	297,00	-	250,00	-	275,00	371,65	388,21
	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global	$\lambda_0$	-	0,58	-	0,49	-	0,78	1,05	2,25
	Fator de redução	$\chi$	-	0,87	-	0,91	-	0,78	0,63	0,17
	Tensão normal de compressão	$\sigma$	kN/cm <sup>2</sup>	30,00	15,88	31,22	14,85	34,47	34,47	34,47
b)	<b>Força axial de compressão resistente de cálculo</b>	$N_c, R_d$	<b>kN</b>	<b>391,75</b>	<b>461,85</b>	<b>666,42</b>	<b>788,01</b>	<b>517,92</b>	<b>420,06</b>	<b>42,04</b>
		$\gamma$	-	1,20	<b>1,20</b>	1,20	1,20	1,10	1,10	1,10
	Área efetiva da seção composta transversal das barras pelo MSE	$A_{ef, MSE}$	cm <sup>2</sup>	14,66	-	25,62	-	-	-	-
	Área efetiva da seção composta transversal das barras pelo MLE	$A_{ef, MLE}$	cm <sup>2</sup>	15,67	18,47	26,61	30,29	-	-	-
	Área efetiva da seção transversal das barras tubulares	$A_{ef}$	cm <sup>2</sup>	-	-	-	-	21,29	21,29	7,77

Fonte: Autoria própria.

Os cálculos das áreas efetivas resistentes à força axial para as transversinas e banzos de compressão são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 – Áreas efetivas resistentes à força axial de compressão para transversinas e banzos

Áreas Efetivas resistentes à força axial de compressão				Transversinas		Banzos			
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75			
Método/ Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo					
				ER	Desloc.	ER	Desloc.		
MLE	Elem. AA e AL Alma	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	8,86	8,86	17,52	18,41	
		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_p$	-	1,84	1,34	1,33	0,90	
		<b>Largura efetiva do elemento</b>	$b_{ef}$	<b>cm</b>	<b>11,45</b>	<b>14,94</b>	<b>15,07</b>	<b>19,76</b>	
		Coeficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	4,00	4,00	4,00	4,00	
	Elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples	Mesa	Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_{p0}$	-	1,75	1,27	0,52	0,82
			Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido	$I_s$	cm <sup>4</sup>	0,17	0,1688	-	0,1675
			Momento de inércia de referência do enrijecedor de borda	$I_a$	cm <sup>4</sup>	0,28	0,0482	-	0,0027
			Momento de inércia máximo de referência do enrijecedor de borda	$I_a, máx$	cm <sup>4</sup>	0,51	0,3754	-	1,0229
			Relação entre $I_s$ e $I_a \leq 1$	$I_s/I_a$	-	0,60	1,00	-	1,00
			Parcela 1 da largura efetiva do elemento	$b_{ef,1}$	cm	2,18	3,72	-	3,50
		Parcela 2 da largura efetiva do elemento	$b_{ef,2}$	cm	5,05	3,72	-	3,50	
		<b>Largura efetiva do elemento</b>	$b_{ef}$	<b>cm</b>	<b>7,23</b>	<b>7,44</b>	<b>3,09</b>	<b>7,00</b>	
		Enrijecedor	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	59,34	69,48	-	151,70
			Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_p$	-	0,71	0,48	-	0,31
			Relação entre $D$ e $b (\leq 0,8)$	$D/b$	-	0,34	0,34	-	0,36
			Coeficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	2,59	3,03	-	2,92
			Parâmetro para o cálculo do coeficiente de flambagem local do elemento ( $\geq 0,33$ )	$n$	-	0,37	0,43	-	0,48
	<b>Largura efetiva reduzida do elemento (<math>\leq def</math>)</b>		$d_s$	<b>cm</b>	<b>0,60</b>	<b>1,28</b>	<b>0,74</b>	<b>1,57</b>	
	Largura efetiva do elemento		$def$	cm	0,99	1,28	0,74	1,57	
	a)	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	9,86	9,86	114,69	22,31	
		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_p$	-	1,74	1,27	0,52	0,82	
		Coeficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	0,43	0,43	0,43	0,43	
		<b>Área efetiva da seção transversal das barras compostas pelo MLE</b>	$A_{ef}$	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>15,67</b>	<b>18,47</b>	<b>26,61</b>	<b>30,29</b>	
	b)	Relação entre $bf$ e $bw$	$n$	-	0,34	-	0,34	-	
		Relação entre $D$ e $bw$	$D/bw$	-	0,10	-	0,1	-	
		Índice de esbeltez reduzido da seção	$\lambda_p$	-	1,62	-	1,16	-	
		Força axial de flambagem local elástica	$N_l$	kN	275,47	-	767,92	-	
Coeficiente de flambagem local para a seção completa		$kl$	-	5,66	-	5,66	-		
<b>Área efetiva da seção transversal das barras compostas pelo MSE</b>		$A_{ef}$	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>14,66</b>	<b>-</b>	<b>25,62</b>	<b>-</b>		

Fonte: Autoria própria.

Os cálculos das áreas efetivas resistentes à força axial para os montantes, diagonais e contraventamentos de compressão são apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 – Áreas efetivas resistentes à força axial de compressão para seções tubulares

Áreas Efetivas resistentes à força axial de compressão						
Item	Designação	Símb.	Un.	Montantes	Diagonais	Contrav.
				120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
a)	Fator de redução total associado à flambagem local	$Q$	-	1,00	1,00	1,00
	Relação limite entre $b$ e $t$	$(b/t)_{lim}$	-	33,72	33,72	33,72
	Relação entre $b$ e $t$	$b/t$	-	21,26	21,26	12,67
	Relação entre $d$ e $t$	$d/t$	-	21,26	21,26	12,67
	Fator de redução total associado à flambagem local para seções tubulares quadradas	$Q_s$	-	1,00	1,00	1,00
	<b>Área efetiva da seção transversal</b>	<b><math>A_{ef}</math></b>	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>21,29</b>	<b>21,29</b>	<b>7,77</b>
	Largura efetiva dos elementos AA (largura)	$be_f \leq b$	cm	10,10	10,10	4,56
	Largura efetiva dos elementos AA (altura)	$de_f \leq d$	cm	10,10	10,10	4,56
	Coefficiente para mesas ou almas de seções tubulares retangulares	$ca$	-	0,38	0,38	0,38

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.3 Barras submetidas a momento de torção

Os resultados obtidos no dimensionamento dos momentos de torção resistentes de cálculo são apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 – Momento de torção resistente de cálculo para seções tubulares

Momento de torção resistente de cálculo						
Item	Designação	Símbolo	Unidade	Montantes	Diagonais	Contrav.
				120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
a)	<b>Momento de torção resistente de cálculo</b>	$TRd$	<b>kNm</b>	<b>23,65</b>	<b>23,65</b>	<b>4,27</b>
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10
	Módulo de resistência à torção	$W_T$	cm <sup>3</sup>	125,77	125,77	22,72
	Relação entre $h$ e $t$	$h/t$	-	11,05	11,05	5,28

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.4 Barras submetidas à flexão simples

Para barras submetidas à flexão simples foram consideradas os momentos fletores e as forças cortantes resistentes de cálculo. Os cálculos dos momentos

fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y para as transversinas e banzos são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 – Momentos fletores resistentes de cálculo para as transversinas e banzos

Barras submetidas à flexão simples em relação aos eixos x e y				Transversinas		Banzos	
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75	
Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo			
				Esforço resistente	Desloca-mentos	Esforço resistente	Desloca-mentos
a)	<b>Momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x do início de escoamento da seção transversal</b>	$M_x, R_d$	kNm	<b>51,94</b>	<b>55,63</b>	<b>76,56</b>	<b>77,42</b>
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10
	Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento em relação ao eixo x	$W$	cm <sup>3</sup>	180,86	180,86	247,93	247,93
	Módulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MLE em relação ao eixo x	$W_{ef, MLE}$	cm <sup>3</sup>	172,02	177,52	244,30	247,04
	Módulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MSE em relação ao eixo x	$W_{ef, MSE}$	cm <sup>3</sup>	165,74	180,86	247,93	247,93
b)	<b>Momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x de flambagem lateral com torção</b>	$M_x, R_d$	kNm	<b>51,94</b>	<b>55,63</b>	<b>77,70</b>	<b>77,42</b>
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10
	Fator de redução do momento fletor resistente	$XFLT$	-	1,00	1,00	1,00	1,00
	Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida em relação ao eixo x	$W_c$	cm <sup>3</sup>	180,86	180,86	247,93	247,93
	Módulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida pelo MLE em relação ao eixo x	$W_{c, ef, MLE}$	cm <sup>3</sup>	172,02	177,52	244,30	247,04
	Módulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida pelo MSE em relação ao eixo x	$W_{c, ef, MSE}$	cm <sup>3</sup>	165,74	180,86	247,93	247,93
c)	<b>Momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y do início de escoamento da seção transversal</b>	$M_y, R_d$	kNm	<b>32,45</b>	<b>34,83</b>	<b>48,56</b>	<b>53,11</b>
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10
	Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento em relação ao eixo y	$W$	cm <sup>3</sup>	130,79	130,79	180,87	180,87
	Módulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MLE em relação ao eixo y	$W_{ef, MLE}$	cm <sup>3</sup>	103,53	111,15	154,94	169,46

Fonte: Autoria própria.

No Quadro 19 são estabelecidos os módulos de resistência elásticos efetivos resistentes à flexão simples em relação ao eixo x das transversinas e banzos.

