UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHEIRA CIVIL

PEDRO HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUSA

COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE AÇO NA COMPOSIÇÃO DE COBERTURAS ISOLADAS COMPOSTAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO E PERFIS LAMINADOS

PAU DOS FERROS
2023

PEDRO HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUSA

COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE AÇO NA COMPOSIÇÃO DE COBERTURAS ISOLADAS COMPOSTAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO E PERFIS LAMINADOS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva, Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Sc Sousa, Pedro Henrique de Oliveira.
Comparação do consumo de aço na composição de coberturas isoladas compostas de perfis formados a frio e perfis laminados / Pedro Henrique de Oliveira Sousa. - 2023.
145 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2023.

1. Estruturas de aço. 2. Perfis formados a frio. 3. Perfis laminados. 4. Coberturas isoladas. 5. Consumo de aço. I. Silva, Matheus Fernandes de Araújo, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automáto em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC´s) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUSA

COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE AÇO NA COMPOSIÇÃO DE COBERTURAS ISOLADAS COMPOSTAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO E PERFIS LAMINADOS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 19/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
MATHEUS FERNANDES DE ARAUJO SILVA
Data: 23/05/2023 10:45:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Matheus Fernandes de Araújo Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 23/05/2023 09:50:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Robson Arruda dos Santos, Prof. Dr. (IFPB)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
JOSE HENRIQUE MACIEL DE QUEIROZ
Data: 22/05/2023 09:10:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

José Henrique Maciel de Queiroz, Prof. Me. (IFPB)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Sem o apoio e incentivo de vocês, essa conquista não seria possível.

Em primeiro lugar, sou imensamente grato a Deus, por me guiar e me conceder forças durante toda essa jornada acadêmica. Sua presença e orientação foram fundamentais para minha perseverança e sucesso.

À minha mãe, Francisca Francimar de Oliveira, e família, meu porto seguro, meu alicerce inabalável. Agradeço por todo amor, encorajamento e apoio incondicional que me proporcionaram ao longo desses anos. Suas palavras de incentivo e confiança foram um verdadeiro combustível para minha dedicação.

À minha namorada, Kaelly de Freitas Silva, que sempre esteve ao meu lado, me compreendendo e incentivando em cada etapa deste percurso acadêmico. Seu apoio, compreensão e amor foram essenciais para minha motivação e bem-estar emocional durante toda a trajetória.

Aos meus amigos (João Cardoso, Raymundo “Biel” Gabryel, Fernando “Borrcha” Almeida, Henrique Alves, Pablo Roberto, Vinicius, Guilherme “Mago” Goes, Elson Santos, Erinaldo “Dinho” Santos, Vicente Dantas, Pedro “Fubá” Gomes e todos outros) verdadeiros companheiros de jornada, que estiveram presentes nos momentos de estudo, troca de ideias e descontração. Suas palavras de estímulo, debates enriquecedores e ombro amigo foram indispensáveis para enfrentar os desafios acadêmicos e superar as dificuldades.

Ao meu orientador, Matheus Fernandes de Araújo Silva, cuja dedicação e conhecimento foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação, paciência e expertise foram de inestimável valor para o aprimoramento das minhas habilidades acadêmicas, assim como se mostrar como um dos principais pilares de inspiração profissional.

Por fim, gostaria de agradecer à banca examinadora, composta pelos professores Matheus Fernandes, Henrique Maciel e Robson Santos. Agradeço pela disposição em avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições fornecidas durante a defesa. Suas sugestões e críticas construtivas enriqueceram o resultado final desta pesquisa.

Sem a presença e apoio de vocês, eu não teria alcançado essa etapa tão importante em minha vida acadêmica. Sei que sou abençoado por ter pessoas tão especiais ao meu lado. Muito obrigado!

Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

A elaboração e dimensionamento de estruturas de aço são processos fundamentais para a construção de edifícios, pontes, torres e outras estruturas que exigem alta resistência e durabilidade. O uso de tecnologias de modelagem e análise estrutural auxiliadas por software é cada vez mais comum nesse processo, permitindo uma análise mais precisa e eficiente dos projetos. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo elaborar e dimensionar uma estrutura de aço utilizando perfis formados a frio e perfis laminados e comparar o consumo de aço entre elas com o auxílio do software CYPE 3D. Através da utilização desse software, serão realizadas análises detalhadas das características de cada perfil e do comportamento da estrutura, levando em consideração fatores como a carga suportada, a resistência dos materiais, a estabilidade estrutural e a facilidade de montagem. Serão realizados estudos comparativos entre os dois tipos de perfis, buscando comparar o consumo de aço utilizado em cada uma. O uso de tecnologias de modelagem e análise estrutural auxiliadas por software, como o CYPE 3D, é fundamental para garantir a segurança e a eficiência do projeto. Além disso, a utilização de perfis formados a frio e perfis laminados permite um maior controle sobre o custo e a qualidade da estrutura. Assim, este trabalho apresenta uma significativa relevância técnica, pois contribui para o aprimoramento das técnicas de dimensionamento de estruturas de aço, utilizando tecnologias avançadas de análise e modelagem. Espera-se que os resultados obtidos possam fornecer informações valiosas para a indústria de construção civil e para profissionais da área, auxiliando na tomada de decisão e na construção de estruturas de aço mais eficientes e seguras.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Perfis formados a frio. Perfis laminados. Coberturas isoladas. Consumo de aço.

ABSTRACT

The elaboration and dimensioning of steel structures are fundamental processes for the construction of buildings, bridges, towers and other structures that require high resistance and durability. The use of software-aided modeling and structural analysis technologies is increasingly common in this process, allowing for more accurate and efficient design analysis. In this sense, this work aims to elaborate and dimension a steel structure using cold-formed profiles and rolled profiles, with the aid of the CYPE 3D software. Through the use of this software, detailed analyzes will be carried out of the characteristics of each profile and the behavior of the structure, taking into account factors such as the supported load, the resistance of the materials, the structural stability and the ease of assembly. Comparative studies will be carried out between the two types of profiles, seeking to compare the consumption of steel used in each one. The use of modeling technologies and structural analysis aided by software, such as CYPE 3D, is fundamental to guarantee the safety and efficiency of the project. In addition, the use of cold-formed profiles and rolled profiles allows greater control over the cost and quality of the structure. Thus, this work has a significant technical relevance, as it contributes to the improvement of design techniques for steel structures, using advanced analysis and modeling technologies. It is expected that the results obtained can provide valuable information for the civil construction industry and for professionals in the area, helping in decision making and in the construction of more efficient and safer steel structures.