Quadro 19 – Módulos de resistência elásticos efetivos em relação ao eixo x das seções não tubulares (continua)

Módulos de Resistência Elásticos Efetivos resistentes à flexão simples em relação ao eixo x				Transversinas		Banzos				
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75				
Método/ Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo						
				ER	Desloc.	ER	Desloc.			
MLE	Elem. AA e AL Alma	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	53,16	53,16	105,15	110,47		
		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda p$	-	0,75	0,55	0,54	0,37		
		<b>Largura efetiva do elemento</b>	<b>bef</b>	<b>cm</b>	<b>23,24</b>	<b>23,94</b>	<b>24,09</b>	<b>23,50</b>		
		Coefficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	24,00	24,00	24,00	24,00		
		Tensão normal de compressão 1	$\sigma_1$	kN/cm <sup>2</sup>	17,18	12,33	2,56	1,65		
		Tensão normal de compressão 2	$\sigma_2$	kN/cm <sup>2</sup>	-17,18	-12,33	-2,56	-1,65		
		Relação entre $\sigma_1$ e $\sigma_2$ ( $\leq -0,236$ )	$\psi$	-	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00		
		Parcela 1 da largura efetiva do elemento	$bef, 1$	cm	5,81	5,99	6,02	5,88		
		Parcela 2 da largura efetiva do elemento	$bef, 2$	cm	5,46	5,99	6,02	5,88		
	Elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples	Mesa	Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda p_0$	-	1,75	1,27	1,18	0,82	
			Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido	$I_s$	cm <sup>4</sup>	0,17	0,17	0,17	0,17	
			Momento de inércia de referência do enrijecedor de borda	$I_a$	cm <sup>4</sup>	0,28	0,05	0,12	0,01	
			Momento de inércia máximo de referência do enrijecedor de borda	$I_a, máx$	cm <sup>4</sup>	0,51	0,38	1,41	1,01	
			Relação entre $I_s$ e $I_a \leq 1$	$I_s/I_a$	-	0,60	1,00	1,00	1,00	
			Parcela 1 da largura efetiva do elemento	$bef, 1$	cm	2,18	3,72	3,50	3,50	
			Parcela 2 da largura efetiva do elemento	$bef, 2$	cm	5,05	3,72	3,50	3,50	
			<b>Largura efetiva do elemento</b>	<b>bef</b>	<b>cm</b>	<b>7,23</b>	<b>7,44</b>	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>	
			Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	59,34	69,48	151,70	151,70	
Enrijecedor		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda p$	-	0,71	0,48	0,45	0,31		
		Relação entre $D$ e $b$ ( $\leq 0,8$ )	$D/b$	-	0,34	0,34	0,36	0,36		
		Coefficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	2,59	3,03	2,92	2,92		
		Parâmetro para o cálculo do coeficiente de flambagem local do elemento ( $\geq 0,33$ )	$n$	-	0,37	0,43	0,44	0,48		
		<b>Largura efetiva reduzida do elemento (<math>\leq def</math>)</b>	<b>ds</b>	<b>cm</b>	<b>0,63</b>	<b>1,35</b>	<b>1,26</b>	<b>1,63</b>		
		Largura efetiva do elemento	$def$	cm	1,04	1,35	1,26	1,63		
	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	11,28	11,28	25,17	25,17			
	Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda p$	-	1,63	1,19	1,11	0,77			
a)	Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo x	$I_{x, ef}$	cm <sup>4</sup>	2150,21	2218,98	3053,77	3088,00			
				Tensão normal de compressão 1	$\sigma_1$	kN/cm <sup>2</sup>	17,18	12,33	2,50	1,65
				Tensão normal de compressão 2	$\sigma_2$	kN/cm <sup>2</sup>	14,36	10,30	2,13	1,41
				Relação entre $\sigma_1$ e $\sigma_2$ ( $0 \leq \psi < 1,0$ )	$\psi$	-	0,84	0,84	0,85	0,85

Quadro 19 – Módulos de resistência elásticos efetivos em relação ao eixo x das seções não tubulares (conclusão)

Módulos de Resistência Efetivas resistentes à flexão simples em relação ao eixo x				Transversinas		Banzos		
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75		
Método/ Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo				
				ER	Desloc.	ER	Desloc.	
MLE	b)	<b>Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MLE em relação ao eixo x</b>	$W_{ef}$	cm <sup>3</sup>	<b>172,02</b>	<b>177,52</b>	<b>244,30</b>	<b>247,04</b>
	c)	<b>Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida pelo MLE em relação ao eixo x</b>	$W_{c,ef}$	cm <sup>3</sup>	<b>172,02</b>	<b>177,52</b>	<b>244,30</b>	<b>247,04</b>
MSE	d)	Índice de esbelteza reduzido da seção	$\lambda p$	-	0,79	-	0,56	-
		Momento fletor de flambagem local elástica	$M_l$	kNm	10101	-	27730	-
		Coeficiente de flambagem local para a seção completa	$k_l$	-	27,50	-	27,50	-
		Relação entre $bf$ e $bw$	$bf/bw$	-	0,34	-	0,34	-
		Relação entre $D$ e $bw$	$D/bw$	-	0,10	-	0,10	-
		<b>Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MSE em relação ao eixo x</b>	$W_{ef}$	cm <sup>3</sup>	<b>165,74</b>	<b>180,86</b>	<b>247,93</b>	<b>247,93</b>
	e)	Índices de esbelteza reduzido da seção	$\lambda p$	-	0,79	-	0,56	-
			$\lambda 0$	-	0,16	-	0,14	-
		Momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico	$M_e$	kNm	2327,87	-	4262,11	-
		Fator de modificação para momento fletor não uniforme	$C_b$	-	1,14	-	1,26	-
		Máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo	$M_{máx}$	kNm	32,45	-	6,59	-
		Valor do momento fletor solicitante de cálculo no 1º quarto	$M_A$	kNm	24,34	-	5,79	-
		Valor do momento fletor solicitante de cálculo no centro	$M_B$	kNm	32,45	-	4,91	-
Valor do momento fletor solicitante de cálculo no 3º quarto	$M_C$	kNm	24,34	-	3,90	-		
		<b>Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida pelo MSE em relação ao eixo</b>	$W_{c,ef}$	cm <sup>3</sup>	<b>165,74</b>	<b>180,86</b>	<b>247,93</b>	<b>247,93</b>
f)		<b>Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo x</b>	$I_{x,ef}$	cm <sup>4</sup>	-	<b>2260,75</b>	-	<b>3099,13</b>
		Índice de esbelteza reduzido da seção	$\lambda p d$	-	-	0,047	-	0,013
		Momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço	$M_n$	kNm	-	23,29	-	4,36

Fonte: Autoria própria.

Também foram calculados os módulos de resistência elásticos efetivos resistentes à flexão simples em relação ao eixo y, para as transversinas e banzos. Os

resultados obtidos para os cálculos do esforço resistente e dos deslocamentos podem ser observados no Quadro 20.

Quadro 20 – Módulos de resistência elásticos efetivos em relação ao eixo y das seções não tubulares

Módulos de Resistência Elásticos Efetivos resistentes à flexão simples em relação ao eixo y				Transversinas		Banzos		
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75		
Método/ Item	Designação	Símb.	Un.	Cálculo				
				ER	Desloc.	ER	Desloc.	
MLE	Alma	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	8,86	8,86	18,41	18,41
		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_p$	-	1,84	1,43	1,30	0,90
		<b>Largura efetiva do elemento</b>	<b><math>bef</math></b>	<b>cm</b>	<b>11,45</b>	<b>14,94</b>	<b>15,00</b>	<b>19,76</b>
		Coefficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	4,00	4,00	4,00	4,00
	Mesa	<b>Largura efetiva do elemento</b>	<b><math>bef</math></b>	<b>cm</b>	<b>7,44</b>	<b>7,44</b>	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>
		Tensão convencional de flambagem elástica do elemento	$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	171,86	171,86	377,67	377,67
		Índice de esbeltez reduzido do elemento	$\lambda_p$	-	0,42	0,30	0,29	0,20
		Coefficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	7,49	7,49	7,28	7,28
		Tensão normal de compressão 1	$\sigma_1$	kN/cm <sup>2</sup>	0,013	0,002	0,014	0,005
		Tensão normal de compressão 2	$\sigma_2$	kN/cm <sup>2</sup>	0,001	0,001	0,001	0,001
		Relação entre $\sigma_1$ e $\sigma_2$ ( $0 \leq \psi < 1,0$ )	$\psi$	-	0,07	0,07	0,10	0,10
		Parcela 1 da largura efetiva do elemento	$bef, 1$	cm	2,54	2,54	2,41	2,41
		Parcela 2 da largura efetiva do elemento	$bef, 2$	cm	4,90	4,90	5,49	4,59
		Enrijecedor	<b>Largura efetiva do elemento</b>	<b><math>def</math></b>	<b>cm</b>	<b>0,99</b>	<b>1,28</b>	<b>1,20</b>
	Tensão convencional de flambagem elástica do elemento		$\sigma_{cr}$	kN/cm <sup>2</sup>	9,86	9,86	22,31	22,31
	Índice de esbeltez reduzido do elemento		$\lambda_p$	-	1,74	1,27	1,18	0,82
			Coefficiente de flambagem local do elemento	$k$	-	0,43	0,43	0,43
	a)	<b>Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo y</b>	<b><math>I_{y, ef}</math></b>	<b>cm<sup>4</sup></b>	<b>880,03</b>	<b>944,75</b>	<b>1317,01</b>	<b>1440,40</b>
	b)	<b>Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento pelo MLE em relação ao eixo y</b>	<b><math>W_{ef}</math></b>	<b>cm<sup>3</sup></b>	<b>103,53</b>	<b>111,15</b>	<b>154,94</b>	<b>169,46</b>

Fonte: Autoria própria.

Os momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y para os montantes, diagonais e contraventamentos são apresentados no Quadro 21.