Keywords: Steel structures. Cold formed profiles. Laminated profiles. Insulated covers. Steel consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de tensão/deformação utilizado no projeto..... 17
Figura 2 – Curva de tensão x deformação utilizada para descrever o comportamento mecânico do aço considerando as tensões residuais.....20
Figura 3 – Exemplos de seções transversais de perfis formados a frio..... 38
Figura 4 – Modos de flambagem do perfil U enrijecido submetido à força axial de compressão 39
Figura 5 – Exemplos do comportamento de perfis submetidos à flambagem distorcional 42
Figura 6 – Plano de cobertura.....47
Figura 7 – Vista lateral da cobertura.....47
Figura 8 – Vista Frontal da cobertura.....47
Figura 9 – Telha Trapezoidal LR..... 49
Figura 10 – Mapa de isopletas de velocidade básica do vento 50
Figura 11 – Parâmetros meteorológicos 52
Figura 12 – Valores mínimos do fator estatístico S_3..... 53
Figura 13 – Coeficientes de pressão e forma adotados..... 54
Figura 14 – Carregamento devido à ação do vento à sotavento com ângulo de 0° e 90°, respectivamente 55
Figura 15 – Carregamento devido à ação do vento à barlavento com ângulo de 0° e 90°, respectivamente.....55
Figura 16 – Representação global da cobertura isolada indicando a treliça verificada... 56
Figura 17 – Exemplo de esforços axiais na treliça 57
Figura 18 – Indicação das barras mais solicitadas axialmente (por grupo) 57
Figura 19 – Resumo das características da seção crítica das diagonais.....59
Figura 20 – Resumo das características da seção crítica do banzo superior 60
Figura 21 – Resumo das características da seção crítica do banzo inferior 62
Figura 22 – Resumo das características da seção crítica das terças..... 63
Figura 23 – Representação global da cobertura isolada com indicação da treliça verificada 66
Figura 24 – Exemplo de esforços axiais na treliça.....67
Figura 25 – Indicação das barras mais solicitadas axialmente (por grupo) 67
Figura 26 – Resumo das características da seção crítica dos montantes..... 68
Figura 27 – Resumo das características da seção crítica das diagonais 69
Figura 28 – Resumo das características da seção crítica do banzo superior..... 70
Figura 29 – Resumo das características da seção crítica do banzo inferior 72
Figura 30 – Resumo das características da seção crítica das terças.....73
Figura 31 – Levantamento quantitativo do consumo aço dobrado 78
Figura 32 – Levantamento quantitativo do consumo aço dobrado 78
Figura 33 – Detalhe da treliça com auxílio de chapa de aço 2,5mm..... 80
Figura 34 – Posto de combustível com uma linha de pilares.....80
Figura 35 – Vista frontal da treliça.....80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficiente de aproveitamento η (%) das seções críticas..... 79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivo Geral 14
1.1.1 Objetivos Específicos 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO 16
2.1 O Aço na Construção Civil 16
2.2 Propriedades mecânicas dos aços estruturais 16
2.2.1 Propriedades físicas gerais 17
2.2.2 Ductilidade 17
2.2.3 Fragilidade 18
2.2.4 Resiliência e Tenacidade 18
2.2.5 Dureza 18
2.2.6 Fadiga 19
2.2.7 Corrosão 19
2.2.8 Tensões Residuais 19
2.3 Elaboração do projeto estrutural 21
2.3.1 Normas de Projeto 21
2.3.2 Considerações de Segurança nas Normas 22
2.3.3 Método das Tensões Admissíveis 23
2.3.4 Método dos Estados Limites 24
2.3.5 Ações 25
2.3.6 Combinações de Ações 26
2.3.6.1 Combinações últimas 26
2.3.6.2 Combinações de Serviço 27
2.3.7 Resistências 27
2.3.7.1 Valores característicos 28
2.3.7.2 Valores de projeto 28
2.3.8 Barras Tracionadas 29
2.3.8.1 Comportamento das barras tracionadas 29
2.3.8.2 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008 30
2.3.9 Barras Comprimidas 31
2.3.9.1 Comportamento das barras comprimidas 31
2.3.9.2 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008 32

2.3.10 Barras Fletidas 35
2.3.10.1 Comportamento das barras submetidas a momento fletor 35
2.3.10.1.1 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008 35
2.4 Perfis Formados a Frio 37
2.4.1 Critérios de Dimensionamento de Perfis Formados a Frio submetidos à compressão conforme a NBR 38
2.4.2.2 Método da Seção Efetiva (MSE) 41
2.4.3 Flambagem Distorcional 42
2.4.4 Método da Resistência Direta 43
3 METODOLOGIA 45
3.1 Concepção Estrutural 45
3.1.1 Característica do Posto de Combustível 45
3.1.2 Lançamento da Estrutura 45
3.2 Carregamentos 48
3.2.1 Cargas permanentes 48
3.2.2 Sobrecarga na cobertura 49
3.2.3 Ação do vento na estrutura 49
3.2.3.1 Velocidade básica do vento (V_0) 50
3.2.3.2 Fator topográfico (S_1) 51
3.2.3.3 Fator de rugosidade (S_2) 51
3.2.3.4 Fator estatístico (S_3) 52
3.2.3.5 Velocidade característica do vento (V_k) e pressão dinâmica do vento (q) 53
3.2.3.6 Coeficientes aerodinâmicos 53
3.2.4 Combinação de Ações 55
3.3 Dimensionamento com uso de Perfis Formados a Frio 56
3.3.1 Montantes 57
3.3.2 Diagonais 58
3.3.3 Banzo superior 59
3.3.4 Banzo inferior 61
3.3.5 Terças 63
3.4 Dimensionamento com uso de Perfis Laminados 66
3.4.1 Montantes 67
3.4.2 Diagonais 68
3.4.3 Banzo superior 70

3.4.4 Banzo inferior 71
3.4.5 Terças 72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 81
6 REFERÊNCIAS 82

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia é uma ciência que tem como premissa auxiliar a sociedade por meio de aplicações técnicas e científicas baseadas em seus campos de estudo. A Engenharia Civil é responsável por aplicar o conhecimento obtido através de experiências passadas e estudos, garantido que as necessidades da sociedade sejam satisfeitas, sempre que possível, de maneira eficiente. No geral, os aspectos que se destacam dessa evolução são:

- segurança – baseada em teorias da resistência dos materiais e teorias probabilísticas que são expostas por normas técnicas a serem seguidas;
- agilidade do processo – com a utilização de diferentes materiais e métodos construtivos;
- custo das obras – valor econômico necessário para as opções atuais;
- viabilidade – equilíbrio que define qual solução será aplicada a depender de cada alternativa.

Coberturas isoladas são elementos de proteção de edificações contra intempéries e outros agentes naturais. São sustentadas por suportes de dimensões reduzidas, sem fechamentos ou paredes permanentes. A ação do vento é exercida diretamente sobre as faces superior e inferior da cobertura, podendo ocorrer bloqueio parcial ou total do escoamento do vento pela parte inferior, o que altera a forma do carregamento da estrutura.

Devido ao desenvolvimento da tecnologia dos materiais e inovações nos projetos estruturais, as coberturas atuais são mais leves, flexíveis e apresentam vãos cada vez maiores. Essas características as tornam mais sensíveis à ação do vento, tornando fundamental um conhecimento preciso sobre o carregamento do vento neste tipo de estrutura.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal comparar o consumo de aço em coberturas compostas por perfis laminados atendendo as recomendações da ABNT NBR 8800:2008 – Projetos de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, com coberturas formadas por perfis conformados a frio obedecendo os critérios da ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar a concepção estrutural das estruturas metálicas em perfis formados a frio e laminados;
- Analisar cada estrutura e executar seus respectivos dimensionamentos com o auxílio de softwares;
- Comparar o consumo de aço proveniente das duas formas de execução.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Aço na Construção Civil

Segundo Pfeil e Pfeil (2022), o aço é uma liga de ferro e carbono que contém elementos residuais, como fósforo, silício, enxofre e manganês, decorrentes do processo de fabricação, bem como elementos de liga, bem como elementos de liga com propósito de melhorar as características mecânicas e físicas do material. Em termos de composição química, os aços podem ser classificados em aço carbono, que contém teor normal de elementos residuais, e aços liga, que são aços carbono acrescidos de elementos de liga ou apresentam altos teores de elementos.

Segundo Chiaverini (1996), as aplicações do aço podem ser classificadas em diversas categorias, cada uma com características específicas. Por exemplo, aços estruturais são utilizados em construções e requerem boa ductilidade, soldabilidade e ductilidade, além de uma elevada relação entre tensão resistente e de escoamento. Também é importante que esses aços sejam resistentes à corrosão, o que pode ser obtido através da adição de cobre. Os aços carbono e aços com baixo teor de liga ou microligados, ambos com baixo e médio teor de carbono, são amplamente utilizados em estruturas. Aços estruturais com elevada resistência podem ser obtidos por meio de tratamentos térmicos (perfis soldados e laminados) ou processos de conformação (perfis formados a frio).

Embora o aço seja conhecido desde a antiguidade, somente com o surgimento dos fornos que permitiram a produção em grande escala é que o aço pôde substituir o ferro forjado e o ferro fundido. Por volta de 1880, os laminadores de barra foram introduzidos, e até meados do século XX, o aço carbono com resistência à ruptura de cerca de 370 Mpa era utilizados em construções. A partir da década de 1950, houve um crescimento na utilização de aços de maior resistência. O uso de aços de baixa liga, com ou sem tratamento térmico só se difundiu a partir das décadas de 1960 e 1970. Atualmente, as grandes estruturas modernas contam com diversas categorias de aço.

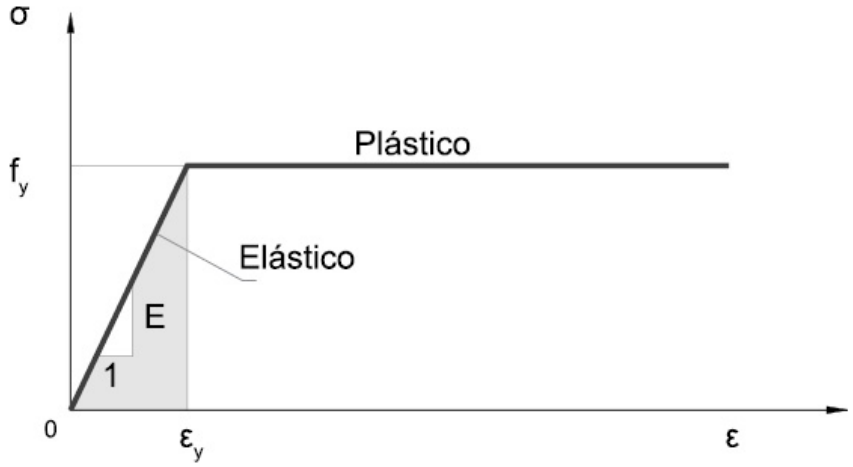
2.2 Propriedades mecânicas dos aços estruturais

Para compreender o comportamento de uma estrutura de aço é imprescindível que o engenheiro projetista possua o conhecimento das características do aço utilizado. É fundamental que o engenheiro estrutural considere sempre o diagrama de tensão-deformação,

pois através deste é possível obter informações essenciais para compreender o comportamento do material em determinada situação (ANDRADE, 2016).

A Figura 1 ilustra um exemplo simplificado do gráfico tensão-deformação de um aço carbono, normalmente empregado em projetos. O gráfico apresenta um trecho inicial linear, que corresponde ao regime elástico do material, seguido por um patamar de escoamento, no qual ocorre o aumento da deformação com tensão constante, também conhecido como cedência. Por fim, encontra-se um trecho denominado de encruamento do aço, onde ocorre um aumento da deformação com tensão constante. No entanto, a fase de encruamento não é relevante para o projeto de estruturas metálicas, a não ser para determinar o valor da tensão na qual o metal se rompe, conhecida como tensão de ruptura (f_u).

Figura 1 – Gráfico de tensão/deformação utilizado no projeto



Fonte: Andrade, 2016.

2.2.1 Propriedades físicas gerais

De acordo com a NBR 8800/2008, devem ser adotadas em todos os aços estruturais para faixas normais de temperaturas atmosféricas as seguintes características físicas:

- Módulo de Young (Módulo de elasticidade), $E = E_a = 200.000$ MPa
- Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$
- Módulo de elasticidade transversal, G = 77.000 MPa
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 12 \times 10^{-6}.°C^{-1}$
- Peso específico, $\gamma_a = 77\ \frac{kN}{m^3}$

2.2.2 Ductilidade

De acordo com Pfeil e Pfeil (2022), define-se pela capacidade do material em se deformar sob ação de cargas. Quando submetidos a tensões locais elevadas, os aços dúcteis sofrem deformações plásticas que são capazes de redistribuir as tensões. Esse comportamento dúctil permite que se considere uma distribuição uniforme das cargas entre todos os parafusos de uma ligação parafusada. Além disso, ao observar a estrutura de forma mais ampla, esse comportamento plástico nos alerta sobre a atuação de cargas elevadas, já que gera grandes deformações antes da ruptura da estrutura.

2.2.3 Fragilidade

A fragilidade do aço é caracterizada como a incapacidade de deformação plástica ou de absorção de energia antes da ruptura. Esse fenômeno é oposto à ductilidade e pode ser desencadeado em baixas temperaturas ambientes ou por efeitos térmicos locais resultantes de processos como solda elétrica. É de extrema importância o estudo das condições que levam à fragilização do aço, uma vez que materiais frágeis falham abruptamente, sem aviso prévio. Inúmeros acidentes envolvendo pontes e navios foram ocasionados por esse tipo de falha, decorrente de procedimentos inadequados na soldagem (PFEIL & PFEIL, 2022).

2.2.4 Resiliência e Tenacidade

Segundo Pfeil e Pfeil (2022), a resiliência e a tenacidade podem ser definidos com base no diagrama tensão-deformação, que está intrinsicamente relacionado à capacidade do material metálico de absorver energia mecânica. O módulo de resiliência, ou simplesmente resiliência, é a quantidade de energia elástica que pode ser absorvida por unidade de volume do material quando submetido à tração, representando a capacidade do material de retornar a energia mecânica absorvida durante o regime elástico. No diagrama de tensão-deformação, a resiliência é dada proporcionalidade.

Ainda de acordo com Pfeil e Pfeil (2022), a tenacidade é definida como a energia total absorvida por unidade de volume do material até a ruptura, levando em consideração tanto a energia elástica quanto a energia plástica. A tenacidade no diagrama tensão-deformação pela área total sob a curva.

2.2.5 Dureza

Caracteriza-se pela propriedade física do aço que descreve sua capacidade de resistir a riscos ou abrasões. A medida da dureza é baseada na resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza. Deste modo, a dureza é determinada pela força necessária para fazer uma impressão ou marcar a superfície do aço. Essa propriedade é influenciada pela composição química e pelo tratamento térmico do material, bem como por sua microestrutura (PFEIL & PFEIL, 2022).

2.2.6 Fadiga

Segundo Andrade (2016), a fadiga define-se como uma outra forma de deterioração do aço estrutural, a qual ocorre em estruturas submetidas a cargas variáveis ou repetitivas, como vigas de rolamento, pontes rodoviárias ou ferroviária, e estruturas de edifícios industriais que suportam equipamentos móveis. A falha por fadiga está associada à propagação de trincas no material, essas trincas são iniciadas nos pontos de concentração de tensões, como furos ou variações abruptas de seção, ou em falhas presentes nas soldas. Depois de iniciadas, as trincas se propagam intermitentemente. A resistência à fadiga depende de diversos fatores, alguns dos quais são independentes, como a geometria da peça, o tipo de aço utilizado, as tensões residuais, a intensidade das tensões, o tipo e os detalhes da ligação, entre outros.

2.2.7 Corrosão

A corrosão é um processo que ocorre quando o aço reage com determinados elementos presentes no ambiente em que está exposto. Este processo pode levar à perda da seção transversal das peças de aço, o que reduz sua resistência e eventualmente pode resultar no colapso do elemento afetado. Para evitar a corrosão, são comumente utilizados métodos de proteção, como a aplicação de camadas de tinta ou galvanização das peças.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2022), incluir cobre na composição química do aço resulta em um aumento da sua resistência à corrosão atmosférica. Quando exposto ao ar, o aço consegue resistir à corrosão, formando uma película (denominada pátina) por conta própria. Essa pátina se torna uma barreira que reduz a progressão do processo corrosivo.

2.2.8 Tensões Residuais

As tensões residuais surgem nos elementos estruturais de aço devido ao resfriamento não-uniforme decorrente de processos como a laminação a quente, oxicorte, soldagem, entre outros. A distribuição e intensidade das tensões residuais são condicionadas por diversos fatores, incluindo as dimensões e formato da seção transversal, os métodos utilizados para retificar as peças, as propriedades mecânicas e térmicas do material, a temperatura de laminação ou soldagem, bem como a velocidade de resfriamento da peça (GALAMBOS, 1998).