Quadro 21 – Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y de seções tubulares

<b>Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y</b>						
Item	Designação	Símb.	Un.	Montantes	Diagonais	Contrav.
				120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
a)	<b>Momento fletor resistente de cálculo em relação aos eixos x e y</b>	<b><math>MRd</math></b>	<b>kNm</b>	<b>28,56</b>	<b>28,56</b>	<b>5,02</b>
		$\gamma a1$	-	1,10	1,10	1,10
b)	<b>Momento fletor de plastificação da seção transversal</b>	<b><math>Mpl</math></b>	<b>kNm</b>	<b>31,41</b>	<b>31,41</b>	<b>5,58</b>
c)	<b>Momento fletor resistente de cálculo de flambagem local da alma (FLA)</b>	<b><math>MRd</math></b>	<b>kNm</b>	<b>28,56</b>	<b>28,56</b>	<b>5,07</b>
	Momento fletor correspondente ao início do escoamento	$Mr$	kNm	26,69	26,69	4,63
	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento	$W$	cm <sup>3</sup>	77,42	77,42	13,42
	Parâmetro de esbeltez	$\lambda \leq \lambda r$	-	21,26	21,26	12,67
	Parâmetro de esbeltez relativo à plastificação	$\lambda p$	-	58,29	58,29	58,29
	Parâmetro de esbeltez relativo ao início do escoamento	$\lambda r$	-	137,29	137,29	137,29
d)	<b>Momento fletor resistente de cálculo de flambagem local da mesa comprimida (FLM)</b>	<b><math>MRd</math></b>	<b>kNm</b>	<b>28,56</b>	<b>28,56</b>	<b>5,07</b>
	Momento fletor correspondente ao início do escoamento	$Mr$	kNm	26,69	26,69	4,63
	Módulo de resistência mínimo elástico para uma seção que tem uma mesa comprimida	$Wef$	cm <sup>3</sup>	77,42	77,42	13,42
	Momento fletor em relação ao eixo X efetivo	$Ix, ef$	cm <sup>4</sup>	464,49	464,49	40,26
	Momento fletor de flambagem elástica	$Mcr$	kNm	26,69	26,69	4,63
	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento	$W$	cm <sup>3</sup>	77,42	77,42	13,42
	Parâmetro de esbeltez	$\lambda$	-	21,26	21,26	12,67
	Parâmetro de esbeltez relativo à plastificação	$\lambda p$	-	26,98	26,98	26,98
	Parâmetro de esbeltez relativo ao início do escoamento	$\lambda r$	-	33,72	33,72	33,72
e)	<b>Momento fletor resistente de cálculo de flambagem lateral com torção (FLT)</b>	<b><math>MRd</math></b>	<b>kNm</b>	<b>28,56</b>	<b>28,56</b>	<b>5,02</b>
	Momento fletor correspondente ao início do escoamento	$Mr$	kNm	18,68	18,68	3,24
	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento	$W$	cm <sup>3</sup>	77,42	77,42	13,42
	Tensão residual de compressão nas mesas	$0,3fy$	kN/cm <sup>2</sup>	10,34	10,34	10,34
	Momento fletor de flambagem elástica	$Mcr$	kNm	87,54	39,17	7,84
	Fator de modificação	$Cb \leq 3,0$	-	2,18	1,32	1,14
	Máximo momento fletor solicitante de cálculo	$Mmáx$	kNm	9,74	0,42	0,15
	Momento fletor solicitante de cálculo no 1º quarto	$MA$	kNm	2,61	0,21	0,12
	Momento fletor solicitante de cálculo no centro	$MB$	kNm	1,48	0,42	0,15
	Momento fletor solicitante de cálculo no 3º quarto	$MC$	kNm	5,94	0,21	0,12
	Parâmetro de esbeltez	$\lambda$	-	58,88	79,57	170,60
	Parâmetro de esbeltez relativo à plastificação	$\lambda p$	-	104,28	104,28	106,21
	Parâmetro de esbeltez relativo ao início do escoamento	$\lambda r$	-	-	2697,61	2815,20

Fonte: Autoria própria.

As forças cortantes resistentes de cálculo dimensionadas das barras são apresentadas no Quadro 22.

Quadro 22 – Forças cortantes resistentes de cálculo dimensionadas para o ELU

Forças cortantes resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y				Transversinas		Banzos		Montantes	Diagonais	Contrav.
				2Ue 250x85x25x2,65		2Ue 250x85x25x3,75		120x120mm (e=4,75mm)	120x120mm (e=4,75mm)	60x60mm (e=3,60mm)
Item	Designação	Símbolo	Un.	Cálculo						
				Esforço Resistente	Desloca- mentos	Esforço Resistente	Desloca- mentos	Esforço resistente		
a)	<b>Força cortante resistente de cálculo em relação ao eixo x</b>	$V_{x,rd}$	<b>kN</b>	<b>63,95</b>	<b>63,95</b>	<b>309,57</b>	<b>309,57</b>	-	-	-
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10	-	-	-
	Relação entre $b$ ( <i>alma</i> ) e $t$	$b$ ( <i>alma</i> )/ $t$	-	90,34	90,34	64,23	64,23	-	-	-
	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento para alma sem enrijecedores transversais	$k_v$	-	5,00	5,00	5,00	5,00	-	-	-
b)	<b>Força cortante resistente de cálculo em relação ao eixo y</b>	$V_{y,rd}$	<b>kN</b>	<b>37,07</b>	<b>37,07</b>	<b>87,08</b>	<b>87,08</b>	-	-	-
		$\gamma$	-	1,10	1,10	1,10	1,10	-	-	-
	Relação entre $b$ ( <i>mesa</i> ) e $t$	$b$ ( <i>mesa</i> )/ $t$	-	28,08	28,08	8,23	8,23	-	-	-
	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento para alma sem enrijecedores transversais	$k_v$	-	5,00	5,00	5,00	5,00	-	-	-
c)	<b>Força cortante resistente de cálculo em relação aos eixos x e y</b>	$V_{Rd}$	<b>kN</b>	-	-	-	-	<b>180,42</b>	<b>180,42</b>	<b>61,74</b>
		$\gamma$	-	-	-	-	-	1,10	1,10	1,10
	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento para alma sem enrijecedores transversais	$k_v$	-	-	-	-	-	5,00	5,00	5,00
	Área efetiva de cisalhamento	$A_w$	cm <sup>2</sup>	-	-	-	-	9,60	9,60	3,28
	Índices para o cálculo da força cortante resistente em relação aos eixos x e y	$\lambda$	-	-	-	-	-	21,26	21,26	12,67
		$\lambda_p$	-	-	-	-	-	59,24	59,24	59,24
		$\lambda_r$	-	-	-	-	-	73,79	73,79	73,79
Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento	$V_{pl}$	kN	-	-	-	-	198,47	198,47	67,91	

Fonte: Autoria própria.

### 4.3.5 Esforços solicitantes e resistentes

No Quadro 23 é apresentado um resumo dos esforços solicitantes e resistentes do dimensionamento.

Quadro 23 – Esforços solicitantes e resistentes máximos de cada elemento dimensionado para os cálculos do esforço resistente e dos deslocamentos

Esforços		Força axial de tração (kN)		Força axial de compressão (kN)		Momento fletor em relação ao eixo x (kNm)		Momento fletor em relação ao eixo y (kNm)		Força cortante em relação ao eixo x (kN)		Força cortante em relação ao eixo y (kN)		Momento de torção (kNm)	
		<i>Nt, Sd</i>	<i>Nt, Rd</i>	<i>Nc, Sd</i>	<i>Nt, Rd</i>	<i>Mx, Sd</i>	<i>Mx, Rd</i>	<i>My, Sd</i>	<i>My, Rd</i>	<i>Vx, Sd</i>	<i>Vx, Rd</i>	<i>Vy, Sd</i>	<i>Vy, Rd</i>	<i>TSd</i>	<i>TRd</i>
<b>Transversinas</b> 2Ue 250x85x25x2,65	a)	56,73	751,26	121,40	391,75	32,45	51,94	1,84	32,45	47,46	63,95	1,20	37,07	-	-
	b)			73,18	366,53	23,29	55,63	0,33	34,83	32,06	127,91	0,24	148,29		
<b>Banzos</b> 2Ue 250x85x25x3,75	a)	617,73	1045,83	594,14	666,42	6,60	76,56	2,69	48,56	2,60	309,57	2,05	87,08	-	-
	b)			397,18	788,01	4,36	77,42	1,05	53,11	1,64	308,57	0,93	197,44		
<b>Montantes</b> 120x120mm (e=4,75mm)		46,67	441,78	9,76	517,92	1,99	28,56	9,74	28,56	1,45	180,42	6,04	180,42	0,20	23,65
<b>Diagonais</b> 120x120mm (e=4,75mm)		265,37	441,78	342,23	420,06	0,42	28,56	0,13	28,56	0,45	180,42	0,14	180,42	0,33	23,65
<b>Contraventamentos</b> 60x60mm (e=3,6mm)		89,83	161,29	39,56	42,04	0,15	5,02	0,00	5,02	0,16	61,74	0,00	61,74	0,06	4,27

Fonte: Autoria própria.

A partir do Quadro 23 podemos observar em vermelho as principais limitações no dimensionamento das barras: momento fletor solicitante em relação ao eixo de maior inércia para as transversinas; e as forças axiais solicitantes de compressão para os banzos, diagonais e contraventamentos.

#### 4.3.6 Barras submetidas à combinação de esforços solicitantes

Os máximos resultados das combinações para cada elemento de barras são apresentados no Quadro 24.

Quadro 24 – Combinações máximas de esforços solicitantes para cada elemento de barra

Combinação		Transversinas		Banzos			
Momento fletor e força cortante para barras sem enrijecedores transversais de alma	$\left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{x,Sd}}{V_{x,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$	ELU N COMB 1		ELU E COMB 1			
		$Mx, Sd: 10,32 \text{ kNm}$ $Vx, Sd: 47,46 \text{ kN}$	<b>0,59</b>	$Mx, Sd: 6,59 \text{ kNm}$ $Vx, Sd: 1,58 \text{ kN}$	<b>0,01</b>		
	$\left(\frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{y,Sd}}{V_{y,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$	ELU N COMB 1		ELU E COMB 2			
		$My, Sd: 1,84 \text{ kNm}$ $Vy, Sd: 1,20 \text{ kN}$	<b>0,01</b>	$My, Sd: 2,69 \text{ kNm}$ $Vy, Sd: 1,33 \text{ kN}$	<b>0,01</b>		
Flexão composta	$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$	ELU N COMB 1		ELU N COMB 1			
		$NSd: -89,63 \text{ kN}$ $Mx, Sd: 33,81 \text{ kNm}$ $My, Sd: 0,00 \text{ kN}$	<b>0,88</b>	$NSd: -594,14 \text{ kN}$ $Mx, Sd: 4,65 \text{ kNm}$ $My, Sd: 0,48 \text{ kN}$	<b>0,96</b>		
Combinação		Montantes		Diagonais		Contraventamentos	
Flexão composta	a) para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2: \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$ b) para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2: \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$	ELU N COMB 4		ELU N COMB 1		ELU N COMB 1	
		$NSd: -9,443 \text{ kN}$ $Mx, Sd: 1,74 \text{ kNm}$ $My, Sd: 9,74 \text{ kN}$	<b>0,32</b>	$NSd: -341,74 \text{ kN}$ $Mx, Sd: 0,42 \text{ kNm}$ $My, Sd: 0,08 \text{ kN}$	<b>0,81</b>	$NSd: -39,57 \text{ kN}$ $Mx, Sd: 0,15 \text{ kNm}$ $My, Sd: 0,00 \text{ kN}$	<b>0,95</b>
Forças cortantes simultâneas nas direções dos dois eixos centrais de inércia	a) escoamento: $\tau_{Sd} \leq \frac{0,60f_y}{\gamma_{a1}}$ b) instabilidade ou flambagem $\tau_{Sd} \leq \frac{0,60\chi f_y}{\gamma_{a1}}$	ELU N COMB 4		ELU N COMB 1		ELU N COMB 1	
		a) $\tau_{Rd}: 18,80 \text{ kN/cm}^2$ b) $\tau_{Rd}: 11,84 \text{ kN/cm}^2$	<b>0,62 kN/cm<sup>2</sup></b>	a) $\tau_{Rd}: 18,80 \text{ kN/cm}^2$ b) $\tau_{Rd}: 11,84 \text{ kN/cm}^2$	<b>0,05 kN/cm<sup>2</sup></b>	a) $\tau_{Rd}: 18,80 \text{ kN/cm}^2$ b) $\tau_{Rd}: 3,24 \text{ kN/cm}^2$	<b>0,05 kN/cm<sup>2</sup></b>

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos no Quadro 24 também pode-se observar em vermelho as limitações dos banzos e contraventamentos em relação às flexões compostas, devido, principalmente, às limitações das forças axiais de compressão.

Não foram consideradas as combinações de momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante, como indicadas no Quadro 7, pois os momentos de torção solicitantes de todas as barras não representaram o valor de 20% das resistentes, devendo-se, portanto, verificar em seu lugar as combinações de flexão composta.

#### 4.3.7 Limitação de esbeltez

Também foram verificadas as limitações de esbeltez, de 200 para barras comprimidas e 300 para barras tracionadas, para os elementos dimensionados, conforme a Tabela 11. Os perfis componentes de seções compostas também devem apresentar seus índices de esbeltez inferiores ao índice de esbeltez máximo do conjunto, conforme a NBR 14762 (ABNT, 2010b). A partir desse índice de esbeltez máximo do conjunto, igual a 140, também foram calculados os comprimentos máximos destravados das seções compostas para o caso de travejamento em treliça.

Tabela 11 – Limitação de esbeltez das barras dimensionadas

Elemento	K	Menor raio de giração da seção transversal, $r$ (cm)	Comprimento máximo destravado, $l$ (cm)	Índice de esbeltez	Comprimento máximo destravado de seções compostas (cm)
Transversinas	1,0	a) seção composta: 6,81	250,00	36,71	431,2
		b) perfil componente: 3,08	250,00	81,17	
Banzos	1,0	a) seção composta: 6,79	371,65	54,73	422,8
		b) perfil componente: 3,02	371,65	123,06	
Montantes	1,0	4,67	275,00	58,89	-
Diagonais	1,0	4,67	297,00	63,60	-
Contra-ventamentos	1,0	2,28	388,21	170,27	-

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.8 Verificação da frequência natural da estrutura de piso

Para a análise das vibrações nas estruturas de piso da passarela, executou-se a análise modal para a obtenção de sua frequência natural. Para o modo 1, a estrutura apresentou a frequência de 5,12 Hz e, conseqüentemente, o período de ciclo de 0,19548 s, atendendo, portanto, a frequência natural mínima de 3 Hz, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008).

### 4.3.9 Verificação dos deslocamentos máximos

Os deslocamentos máximos apresentados pela estrutura a partir da envoltória das combinações do estados-limites de serviço são dispostos no Quadro 25.

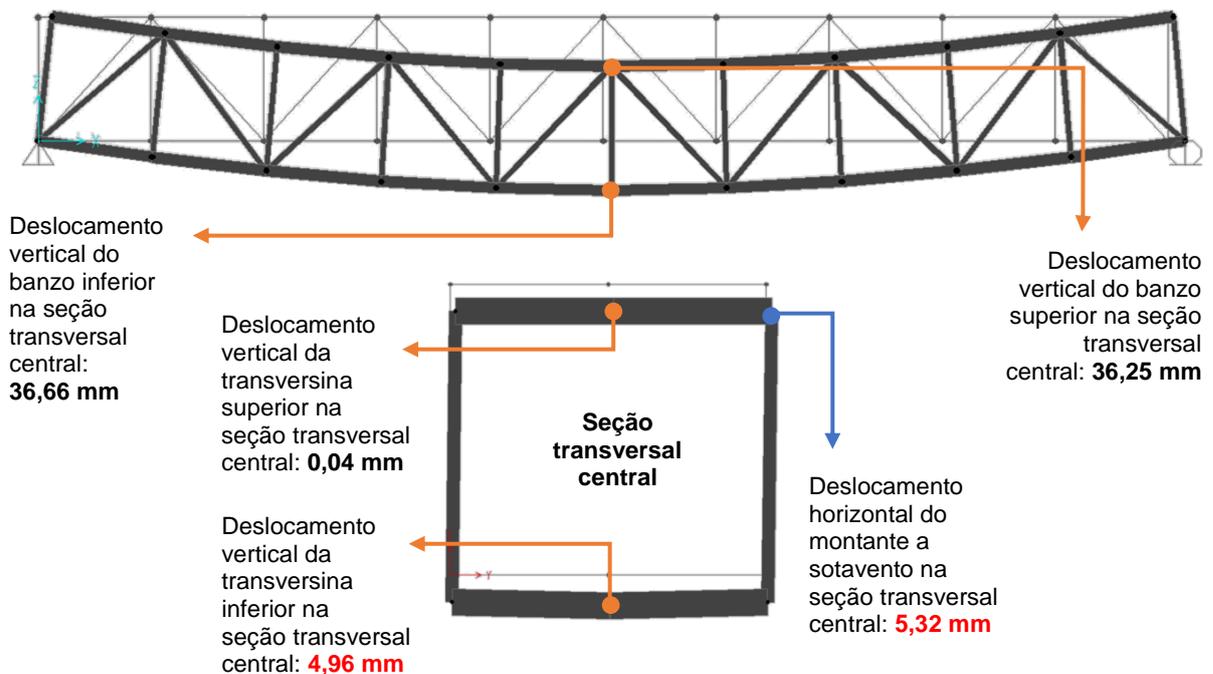
Quadro 25 – Deslocamentos máximos da estrutura pela envoltória das combinações do ELS

Descrição		Comprimento destravado do elemento, $L$ (cm)	$\delta_{adm}$ (mm)		$\delta$ (mm)
Vigas de cobertura	Transversinas	250,00	$L/250$	10,00	0,04
	Banzos superiores	2.500,00	$L/250$	100,00	36,25
Vigas de piso	Transversinas	250,00	$L/350$	7,14	4,96
	Banzos inferiores	2.500,00	$L/350$	71,43	36,66
Edifícios de um pavimento: deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	Montantes	275,00	$H/300$	9,17	5,32

Fonte: Autoria própria.

As respectivas posições dos pontos que apresentaram os maiores deslocamentos apresentados no Quadro 25 são indicados na Figura 40. Em vermelho são apresentadas as principais limitações no dimensionamento das barras em relação aos deslocamentos: nas transversinas de piso pelo deslocamento vertical e nos montantes pelos deslocamentos horizontais de topo de pilar.

Figura 40 – Modelagem estrutural da passarela no software SAP 2000



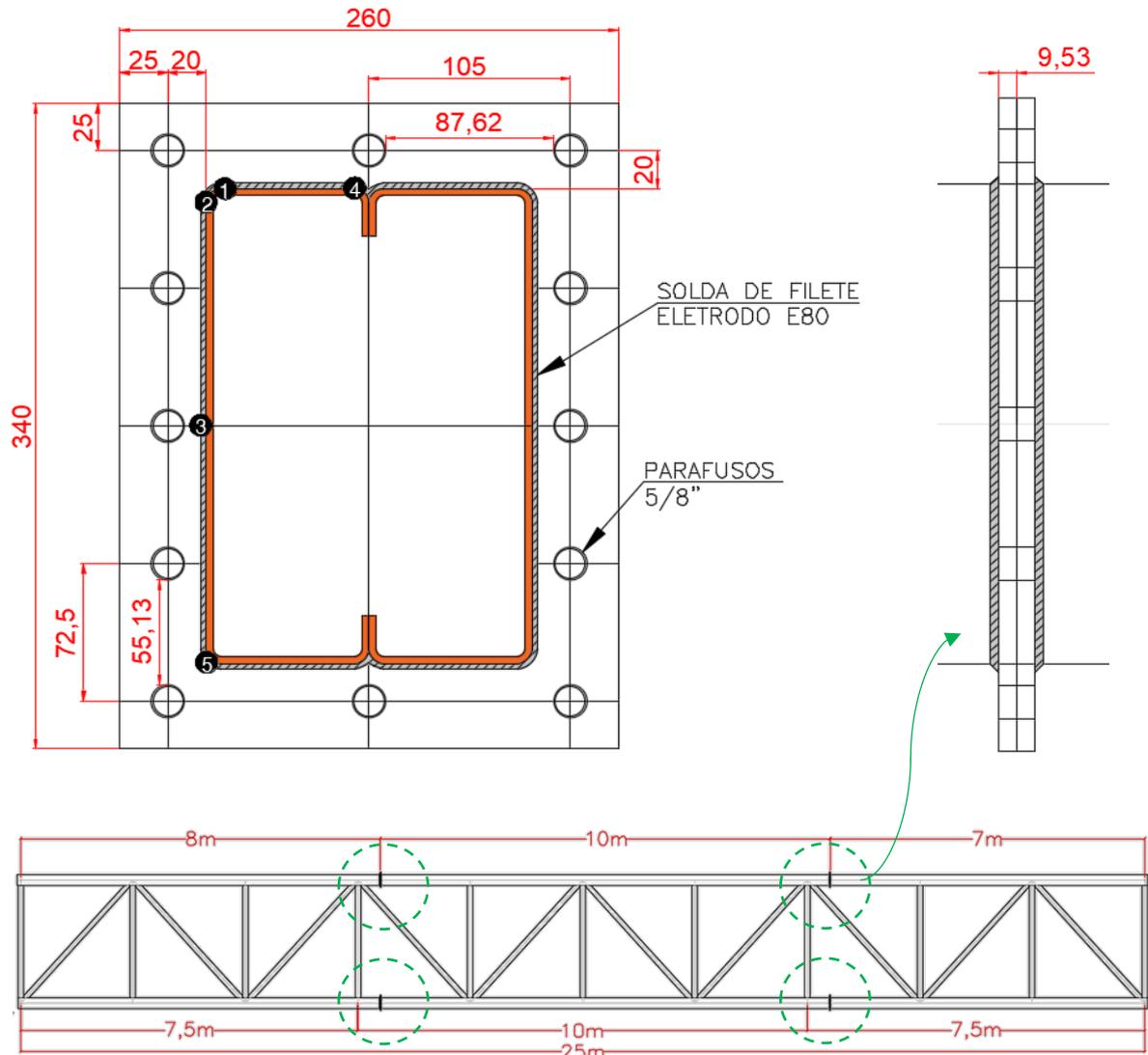
Fonte: Autoria própria.