Para que seja considerado o efeito ocasionado pelas tensões residuais em modelos computacionais de elementos finitos, alguns autores, dentre eles Almeida (2012), Dutra (2014), Cardoso (2014) e Pfeil e Pfeil (2022), sugerem uma alteração no diagrama de tensão x deformação que descreve o comportamento do aço (Figura 2), de maneira que a tensão de início do escoamento do aço, ao ser submetido a forças de tração ou compressão, seja estabelecida em um valor determinado σ_p, dado por:

$$\sigma_p = f_y - \sigma_r, \quad (1)$$

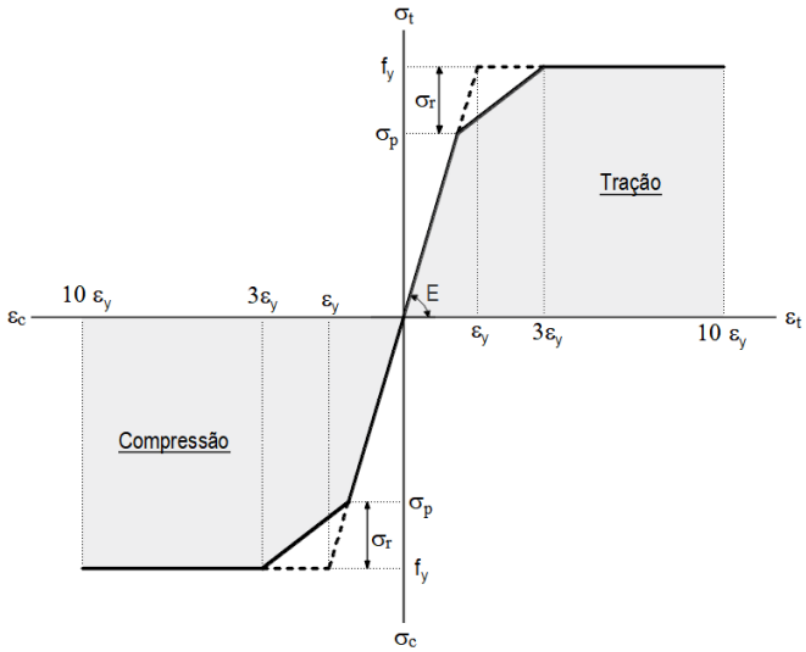
Onde:

σ_p = é a tensão correspondente ao limite de proporcionalidade do aço;

f_y = é a resistência ao escoamento do aço;

σ_r = é a tensão residual média no elemento estrutural.

Figura 2 – Curva de tensão x deformação utilizada para descrever o comportamento mecânico do aço considerando as tensões residuais



Fonte: Adaptado de Almeida (2012).

2.3 Elaboração do projeto estrutural

Em posse dos conceitos adequados acerca das estruturas de aço, o projeto estrutural tem como objetivo:

- Garantir a segurança da estrutura, evitando-se o colapso da estrutura;
- Garantir a usabilidade da estrutura ao longo de sua vida útil, evitando grandes deslocamentos, vibrações e danos locais.

Segundo Pfeil e Pfeil (2022), o processo de desenvolvimento de um projeto estrutural pode ser dividido em três fases principais. A primeira fase é conhecida como anteprojeto ou projeto básico, onde são definidos o sistema estrutural a ser utilizado, os materiais que serão empregados e o sistema construtivo adotado. Na segunda fase, chamada de dimensionamento ou cálculo estrutural, as dimensões dos elementos da estrutura e suas ligações são determinadas de forma a garantir a segurança e bom desempenho da estrutura. Por fim, na terceira fase, o detalhamento, são elaborados os desenhos executivos da estrutura, contendo as especificações de todos componentes. Essa etapa é crucial para garantir que o projeto seja executado de forma correta e eficiente.

2.3.1 Normas de Projeto

De acordo com Castro (1997), as normas de projeto têm a finalidade de garantir a segurança de todas as estruturas erigidas sob sua esfera de influência. O calculista, por sua vez, tem como incumbência conceber uma estrutura que cumpra com os requisitos mínimos estipulados pelas normas para garantir a segurança, além de apresentar praticidade e economicidade. Embora seja relevante considerar a praticidade e a economia no estabelecimento das normas, sua principal finalidade é garantir a segurança das estruturas.

A norma de projeto é um conjunto de padrões estabelecidos para medir todas as estruturas de um mesmo tipo. Durante a fase de projeto, a norma atua como um regulador para garantir que as edificações da população amostrada obedeçam aos mesmos critérios mínimos. A verificação da conformidade com a norma é uma tarefa árdua, porém essencial. A conformidade com a norma protege os projetistas de possíveis acusações de negligência, caso ocorra algum problema coberto pela norma. Comumente, a conformidade com a norma é associada pelos engenheiros, governo e sociedade à segurança estrutural. Entretanto, isso não é

completamente verdade, pois a conformidade com a norma assegura à sociedade que existe uma pequena chance, porém aceitável, de ocorrência de falhas na estrutura (Galambos, 1982).

2.3.2 Considerações de Segurança nas Normas

Para uma estrutura ser considerada segura, é necessário que seja verificada tanto em relação aos estados limites últimos quanto aos estados limites de serviço.

As normas técnicas têm como principal preocupação o fato de que, na fase de projeto, não é possível conhecer com certeza as propriedades estruturais e magnitude das cargas durante sua vida útil. Para lidar com essas incertezas, as normas tradicionalmente empregam "fatores de segurança" (Galambos, 1992). Os principais métodos para incorporar os critérios de segurança nas normas técnicas são o "Método das Tensões Admissíveis" e o "Método dos Estados Limites".

Segundo Galambos (1992), durante a maior parte do século XX, a metodologia de cálculo estrutural tradicionalmente utilizada foi a de tensões admissíveis, a qual teve sua origem no século XIX com a formulação dos princípios dos métodos viáveis de análise linear elástica, possibilitando o cálculo de tensões. Nesse método, a estrutura é avaliada sob ações nominais, limitando-se a tensão a um valor admissível que não pode ser excedido. As ações nominais são as maiores ações esperadas para o tempo de vida útil da estrutura, e as tensões resultantes são calculadas considerando-se um comportamento elástico linear. A tensão admissível é uma fração de uma tensão limitante, como a tensão de escoamento ou a tensão crítica de flambagem, sendo a relação entre a tensão limitante e a tensão admissível denominada fator de segurança. Esse fator leva em consideração a possibilidade de ocorrência de valores desfavoráveis das ações e propriedades dos materiais, assim como as incertezas do modelo teórico.

O cálculo pelo método das tensões admissíveis é atrativo por sua facilidade de uso computacional e compreensão. O engenheiro verifica se a estrutura é segura sob ações fixadas em valores altos, usando uma tensão admissível abaixo de um valor limitante. O método assegura que, sob situações extremas de carregamento, a estrutura responda elasticamente, não havendo problema com a presença de múltiplas ações e permitindo a superposição de efeitos. A maioria dos problemas de utilização é levada em conta automaticamente, desde que a tensão admissível elástica não seja ultrapassada.

Entretanto, apesar da sua praticidade, o método das tensões admissíveis não fornece informações suficientes sobre a capacidade de carga real da estrutura. A relação entre a ação limite baseada em tensões admissíveis e a resistência última é variável para diferentes tipos de

estruturas, especialmente indeterminadas estaticamente. Além disso, em muitas estruturas, a consideração de linearidade entre tensões e deformações, esforços e ações, não é muito realista, mesmo sob níveis de ação de serviço. Para muitos engenheiros, o método das tensões admissíveis também não é uma ferramenta de cálculo que garanta economia, isso levou ao desenvolvimento de métodos de cálculos plásticos para estruturas de aço entre 1940 e 1950, enquanto outros pesquisadores perceberam a possibilidade de quantificar os juízos e incertezas que são a base dos fatores de segurança utilizando a teoria da probabilidade.

Segundo Castro (1997), a primeira geração de normas de cálculo em estados limites, também conhecida como normas de cálculo baseadas na capacidade última, surgiu a partir de uma ampla pesquisa do comportamento de resistência última de vários tipos de estruturas e ligações.

No Brasil, para projetos de estruturas metálicas, as normas NBR 8681/2003, NBR 8800/2008 e NBR 14762/2010 estabelecem os procedimentos para introduzir medidas de segurança. Essas normas condicionam valores para os coeficientes de majoração das solicitações, especificam os tipos e características das combinações dessas ações, bem como definem os coeficientes de minoração para cada caso de solicitação.

2.3.3 Método das Tensões Admissíveis

Um método bastante difundido na área da engenharia é denominado de Método das Tensões Admissíveis. Para garantir a segurança estrutural, esse método exige que a máxima tensão atuante em condições normais de operação não ultrapasse um valor estabelecido como admissível (Fusco, 1981).

A filosofia de projeto conhecida como Método das Tensões Admissíveis evoluiu a partir da aplicação da teoria da elasticidade, a qual assume uma relação linear entre tensões e deformações na estrutura. No método das tensões admissíveis, a abordagem de dimensionamento consiste em calcular a tensão σ em um regime elástico-linear para o carregamento máximo esperado, e compará-la com a tensão admissível σ_{adm}, que é uma fração da tensão limite. A tensão limite define o nível de tensão a partir do qual o comportamento elástico-linear não é mais aplicável.

Esse critério de projeto pode ser definido como:

$$\sigma \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{FS}, \qquad (2)$$

Onde FS é o fator de segurança.

2.3.4 Método dos Estados Limites

Há varias objeções ao uso do Método das Tensões Admissíveis na abordagem do problema de segurança estrutural, tanto do ponto de vista científico como econômico. Essas objeções foram amplamente conhecidas pelos pesquisadores há décadas. Como resultado, esforços para desenvolver outro método de projeto que acomodasse essas objeções começaram na década de 1930 na União Soviética e na década de 1940 na Inglaterra e nos Estados Unidos (Galambos, 1992).

Com o intuito de abordar as objeções relativas ao Método das Tensões Admissíveis, foi desenvolvido o Método dos Estados Limites. Esse método baseia-se na ideia de estados limites, ou seja, condições em que a estrutura ou elemento estrutural torna-se inadequado para desempenhar sua função prevista. No método dos Estados Limites, o projeto estrutural começa pela verificação da resistência última (para segurança humana), e em seguida, pela verificação do estado limite de utilização.

O Método dos Estados Limites também é conhecido como método semi-probabilístico, pois se baseia na análise elástica com coeficientes ponderados aplicados tanto às ações quanto às resistências dos materiais, mas admite um comportamento estrutural como determinístico. Portanto, é chamado de semi-probabilístico (Galambos, 1992).

A ideia central desse critério é que as resistências devem ser minoradas e as cargas devem ser majoradas, a fim de garantir a segurança estrutural.

Este critério de projeto é dado por (Galambos, 1992):

$$F_d \geq \sum \gamma_i Q_i \qquad (3)$$

O carregamento da equação 4 pode assumir outras alternativas, como o formato existente na NBR 8681 (2003). As combinações últimas normais são dadas pela seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \,.\, F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \psi_{0j} \,.\, F_{Qj,k} \right], \qquad (4)$$

Onde:

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

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação;

$\Psi_{0j}F_{Qj,k}$ é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis.

As principais vantagens observadas do Método dos Estados Limites em relação ao Método das Tensões Admissíveis são a confiabilidade mais uniforme, visto que, os coeficientes de segurança são determinados de maneira que evite a ultrapassagem de algum estado limite, é possível desmembrar incertezas da avaliação das ações e do modelo de cálculo.

2.3.5 Ações

De acordo com a NBR 8800/2008, ações são as forças que exercem influência direta sobre as estruturas, provocando esforços e deformações que devem ser considerados no projeto. Na prática, as forças e deformações resultantes são tratadas como as próprias ações. As normas apropriadas e as condições específicas da estrutura determinam as ações a serem adotadas nos projetos de estruturas de aço e seus componentes, que são consideradas nominais. As ações nominais podem ser consideradas de três tipos: permanentes, variáveis e excepcionais.

- As ações permanentes têm pequena variação média durante o tempo de vida da construção e incluem o peso próprio da estrutura, revestimentos e acabamentos;
- As ações variáveis apresentam grandes variações em torno da média durante a vida útil da construção, são exemplos as sobrecargas, divisórias, equipamentos e vento;
- As ações excepcionais apresentam durações extremamente curtas e baixa ocorrência durante a vida útil da construção e incluem explosões, choque de veículos, terremotos, incêndios, entre outros.

No método dos Estados Limites é compreendido que alguns tipos de ações são mais precisamente conhecidos que outros. Por exemplo, o peso próprio tem menor variabilidade do que a sobrecarga e ação do vento. Para levar isso em consideração, o conceito de vários fatores de carga foi introduzido. No entanto, surge o problema de adotar valores máximos de vida útil simultaneamente para ações de baixa duração, como sobrecarga, vento ou terremoto. Para resolver esse problema, são utilizados os chamados fatores de combinação de carga, em que os coeficientes de ponderação das cargas e das resistências são ajustados para obter maior

uniformidade da probabilidade de falha, considerada aceitável para uma determinada classe de estruturas. Esse processo de ajuste dos fatores φ e γ é conhecido como calibração da norma.

2.3.6 Combinações de Ações

Em concordância com a NBR 8800/2008, um carregamento é definido como uma combinação de ações que apresentam probabilidade não desprezível de atuarem simultaneamente sobre as estruturas durante um período pré-estabelecido. A combinação das ações deve ser realizada de modo a determinar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. É necessário verificar os estados limites últimos e estados limites de serviço em função das combinações últimas e das combinações de serviço, respectivamente.

2.3.6.1 Combinações últimas

Conforme estabelecido pela NBR 8800/2008, as combinações últimas são classificadas em quatro tipos: normal, especial, de construção e excepcional.

- Normal

As combinações últimas são determinadas em função do uso previsto da edificação, sendo aplicada a seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi}F_{Gi,k}) + \gamma_{q1}F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j}F_{Qj,k}), \qquad (5)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ são os valores característicos das ações permanentes;

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

$F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações variáveis simultâneas secundárias.

- Especiais

Emprega-se a expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi}F_{Gi,k}) + \gamma_{q1}F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj,k}), \qquad (6)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ são os valores característicos das ações permanentes;

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

$F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações variáveis simultâneas secundárias;

$\Psi_{0j,ef}$ caracteriza os fatores de combinação efetivos das ações variáveis que podem atuar simultaneamente com a ação variável especial F_{Q1}.

- Excepcionais

Emprega-se a expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + F_{Q1,exe} + \sum_{j=2}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef} F_{Qj,k}), \qquad (7)$$

Onde:

$F_{Q,exe}$ é o valor da ação transitiva excepcional.

2.3.6.2 Combinações de Serviço

As combinações de serviço são utilizadas para o dimensionamento das seções transversais dos elementos estruturais e verificação das deformações e deslocamentos admissíveis, divide-se em: quase permanentes, frequentes e raras.