## 4.4 LIGAÇÕES TÍPICAS

### 4.4.1 Ligações inter-modulares

Na Figura 41 é apresentada uma proposta de ligação inter-modular utilizando placas do flange retangulares para dar a continuidade aos banzos inferiores e superiores. Para o dimensionamento dessa ligação foi necessário realizar os cálculos relativos à solda entre os perfis dos banzos e as placas do flange e também os relativos aos parafusos que conectam as duas placas, verificando a presença do efeito de alavanca.

Figura 41 – Detalhamento da ligação inter-modular entre banzos com dimensões em milímetros



Fonte: Autoria própria.

O respectivo dimensionamento das ligações soldadas entre os banzos e as placas do flange é apresentado no Quadro 26.

Quadro 26 – Ligações soldadas entre perfis e chapas do flange

Ligações soldadas entre perfis e chapas do flange		Símbolo	Unidade	Valor	
a)	Tensão cisalhante solicitante no ponto 1 da solda de filete	$\sigma_1$	kN/cm <sup>2</sup>	24,14	
	Tensão cisalhante solicitante no ponto 2 da solda de filete	$\sigma_2$	kN/cm <sup>2</sup>	23,98	
	Tensão cisalhante solicitante no ponto 3 da solda de filete	$\sigma_3$	kN/cm <sup>2</sup>	21,72	
	Tensão cisalhante solicitante no ponto 4 da solda de filete	$\sigma_4$	kN/cm <sup>2</sup>	24,13	
	Tensão cisalhante solicitante no ponto 5 da solda de filete	$\sigma_5$	kN/cm <sup>2</sup>	24,11	
	<b>Tensão cisalhante solicitante máxima da solda de filete devido às solicitações de tração, momentos fletores, momento torsor e forças cortantes</b>		<b><math>\sigma_{Sd}</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>24,14</b>
b)	Resistência à ruptura da solda	$f_w$	kN/cm <sup>2</sup>	55,00	
	Perna do filete 1	$w_1$	cm	0,38	
	Perna do filete 2	$w_2$	cm	0,38	
	Dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de filete	$t_{ef}$	cm	0,26	
	Comprimento do filete de solda para solicitação paralela ao eixo da solda em relação ao eixo x	$L, v, x$	cm	47,00	
	Comprimento do filete de solda para solicitação paralela ao eixo da solda em relação ao eixo y	$L, v, y$	cm	28,00	
	Comprimento do filete de solda para solicitação normal ao eixo da solda	$L, t$	cm	84,53	
	Momento de inércia da solda de filete em relação ao eixo x	$I_x$	cm <sup>4</sup>	2671,20	
	Momento de inércia da solda de filete em relação ao eixo y	$I_y$	cm <sup>4</sup>	1501,57	
	Força resistente de cálculo de uma solda de filete para o estado-limite último de ruptura da solda	$FRd$	kN	554,73	
	<b>Tensão resistente de cálculo de uma solda de filete para o estado-limite último de ruptura da solda</b>		<b><math>\sigma_{Rd}</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,00</b>
	$\gamma$	-	1,65		
c)	Espessura das seções das barras dos banzos	$t_1$	cm	0,38	
	Espessura das chapas de topo	$t_2$	cm	0,95	
	Menor valor entre $t_1$ e $t_2$	$t$	cm	0,38	
	Relação entre L e t	$L/t$	-	225,41	
	<b>Força resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		$F_x, Rd$	kN	296,21
	<b>Força resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		$F_y, Rd$	kN	176,46
			$\gamma (L/t < 25)$	-	1,65
			$\gamma (L/t \geq 25)$	-	2,00
	<b>Tensão resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_x, Rd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>16,81</b>
	<b>Tensão resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_y, Rd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>16,81</b>
	<b>Tensão solicitante de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_x, Sd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>0,10</b>
<b>Tensão solicitante de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_y, Sd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>0,08</b>	
d)	Força resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda		$FRd$	kN	916,52
			$\gamma$	-	1,55
	<b>Tensão resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_{Rd}</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>28,91</b>
	<b>Tensão solicitante de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda</b>		<b><math>\sigma_{Sd}</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>24,14</b>

Fonte: Autoria própria.

Em relação às ligações parafusadas entre as placas do flange, é apresentado o respectivo dimensionamento no Quadro 27.

Quadro 27 – Ligações parafusadas entre chapas do flange retangulares

(continua)

Ligações parafusadas entre chapas do flange retangulares para banzos		Símbolo	Unidade	Valor
a)	Tensão máxima de tração solicitante de cálculo de parafusos devido às solicitações de tração e momento fletor	$\sigma t, Sd$	kN/cm <sup>2</sup>	21,77
	Força máxima de tração solicitante de cálculo de um parafuso devido às solicitações de tração e momento fletor	$Ft, Sd$	kN	43,10
	Força máxima de cisalhamento solicitante de cálculo de um parafuso devido às solicitações de forças cortantes e momento torsor	$Fv, Sd$	kN	0,17
	Força máxima de cisalhamento solicitante de cálculo de um parafuso devido às solicitações de forças cortantes e momento torsor em relação ao eixo x	$Fv, Sd, x$	kN	0,17
	Força máxima de cisalhamento solicitante de cálculo de um parafuso devido às solicitações de forças cortantes e momento torsor em relação ao eixo y	$Fv, Sd, y$	kN	0,11
b)	Momento de inércia das áreas das seções dos parafusos em tração e da área de contato em compressão da chapa de flange, em relação ao eixo x	$I_x$	cm <sup>4</sup>	44120,23
	Momento de inércia das áreas das seções dos parafusos em tração e da área de contato em compressão da chapa de flange, em relação ao eixo y	$I_y$	cm <sup>4</sup>	25991,76
	Número de parafusos	$n$	-	12
	Diâmetro dos parafusos	$db$	"	0,63
		$db$	mm	15,875
	Diâmetro dos furos-padrão	$df$	mm	17,375
	Área bruta da seção transversal do parafuso	$Ab$	cm <sup>2</sup>	1,98
	Resistência à ruptura do parafuso na tração	$fub$	kN/cm <sup>2</sup>	41,50
	Menor distância entre o centro dos parafusos e o perfil do banzo	$e1$	mm	20
	Menor distância entre o centro dos parafusos e a extremidade da placa do flange	$e2$	mm	25
	Espaçamento mínimo entre as bordas de dois furos adjacentes	$C$	mm	32
	Distância mínima da borda de um furo à extremidade do elemento conectado	$C, b$	mm	16
	Força solicitante de cálculo de um parafuso considerando efeito da alavanca	$Ft, Sd + Qa1$	kN	43,10
b)	Efeito da alavanca de um parafuso	$Qa1$	kN	0,00
	Espessura mínima das placas dos flanges retangulares	$tf$	mm	8,81
	Espessura adotada das placas dos flanges retangulares	$tf, adot$	mm	9,53
	Parâmetros para o cálculo da espessura mínima das placas dos flanges e do efeito da alavanca	$a$	mm	32,94
		$b$	mm	12,06
		$\rho$	-	0,37
		$\beta$	-	0,45
		$\alpha p$	-	0,253
		$\delta$	-	0,76
		$p$	mm	71,75
$tc$	mm	1,10		
$\alpha$	-	0,00		

Quadro 27 – Ligações parafusadas entre chapas do flange retangulares

(conclusão)

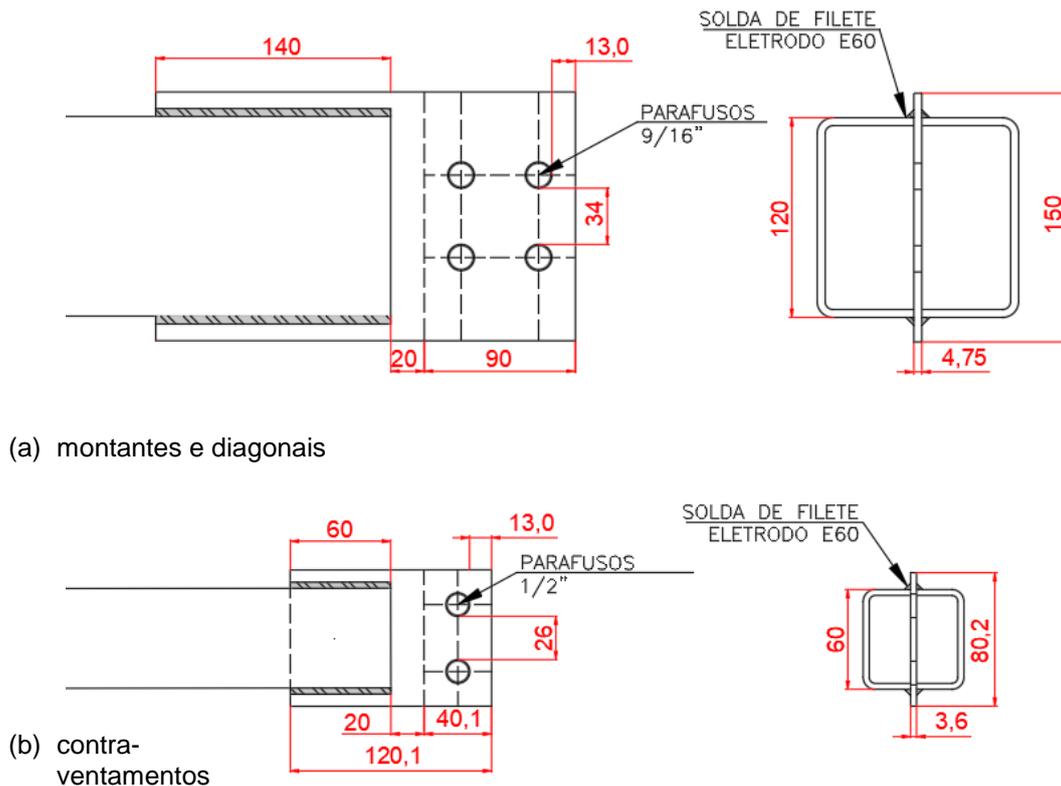
Ligações parafusadas entre chapas do flange retangulares para banzos		Símbolo	Unidade	Valor
c)	Força resistente de cálculo ao rasgamento entre furos ou entre furo e borda	$FRd$	kN	73,60
		$\gamma$	-	1,45
d)	Força resistente de cálculo ao esmagamento	$FRd$	kN	120,47
		$\gamma$	-	1,35
e)	Força de tração resistente de cálculo de um parafuso	$Ft, Rd$	kN	45,63
	Tensão de tração resistente de cálculo de todos os parafusos	$\sigma_t, Rd$	kN/cm <sup>2</sup>	24,34
		$\gamma$	-	1,35
f)	Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso quando plano de corte não passa pela rosca	$Fv, Rd$	kN	30,42
		$\gamma$	-	1,35
g)	Tração e cisalhamento combinados com parafusos de aço com qualificação estrutural (comuns ou de alta resistência) $(Ft, Sd/Ft, Rd)^2 + (Fv, Sd/Fv, Rd)^2 \leq 1,0$	-	-	0,89

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.2 Ligações intra-modulares

Como propostas de ligações intra-modulares, são apresentadas na Figura 42 chapas de ligação concêntrica para as seções tubulares quadradas dos montantes, diagonais e contraventamentos.

Figura 42 – Propostas de ligações intra-modulares com chapas de ligação concêntricas



Fonte: Autoria própria.

O dimensionamento das ligações soldadas e parafusadas são apresentados no Quadro 28 para montantes, diagonais e contraventamentos.

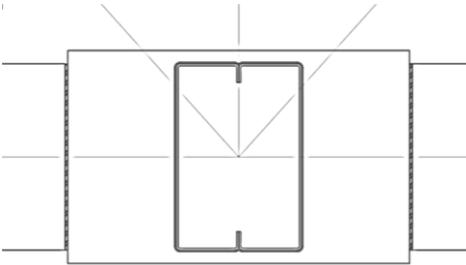
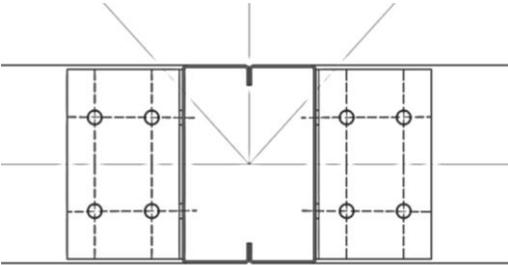
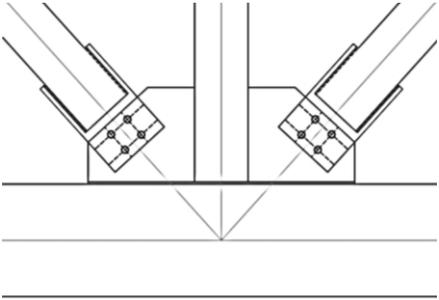
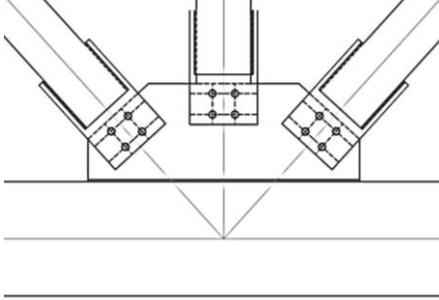
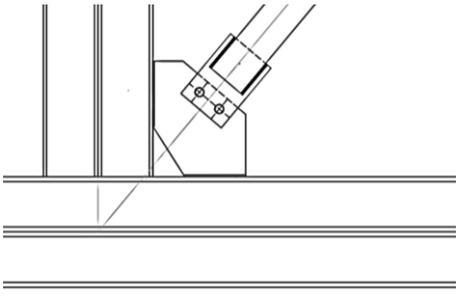
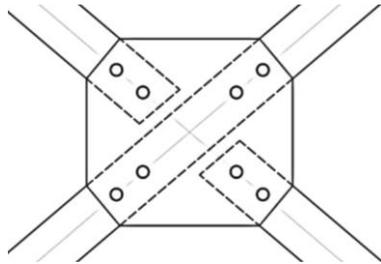
Quadro 28 – Ligações soldadas entre perfis tubulares e chapas de ligação de contraventamentos

	<b>Ligações soldadas entre perfis tubulares e chapas de ligação</b>	Símbolo	Un.	<b>Montantes e Diagonais</b>	<b>Contra-ventamentos</b>	
<b>Ligação soldada entre barras e chapas concêntricas</b>	<b>a) Força axial solicitante máxima da solda de filete</b>	<b><math>FSd</math></b>	<b>kN</b>	<b>84,66</b>	<b>22,45</b>	
	Número de filetes	$n$	-	4,00	4,00	
	<b>b)</b>	Resistência à ruptura da solda	$fw$	kN/cm <sup>2</sup>	41,50	41,50
		Perna do filete 1	$w1$	cm	0,48	0,36
		Perna do filete 2	$w2$	cm	0,48	0,36
		Dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de filete	$tef$	cm	0,33	0,25
		Comprimento do filete de solda para solicitação normal ao eixo da solda	$L, t$	cm	14,00	6,00
		<b>Força resistente de cálculo de uma solda de filete para o estado-limite último de ruptura da solda</b>	<b><math>FRd</math></b>	<b>kN</b>	<b>87,81</b>	<b>28,52</b>
		$\gamma$	-	1,65	1,65	
	<b>c)</b>	Espessura da seção da barra	$t1$	cm	0,475	0,36
		Espessura da chapa concêntrica	$t2$	cm	0,475	0,36
		Menor valor entre $t1$ e $t2$	$t$	cm	0,475	0,36
		Relação entre $L$ e $t$	$L/t$	-	29,47	16,67
		<b>Força resistente de cálculo de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda</b>	<b><math>Fx, Rd</math></b>	<b>kN</b>	<b>111,76</b>	<b>48,89</b>
	$\gamma$	-	2,00	1,65		
<b>Ligação parafusada em chapa concêntrica</b>	<b>a) Força máxima axial solicitante de cálculo</b>	<b><math>Ft, Sd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>84,66</b>	<b>22,45</b>	
	<b>Força máxima axial solicitante de cálculo de um parafuso</b>	<b><math>Ft, Sd</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>21,17</b>	<b>11,23</b>	
	Número de parafusos	$n$	-	4	2	
	Diâmetro dos parafusos	$db$	in	0,56	0,50	
		$db$	mm	14,2875	12,7	
	Diâmetro dos furos-padrão	$df$	mm	15,7875	14,2	
	Área bruta da seção transversal do parafuso	$Ab$	cm <sup>2</sup>	1,60	1,27	
	<b>b) Resistência à ruptura do parafuso na tração</b>	<b><math>fub</math></b>	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>41,50</b>	<b>41,50</b>	
	Espaçamento mínimo entre as bordas de dois furos adjacentes	$C$	mm	29	26	
	Distância mínima da borda de um furo à extremidade do elemento conectado	$C, b$	mm	14	13	
	Espessura da chapa de ligação	$t$	cm	0,475	0,36	
	<b>c)</b>	<b>Força resistente de cálculo ao rasgamento</b>	<b><math>FRd</math></b>	<b>kN</b>	<b>32,14</b>	<b>22,36</b>
			$\gamma$	-	1,45	1,45
		Distância, tomada na direção da força, do centro do furo-padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado	$e$	cm	2,19	2,01
		<b>Força resistente de cálculo ao esmagamento</b>	<b><math>FRd</math></b>	<b>kN</b>	<b>47,08</b>	<b>28,93</b>
		$\gamma$	-	1,55	1,55	
	Fator igual a $(0,183t + 1,53)$ , com $t$ em milímetros ( $t \leq 4,75$ mm)	$ae$	cm	2,40	2,19	
<b>d)</b>	<b>Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso quando plano de corte não passa pela rosca</b>	<b><math>Fv, Rd</math></b>	<b>kN</b>	<b>24,64</b>	<b>19,47</b>	
		$\gamma$	-	1,35	1,35	

Fonte: Autoria própria.

Para as demais ligações intra-modulares são apresentadas no Quadro 29 propostas de ligações a serem dimensionadas a partir dos máximos esforços em uma mesma combinação de estado-limite último.

Quadro 29 – Propostas de ligações intra-modulares para transversinas, montantes, diagonais e contraventamentos