- Quase permanentes:

Atuam durante a maior parte da vida útil da estrutura, é expressa por:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^{n}(\psi_{2j} F_{Qj,k}), \qquad (8)$$

- Frequentes:

Consideram-se cargas frequentes aquelas que ocorrem em múltiplas ocasiões durante o período de vida útil da estrutura, sendo sua frequência igual ou superior a 10^5 vezes em 50 anos, ou que apresentem uma duração total equivalente a uma parcela significativa desse período, estimada em aproximadamente 5%. É expressa por:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n}(\psi_2 F_{Qj,k}), \qquad (9)$$

2.3.7 Resistências

2.3.7.1 Valores característicos

Os valores característicos f_k representam as características dos materiais, sendo definidos como aqueles que possuem uma determinada de serem ultrapassados no sentido desfavorável à segurança, em um lote de material. Esses valores são admitidos como sendo aqueles que possuem apenas 5% de probabilidade de não serem atingidos pelo lote de material em questão.

2.3.7.2 Valores de projeto

A resistência de projeto f_d de um determinado material é dada por:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}, \qquad (10)$$

$$\gamma_m = \gamma_{m1}\gamma_{m2}\gamma_{m3}, \qquad (11)$$

Onde:

f_k é a resistência característica, também chamada de nominal;

γ_m é o coeficiente de ponderação;

γ_{m1} é a fração do coeficiente que considera probabilidade de que a resistência de diferentes amostras do material pode variar;

γ_{m2} é a fração do coeficiente que considere que a resistência do material possa ser influenciada por fatores externos e possa variar entre a amostra do material no corpo-de-prova e na estrutura em que é utilizado;

γ_{m3} é a fração do coeficiente que considera a probabilidade de que a resistência real do material possa diferir da resistência prevista durante o projeto, em decorrência de imprecisões na execução da obra e em cálculos teóricos.

- Coeficientes de ponderação das resistências no estado limite último (ELU):

Os valores dos coeficientes de ponderação das resistências γm, que são representados pelos coeficientes γa, γc e γs, estão especificados na tabela 3 da norma técnica brasileira NBR 8800/2008. Para o caso específico do aço estrutural, são definidos dois coeficientes distintos, $\gamma a1$ e $\gamma a2$. O coeficiente $\gamma a1$ é aplicado para estados limites últimos relacionados a escoamento

e instabilidade, enquanto o coeficiente $\gamma a2$ é utilizado para estados limites últimos relacionados à ruptura.

- Coeficientes de ponderação das resistências no estado limite de serviço (ELS):

O valor definido para os estados limites de serviço, ainda em concordância com a NBR 8800/2008, é de: $\gamma_m = 1{,}00$.

2.3.8 Barras Tracionadas

São denominadas de peças tracionadas aquelas que estão sujeitas à solicitação de tração axial, também conhecidas como tração simples. Essas peças podem ser encontradas em diversas formas nas estruturas, tais como:

- Contraventamento de torre, também chamados de estais;
- Tirantes de vigas armadas;
- Barras tracionadas treliçadas;
- Tirantes ou pendurais;
- Travejamento de vigas ou colunas, geralmente em forma de X ou K invertido.

2.3.8.1 Comportamento das barras tracionadas

De acordo com Fadel e Carqueja (2012), as barras tracionadas de aço com seção transversal uniforme apresentam um comportamento bastante similar ao modelo teórico, permitindo geralmente a suposição de uma distribuição uniforme de tensões nas seções transversais. Nessas circunstâncias, uma barra solicitada à tração pode ser analisada com base nos mesmos princípios utilizados no ensaio de tração em corpos de prova. Enquanto as tensões aplicadas permanecerem abaixo do limite de proporcionalidade do material, seu comportamento seguirá o modelo teórico elástico clássico da mecânica dos sólidos.

Em peças tracionadas, o esforço normal de tração (N) causa o acúmulo de tensões normais (σN) que se somam às tensões residuais (σr) em cada seção, resultando em uma força nula. Com o aumento da força de tração, há um processo progressivo de plastificação da seção. A presença de furos em ligações, assim como mudanças bruscas na seção transversal, são comuns e geram concentração de tensões. As tensões aumentam proporcionalmente com as deformações dentro do limite elástico e são distribuídas de forma não uniforme, apresentando maiores valores nas fibras próximas ao furo.

2.3.8.2 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008

- Estados limites últimos (ELU):

No que diz respeito ao Estado Limite Último (ELU), é necessário cumprir com as disposições estabelecidas no item 5.2 da NBR 8800/2008 (Barras prismáticas submetidas à força axial de tração) para realizar o dimensionamento adequado, satisfazendo a expressão:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad , \qquad (12)$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ é o esforço de cálculo solicitante na barra;

$N_{t,Rd}$ é o valor resistente de cálculo.

a) Para o limite de escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad , \qquad (13)$$

b) Para a ruptura da seção liquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad , \qquad (14)$$

Onde:

f_y representa a resistência do aço ao escoamento;

f_u representa a resistência do aço à ruptura;

γ_{a1} representa o coeficiente de ponderação referente ao escoamento, flambagem e instabilidade, possui valor igual a 1,10;

γ_{a2} representa o coeficiente de ponderação referente à ruptura, possui valor igual a 1,35;

A_g é a área bruta da seção transversal do elemento estrutural;

A_e é a área liquida efetiva da seção transversal do elemento estrutural, é expresso por:

$$A_e = C_t . A_n, \qquad (15)$$

Sendo:

A_n é a área líquida da barra, determinada conforme o item 5.2.4 da referida norma;

C_t é um coeficiente de redução da área líquida, determinado conforme o item 5.2.5 da referida norma.

O cálculo da área líquida A_n de uma seção transversal de uma barra deve ser realizado somando-se os produtos da espessura pela largura líquida de cada elemento da seção, medidos na direção normal ao eixo da barra.

- Estado Limite de Serviço (ELS):

De acordo com a NBR 8800/2008, no Estado Limite de Serviço (ELS), a esbeltez de uma peça submetida a um esforço axial de tração não pode exceder o valor de 300. Essa limitação visa garantir a segurança e a estabilidade das estruturas, evitando que as peças sofram deformações excessivas ou falhas inesperadas. Além disso, essa limitação ajuda a garantir o bom desempenho das estruturas ao longo do tempo, minimizando os efeitos de fluência e fadiga nos materiais. É dada por:

$$\lambda = \frac{l}{r} \leq 300 \quad , \qquad (16)$$

Onde:

r é o raio de giração;

l é o comprimento destravado do elemento com relação ao eixo em que se tomar r.

2.3.9 Barras Comprimidas

2.3.9.1 Comportamento das barras comprimidas

Segundo a NBR 8800/2008, barras comprimidas são elementos estruturais sujeitos a cargas de compressão axial, nas quais as tensões agem em uma direção perpendicular ao eixo da barra e a carga é aplicada na direção do eixo da barra. A barra pode ser reta ou curva, com seção transversal constante ou variável ao longo do seu comprimento. O estado-limite último (ELU) para barras comprimidas é atingido quando a carga de compressão aplicada é suficiente para produzir a instabilidade da barra, o que pode ocorrer por flambagem local ou global, dependendo das condições de contorno e da geometria da barra.

A flambagem local é uma instabilidade que pode ocorrer em chapas componentes de um perfil comprimido, caracterizada pelo surgimento de deslocamentos transversais à chapa na forma de ondulações. A ocorrência da flambagem local depende da esbeltez da chapa, que é a relação entre a largura e a espessura da chapa (b/t) (PFEIL & PFEIL, 2022).

2.3.9.2 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008

O dimensionamento de barras comprimidas de acordo com a NBR 8800/2008 é realizado levando em consideração o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS).

No ELU, o dimensionamento deve verificar se a tensão normal de compressão na seção resistente da barra é menor ou igual à sua resistência de cálculo à compressão. Já no ELS, o dimensionamento deve verificar se a tensão normal de compressão na seção resistente da barra é menor ou igual à sua resistência de cálculo à compressão dividida pelo coeficiente de ponderação da carga, considerando-se ainda as limitações impostas para a esbeltez da barra.