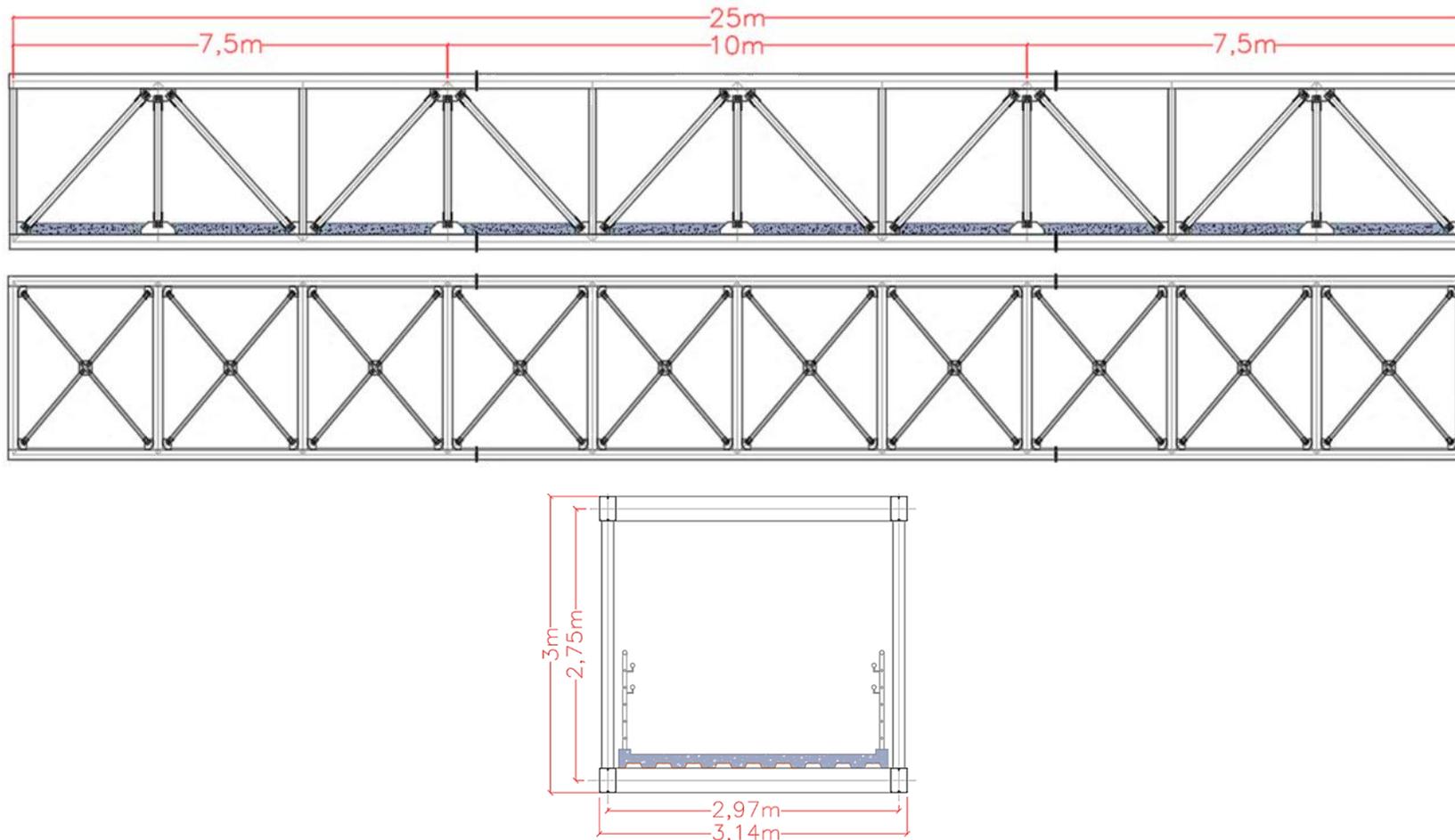
<b>Transversinas</b>	<p>(a) transversina engastada (soldada) em chapa de topo; chapa de topo soldada em banzo</p> 	<p>(b) transversina articulada (parafusada) em cantoneiras laterais; cantoneiras articuladas (parafusadas) em banzo</p> 
<b>Montantes e diagonais</b>	<p>(a) montante engastado (soldado) em chapa de topo; diagonais com chapas concêntricas articuladas (parafusadas) em chapas verticais (soldadas em chapa de topo e montantes); chapa de topo soldada em banzo</p> 	<p>(b) montante e diagonais com chapas concêntricas articuladas (parafusados) em chapa vertical soldada em chapa de topo; chapa de topo soldada em banzo</p> 
<b>Contra-ventamentos</b>	<p>(a) contraventamento com chapa concêntrica articulada em chapa horizontal de canto (com recorte para evitar empoçamento); chapa horizontal soldada em banzo e transversina (ou chapas intermediárias)</p> 	<p>(b) intersecção de contraventamentos articulados (parafusados) em chapas superior e inferior</p> 

Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE INTERESSE DIMENSIONADA

Na Figura 43 são apresentadas as vistas lateral, superior e o corte transversal da estrutura dimensionada com vão de 25 m.

Figura 43 – Vistas lateral, superior e corte transversal da passarela dimensionada com vão de 25 m



Fonte: Autoria própria.

## 4.6 FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E MONTAGEM

### 4.6.1 Estimativas de peso

A partir da massa específica do aço utilizado de  $7,850 \text{ kg/m}^3$ , calculou-se o peso das barras pela soma de seus comprimentos totais de eixos e áreas das seções transversais, desconsiderando o peso dos elementos das ligações. A massa e peso total calculado da estrutura foi de 7,70 toneladas e 75,50 kN, respectivamente. Cada módulo proposto apresentou, por sua vez, as seguintes estimativas de massa e peso: 2,52 toneladas (24,71 kN) para o módulo 1; 3,00 toneladas (29,42 kN) para o módulo 2; e 2,18 toneladas (21,37 kN) para o módulo 3. Segundo Pinho (2005), no transporte normal rodoviário, sem a exigência de veículos e licenças especiais, admite-se uma capacidade total de carga de 27 toneladas.

### 4.6.2 Fabricação

O processo de fabricação consiste na obtenção da matéria-prima e dos demais materiais e equipamentos necessários para a execução de cortes, dobras, furações e soldagens. Outro aspecto inerente é a interpretação do projeto estrutural, que deve ser desenvolvido detalhadamente (PINHO, 2005). A proposta de modularização apresentada permite a realização da maior parte dessas operações industrialmente. Os únicos processos de fabricação a serem realizados *in loco* são a soldagem das transversinas engastadas, unindo os planos das treliças Warren com montantes, e as ligações parafusadas entre esses planos para a constituição dos módulos, bem como as ligações inter-modulares.

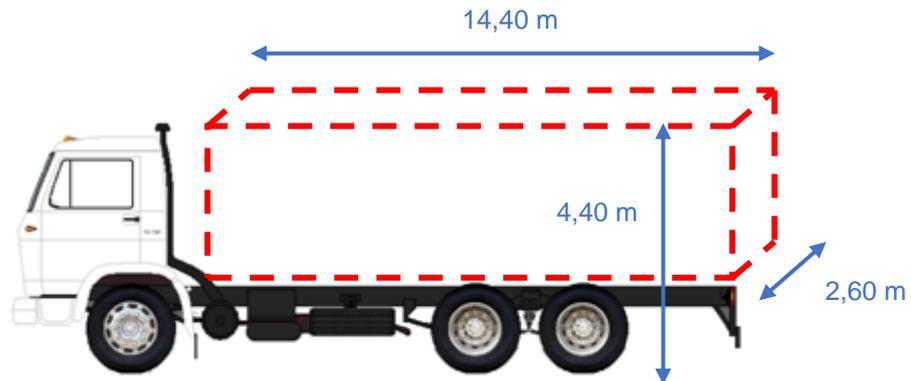
Também devem ser previstos tratamentos anticorrosivos como a galvanização e a pintura dos elementos estruturais. Esses procedimentos devem ser realizados ainda no interior da fábrica após a fabricação e antes da liberação para embarque (PINHO, 2005).

### 4.6.3 Transporte

Considerando o transporte dos módulos estruturais propostos em veículos simples, como caminhões trucados, suas máximas dimensões de carga admissíveis pelo Conselho Nacional de Trânsito (1998) são: 2,60 m de largura; 4,40 m de altura

livre do solo; e 14,40m de comprimento total. Essas dimensões máximas podem ser observadas na Figura 44.

Figura 44 – Dimensões máximas admissíveis para cargas em veículos simples



Fonte: Adaptado de Guia do TRC (2018).

Os planos das treliças Warren com montantes de cada módulo podem ser transportados inclinados na região admissível de carga para veículos simples. Os demais elementos estruturais, como as transversinas, contraventamentos e elementos de ligações, podem ser transportados isolados ao lado no mesmo volume de carga. Quando alguns elementos dos módulos, como as diagonais, apresentarem-se com as pontas sem apoios, devem ser previstas barras de suporte para evitar esforços indesejáveis na estrutura durante o transporte.

#### 4.6.4 Montagem

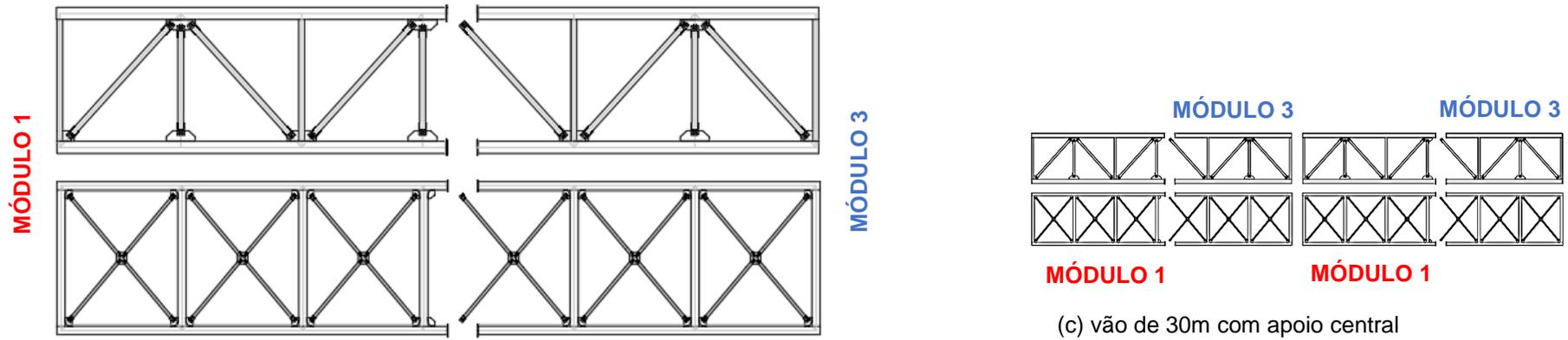
Após o transporte dos planos e demais elementos estruturais dos módulos até o local da instalação, deverão ser realizadas as ligações intra-modulares. Conforme a proposta apresentada, as transversinas são conectadas aos planos das treliças Warren com montantes através de ligações soldadas e parafusadas. Também deverão ser conectados os contraventamentos através de parafusos. Finalizadas as ligações intra-modulares, devem então ser conectados os banzos inferiores e superiores, unindo os respectivos módulos estruturais.

Depois de executadas as ligações, deve ser realizado o içamento da estrutura através de guindastes.

### 4.7 MODULARIZAÇÃO

A partir das padronizações de fabricação, transporte e montagem e estimativas dos pesos dos módulos, é apresentada na Figura 45 a proposta de modularização para os demais vãos típicos das rodovias brasileiras do DNIT.

Figura 45 – Propostas de modularização para os demais vãos típicos das rodovias brasileiras do DNIT



(a) vão de 15m

(c) vão de 30m com apoio central

(b) vão de 25m

Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo de um trabalho de conclusão de curso é seu consequente aprofundamento acadêmico e profissional. Com o inerente desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos assuntos abordados durante a graduação, é possível enriquecer os conhecimentos obtidos anteriormente, bem como incentivar a busca por novas soluções e procedimentos antes não estudados. Nesse trabalho, ao dar ênfase na modularização e na conformação a frio dos perfis de aço utilizados, foi imprescindível o estudo detalhado e prévio dessas soluções para satisfazerem o escopo do projeto.

Nesse contexto, foi realizada a proposição de projetos estruturais da estrutura treliçada de passarelas modulares para pedestres constituídas por perfis de aço formados a frio, com a possibilidade da utilização dos respectivos módulos para três vãos distintos e típicos de rodovias do DNIT.

A primeira análise foi o estabelecimento do sistema estrutural de interesse, que apresentasse maiores vantagens de ser executado industrialmente. A partir da escolha do aço como material, da conformação a frio dos perfis e do sistema estrutural treliçado, determinou-se a utilização de treliças tipo Warren com montantes, devido a maior distribuição de esforços alternadamente nas diagonais. Os montantes foram imprescindíveis para a redução dos comprimentos destravados das treliças, no pré-dimensionamento, possibilitando barras de perfis com menores áreas de seções transversais.

A partir do estabelecimento do sistema estrutural de interesse, determinou-se os valores extremos das ações aplicáveis de projeto, com o intuito de abranger todo o território nacional, possibilitando a instalação da passarela em qualquer região do Brasil. Para isso foram analisados dois aspectos principais: o vento e a variação de temperatura. Foram consideradas a região de maior velocidade básica do vento de 50 m/s, como o valor extremo da faixa sudoeste brasileira, e a maior diferença entre as temperaturas máximas e mínimas obtidas de 21,2 °C em Tocantins, de 1981 até 2010 a partir de 332 estações meteorológicas pelo INMET. As demais ações foram consideradas iguais para qualquer localização com ênfase nos parâmetros mínimos de acessibilidade, de acordo com a NBR 9050 (ABNT, 2015).

Outro objetivo desse trabalho foi a identificação das solicitações e limitações estruturais no dimensionamento da passarela para os estados-limites últimos e

verificações de serviço. Essa análise iterativa, através do *software SAP 2000*, que utiliza o método dos elementos finitos, possibilitou o reconhecimento dos respectivos esforços e deslocamentos máximos. As principais limitações foram: solicitações de momento fletor em relação ao eixo de maior inércia, combinações de flexão composta e compatibilização da altura externa das seções para transversinas; tensões de compressão e combinações de flexão composta para os banzos; deslocamento horizontal de topo de pilares para os montantes; força axial de compressão e combinação de flexão composta para as diagonais e contraventamentos.

Para atender a verificação de maiores deslocamentos horizontais de topo de pilares dos montantes, foi necessário estabelecer quadros engastados intercalados na estrutura, ligando os montantes laterais às transversinas superiores e inferiores de cada plano, conforme modelagem estrutural. Essa solução, entretanto, inviabilizou que os processos de soldagem fossem realizados apenas industrialmente, pois após o transporte dos planos treliçados, os mesmos devem ser conectados às transversinas através de soldas de filete *in loco*.

Os pesos totais dos módulos estruturais são dados essenciais para a comparação com a utilização de outras conformações de perfis ou sistemas estruturais em passarelas, possibilitando economia no transporte, na fabricação dos respectivos elementos e na obtenção da matéria-prima.

Nesse contexto, a proposição de padronização de fabricação, transporte e montagem de módulos estruturais, e suas respectivas ligações, para distintos vãos de rodovias, apresenta-se relevante aos órgãos de administração rodoviária, com o objetivo de apresentar soluções para projetos estruturais econômicos. Esses projetos visam, portanto, atingir o menor peso dos elementos constituintes, bem como sua máxima eficiência estrutural.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas sugestões para trabalhos futuros correlacionados à proposta de padronização apresentada nesse trabalho:

- Estudo do comportamento das demais ligações intra-modulares;
- Verificação à fadiga das ligações propostas;
- Ensaio laboratoriais das ligações intra- e inter-modulares para verificação dos respectivos comportamentos estruturais;

- Verificação mais rigorosa de vibrações incluindo análise de ventos;
- Projeto estrutural das lajes em *steel deck*;
- Análise da alternância da distribuição da sobrecarga de uso e ocupação sobre lajes;
- Estudo de alternativas para pisos de passarelas que atendam aos parâmetros normativos de acessibilidade;
- Padronização das demais estruturas constituintes de passarelas, como rampas, escadas, pilares e fundações.

## REFERÊNCIAS

ANCIRES, P. R.; JONES, P. Estimating preferences for different types of pedestrian crossing facilities. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 52, p. 222-237, 2018.

ARCELOR MITTAL. Vista da passarela antes da conclusão das obras. **Passarela Miguel Reale**, 2008. Disponível em: <[http://www.constructalia.com/portugues\\_br/galeria\\_de\\_projetos/brasil/passarela\\_miguel\\_reale#.W84tMWhKjDc](http://www.constructalia.com/portugues_br/galeria_de_projetos/brasil/passarela_miguel_reale#.W84tMWhKjDc)>. Acesso em: 22 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077: Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261: Tubos de aço-carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais**. Rio de Janeiro, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355: Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização**. Rio de Janeiro 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A370-12: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. West Conshohocken, 2012.

BROCKENBROUGH, R.; MERRITT, F. **Structural Steel Designer's Handbook**. Mcgraw-hill, 2011.

CANTILLO, V.; ARELLANA, J.; ROLONG, M. Modelling pedestrian crossing behaviour in urban roads: A latent variable approach. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 32, p. 56-67, 2015.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução Nº 12/98**. Brasília, 1998. Disponível em: <[www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/resolucao012\\_98.doc](http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/resolucao012_98.doc)>. Acesso em: 18 mar. 2018.

DE ROOVER, C. et al. Modelling of an IPC-concrete modular pedestrian bridge. **Computers & Structures**, v. 80, n. 27, p. 2133-2144, 2002.

DEMIROZ, Y. I.; ONELCIN, P.; ALVER, Y. Illegal road crossing behavior of pedestrians at overpass locations: Factors affecting gap acceptance, crossing times and overpass use. **Accident Analysis & Prevention**, v. 80, p. 220-228, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Normas para o Projeto das Estradas de Rodagem**. Rio de Janeiro, 1973.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais**. Rio de Janeiro: Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. IPR. Publ. 698. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**. Rio de Janeiro: Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR. Publ., 740. 2010.

GUIA DO TRC. **Veículos de Carga**, 2018. Disponível em: <<http://www.guiadotrc.com.br/noticias/noticiaid.asp?id=33888>>. Acesso em: 8 jul. 2019.

HANCOCK, G. J.; MURRAY, T.; ELLIFRIT, D. S. **Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification**. CRC Press, 2001.

INFRAESTRUTURA URBANA. **Passarela estaiada construída na entrada do bairro de Alphaville, em Barueri (SP). Passarelas aumentam a segurança na travessia de pedestres em vias de tráfego**, 2013. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/32/passarelas-aumentam-a-seguranca-na-travessia-de-pedestres-em-vias-300062-1.aspx>>. Acesso em: 22 out. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 2010**.

JAMES, E.; MILLINGTON, A.; TOMLINSON, P. **Understanding community severance – Part 1: Views of practitioners and communities**. UK Department for Transport. 2005

JAVARONI, C. E. **Estruturas De Aço: Dimensionamentos de Perfis Formados a Frio**. Elsevier, 2015.

KARREN, K. W. Corner Properties of Cold-Formed Shapes. *Journal of the Structural Division*, v. 93, 1967.

KEIL, A. **Pedestrian Bridges: Ramps, Walkways, Structures**. DETAIL Practice, 2013.

KHAN, M. A. **Accelerated Bridge Construction: Best Practices and Techniques**. Elsevier Science, 2014.

LACEY, A. W. et al. Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering*, v. 16, p. 45-56, 2018.

LAWSON, R. M. **Building Design Using Modules**. England: The Steel Construction Institute, 2007.

LIN, W.; YODA, T. **Bridge Engineering: Classifications, Design Loading, and Analysis Methods**. Elsevier Science, 2017.

LIND, N. C.; SCHROFF, D. K. Utilization of Cold-Work in Cold-Formed Steel. *Journal of the Structural Division, ASCE Proceedings*, v. 101, 1975.

METALSOMA. Passarelas metálicas sobre PR-445. **Obras Comerciais**, 2015. Disponível em: <<http://metalsoma.com.br/blog/?p=280>>. Acesso em: 22 out. 2018.

ODROBIŇÁK, J.; HLINKA, R. Degradation of Steel Footbridges with Neglected Inspection and Maintenance. *Procedia Engineering*, v. 156, p. 304-311, 2016.

OVIEDO-TRESPALACIOS, O.; SCOTT-PARKER, B. Footbridge usage in high-traffic flow highways: The intersection of safety and security in pedestrian decision-making. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 49, p. 177-187, 2017.

PARKE, G. A. R.; INSTITUTION OF CIVIL, E.; HEWSON, N. R. **ICE Manual of Bridge Engineering**. Thomas Telford, 2008.

PINHO, M. O. **Transporte e Montagem**. Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2005.

PIPINATO, A. **Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance**. Elsevier Science, 2015.

PREFEITURA DE BARUERI. Passarela metálica da avenida Piracema, no Tamboré. **Obras contemplam o bairro Alphaville em seu 37º aniversário**, 2010. Disponível em: <<http://www.barueri.sp.gov.br/sistemas/informativos/informativo.asp?id=12584>>. Acesso em: 22 out. 2018.

RANKAVAT, S.; TIWARI, G. Pedestrians perceptions for utilization of pedestrian facilities – Delhi, India. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 42, p. 495-499, 2016.

RP-SUL ENGENHARIA. Passarela de pedestres com viga protendida. **Obras Protendidas**, 2018. Disponível em: <<http://www.rp-sul.com.br/atuacao>>. Acesso em: 18 out. 2018.

RÄSÄNEN, M. et al. Pedestrian self-reports of factors influencing the use of pedestrian bridges. **Accident Analysis & Prevention**, v. 39, n. 5, p. 969-973, 2007.

SINCLAIR, M.; ZUIDGEEST, M. Investigations into pedestrian crossing choices on Cape Town freeways. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 42, p. 479-494, 2016.

TANG, M.-C. Forms and Aesthetics of Bridges. **Engineering**, v. 4, n. 2, p. 267-276, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Status Report on Road Safety 2015**. Geneva: 2015.

WU, Y. et al. Identification of contributing factors to pedestrian overpass selection. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 1, n. 6, p. 415-423, 2014.

YU, C. **Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction**. Elsevier Science, 2016.

YU, W. W.; LABOUBE, R. A. **Cold-Formed Steel Design**. John Wiley & Sons, 2010.

ZEYNALIAN, M.; SHELLEY, A.; RONAGH, H. R. An experimental study into the capacity of cold-formed steel truss connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 127, p. 176-186, 2016.