Para o dimensionamento de barras comprimidas, é necessário também verificar a ocorrência da flambagem global e da flambagem local. A flambagem global é verificada comparando-se o momento fletor resistente da seção transversal da barra com o momento fletor solicitante na barra, enquanto a flambagem local é verificada comparando-se a tensão de compressão na chapa com a sua tensão de escoamento.

Além disso, o dimensionamento deve levar em consideração as condições de contorno da estrutura e a necessidade de proteção contra a corrosão. Todos os critérios de dimensionamento e verificação devem ser realizados de acordo com as prescrições da NBR 8800/2008. Deve-se garantir que a seguinte expressão seja satisfeita:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \ , \qquad (17)$$

Onde:

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

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo.

a) Determinação da força axial de compressão resistente de cálculo

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad , \qquad (18)$$

Onde:

X é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q é o fato de redução total associado à flambagem local;

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

γ_{a1} representa o coeficiente de ponderação referente ao escoamento, flambagem e instabilidade, possui valor igual a 1,10.

b) Fato de redução X

O fator de redução associado à resistência à compressão, X, é dado por:

- para $\lambda_0 \leq 1{,}5$: $\chi = 0{,}658^{\lambda_0{}^2}$ (19)

- para $\lambda_0 > 1{,}5$: $\chi = \frac{0{,}877}{\lambda_0{}^2}$ (20)

onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad , \qquad (21)$$

Onde N_e é a força axial de flambagem elástica, apresentado no tópico a seguir.

De acordo com a NBR 8800/2008 o índice de esbeltez das barras comprimidas é definido como a maior relação entre o produto KL e o raio de giração correspondente r, ou seja, $\frac{KL}{r}$, em que K é o coeficiente de flambagem e L é o comprimento destravado. Esse índice não deve ser superior a 200 para garantir a segurança estrutural.

c) Valores da força axial de flambagem elástica

Para seções com dupla simetria ou simétricas em relação a um ponto, em concordância com a NBR 8800/2008, trata-se da menor força axial de compressão que pode causar flambagem

local ou lateral elástica de uma barra, quando submetida a uma deformação axial, cuja a curvatura é constante ao longo do comprimento de flambagem.

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal simétrica ou duplamente simétrica em relação a um ponto é dada pelas seguintes expressões:

- para flambagem por flexão considerando-se o momento fletor atuando no eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \ , \qquad (22)$$

- para flambagem por flexão considerando-se o momento fletor atuando no eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \ , \qquad (23)$$

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

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G\,J \right] , \qquad (24)$$

Onde:

$K_x L_x$ é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x;

I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;

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

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;

$K_z L_z$ é o comprimento de flambagem da barra por torção;

E é o módulo de elasticidade do aço;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

J é a constante de torção da seção transversal;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta com relação ao centro de cisalhamento.

A expressão para determinar o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, r_0, é obtida a partir dos raios de giração r_x e r_y em relação aos eixos centrais x e y,

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

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}\,, \qquad (23)$$

2.3.10 Barras Fletidas

Segundo Fadel e Cargueja (2012), barras submetidas a cargas transversais ao seu eixo longitudinal, sujeitas ao momento fletor e esforço cortante, são chamadas de barras fletidas. A resistência ao momento fletor das vigas pode ser afetada pela flambagem local da mesa (FLM), pela flambagem local da alma (FLA) e pela flambagem lateral com torção (FLT).

A flambagem local ocorre quando há perda de estabilidade das chapas comprimidas do perfil, o que reduz o momento resistente da seção. A flambagem lateral com torção ocorre quando a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção.

2.3.10.1 Comportamento das barras submetidas a momento fletor

De acordo com a NBR 8800/2008, as barras de aço submetidas à flexão apresentam um comportamento linear-elástico até a ocorrência da primeira fissura na região tracionada da seção transversal, momento a partir do qual a curvatura aumenta significantemente com o pequeno acréscimo de momento fletor. Após a formação da primeira fissura, a seção transversal há uma redistribuição de esforços para a região comprimida e consequentemente o aumento da capacidade de suporte de carga da seção.

A capacidade de suporte é determinada pela resistência à tração do aço na região tracionada e pela capacidade resistente da seção na região comprimida, que pode ser limitada pela ocorrência de flambagem local ou global.

2.3.10.1.1 Dimensionamento de acordo com a NBR 8800/2008

O dimensionamento aos estados limites últimos de uma barra sujeita a momento fletor deve atender a expressão pela equação (24), conforme estabelecido pela NBR 8800 (ABNT,2008):

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad , \qquad (24)$$

O momento fletor é calculado de acordo com a seção que se deseja dimensionar. Para o caso de vigas metálicas expostas à flambagem local da mesa (FLM) e flambagem local da alma (FLA), o momento fletor resistente é obtido a partir da classificação da seção, que é determinada pela análise dos parâmetros de esbeltez, onde, em concordância com a NBR 8800/2008, são dados por:

- Seções compactas ($\lambda \leq \lambda_0$):

Seções com baixa esbeltez que permitem a obtenção do momento plástico impedindo grandes rotações da seção, neste caso o momento resistente de cálculo é obtido através da expressão:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z f_y}{\gamma_{a1}}, \quad (25)$$

- Seções semicompactas ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) :

Seções onde a esbeltez permite a obtenção do momento inicial de escoamento, não obtendo o momento de plastificação, sem a ocorrência de flambagem local. A resistência limite deste caso é determinado pela flambagem inelástica, que ocorre quando a flambagem lateral simultaneamente com o escoamento de algumas fibras da seção transversal. O momento resistente neste caso pode ser obtido por meio da equação:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r \right) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \quad (26)$$

C_b é um fator de modificação do momento fletor resistente e obtido através dos itens 5.4.2.3 ou 5.4.2.4 da NBR 8800/2008.

- Seções esbeltas ($\lambda_r < \lambda$):

Verifica-se a ocorrência de instabilidade por flambagem lateral antecipada à tensão de escoamento das fibras mais solicitadas em elementos estruturais submetidos à flexão, ocasionando a redução da capacidade resistente do componente.

Nesse caso, o momento fletor resistente da seção é obtido por meio de equações que consideram os efeitos da flambagem lateral, incluindo o comprimento efetivo da barra, a largura

da aba, a espessura da alma e outros parâmetros geométricos e de material, determinado através da equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \quad (27)$$

2.4 Perfis Formados a Frio

De acordo com a norma NBR 14762:2010, é definido como perfil formado a frio aquele que é obtido por meio de dois processos principais. O primeiro ocorre por meio do dobramento em prensa dobradeira de tiras cortadas de chapas ou bobinas. O segundo processo ocorre por meio da conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, utilizando bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não. Ambas as operações devem ser realizadas com o aço em temperatura ambiente.

Chodraui (2006) diz que, quando comparados aos perfis laminados e soldados, os perfis formados a frio apresentam como principais vantagens a ampla variedade de seções transversais que podem ser produzidas, a facilidade de montagem, a versatilidade de aplicação e a redução significativa do peso dos elementos estruturais.

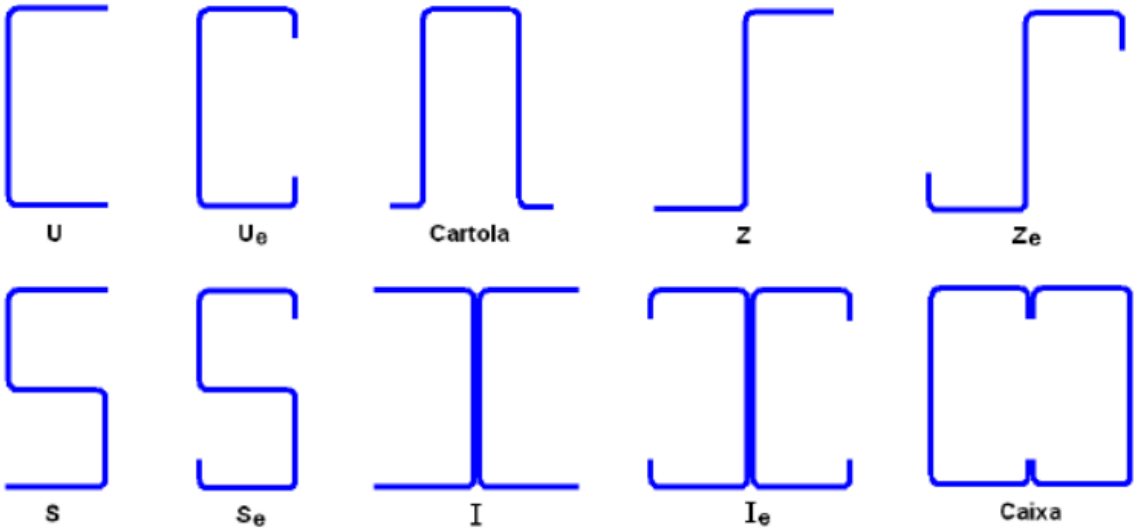
Os perfis formados a frio têm sido amplamente utilizados em diversos setores da construção metálica, tendo ganhado espaço em áreas anteriormente dominadas pelos perfis laminados, tais como edificações de pequeno porte, edifícios industriais, edifícios de andares múltiplos, silos reservatórios, racks, sinalização e proteção rodoviária, bem como na indústria mecânica, entre outras aplicações (HANCOCK, MURRAY & ELLIFRITT, 2001).

A utilização de perfis formados a frio na construção civil é frequentemente considerada uma opção viável e elegante, pois esses perfis possuem maior esbeltez em comparação aos perfis laminados, o que resulta em estruturas mais leves. Segundo Yu (2000), há várias vantagens em utilizar perfis formados a frio como elementos estruturais na construção de edificações, como a economia em estruturas com carregamentos leves e em vãos menores, a possibilidade de fabricação de inúmeras seções para obter ótimas relações de resistência em função do peso, a facilidade de execução de painéis estruturais de paredes e pisos, permitindo a passagem de dutos e encanamentos de instalações hidráulicas, além de suportarem cargas normais e resistirem a esforços de cisalhamento em seus próprios planos.

Conforme especificado na NBR 6355:2012 - Perfis estruturais de aço formados a frio: Padronização, os perfis formados a frio podem ser categorizados em dois tipos principais do

ponto de vista do projeto estrutural. O primeiro tipo é composto pelos perfis estruturais individuais, os quais incluem as seções mais comuns encontradas no mercado, tais como perfis cantoneira, U, Ue (enrijecido), Z, Ze (enrijecido), Cr (cartola), cantoneira, caixa, I, Ie (enrijecido) conforme ilustrado na Figura 3. O segundo tipo é composto pelas seções de steel-deck, que são utilizadas para a fabricação de lajes mistas, atuando como forma para a concretagem e como armadura positiva das lajes após a cura do concreto.

Figura 3 – Exemplos de seções transversais de perfis formados a frio



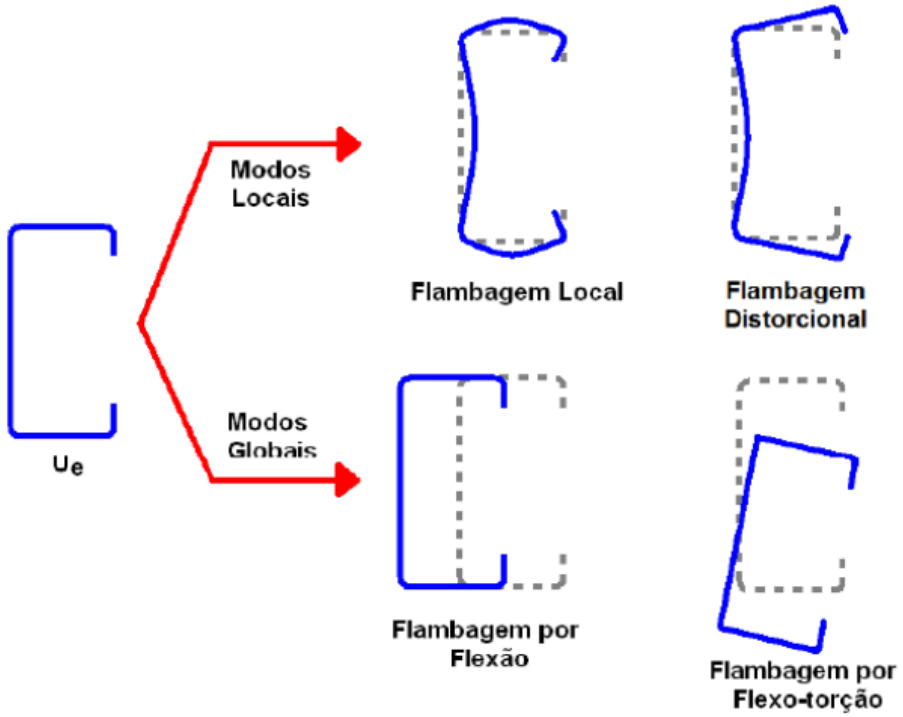
Fonte: Sily (2012).

2.4.1 Critérios de Dimensionamento de Perfis Formados a Frio submetidos à compressão conforme a NBR

A estimativa de cálculo relacionada aos estados-limites contemplados neste estudo está incluída na norma brasileira para estruturas de aço constituídas por perfis conformados a frio. Para determinar a força resistente de cálculo, é utilizado um fator de ponderação, γ, conforme estabelecido na norma brasileira.

Os perfis formados a frio estão suscetíveis a uma variedade de fenômenos de instabilidade devido à alta relação largura-espessura de suas paredes constituintes. É evidente que, além dos fenômenos de flambagem global por flexão e por flexo-torção, os perfis de paredes esbeltas estão vulneráveis à flambagem local e distorcional. A Figura 4 exemplifica os possíveis modos de flambagem de um perfil U enrijecido sob compressão axial (CAPANEMA, 2018).

Figura 4 – Modos de flambagem do perfil U enrijecido submetido à força axial de compressão



Fonte: Silva (2012).

Há estudos acerca do comportamento pós-crítico da flambagem, que incluem o Método da Largura Efetiva, proposto por Von Karman, Sechler e Donnell (1932) e Winter (1947), como também o Método da Seção Efetiva, desenvolvido por Batista (2010). Além disso, uma outra opção é a utilização do Método da Resistência Direta, proposto por Schafer (2006), o qual todos esses três métodos estão previstos na NBR 14762:2010.

2.4.2 Flambagem Local

Conforme a NBR 14762/2010, flambagem local é um fenômeno que ocorre em elementos estruturais delgados, caracterizado pelo surgimento de deformações plásticas locais em virtude da perda de estabilidade da seção transversal sob ação de compressão axial.

Em outras palavras, quando um elemento delgado, como chapa ou perfil esbelto, é submetido a uma compressão axial, a carga aplicada pode exceder sua capacidade de suporte, levando a uma perda de estabilidade da seção transversal e ao surgimento de deformações plásticas locais, como amassamentos, rugas ou dobras.

2.4.2.1 Método da Largura Efetiva (MLE)

Por décadas, o Método da Largura Efetiva (MLE) tem sido empregado na obtenção de valores para a resistência de barras de perfis formados a frio, sendo considerado um método elementar, pois analisa cada elemento de chapa que compõe a seção transversal do perfil de forma isolada. Inicialmente proposto por Von Karman, Scheler e Donnell (1932) para elementos de chapa isentos de imperfeições iniciais, o MLE foi posteriormente calibrado por Winter (1947) para levar em conta as imperfeições geométricas e de material das chapas reais, por meio de um grande número de ensaios (CARVALHO, et al. 2004).

A equação de Winter (1947), baseada na solução original para o comportamento pós-crítico de placas perfeitas proposta por Von Karman, Sechler e Donnell (1932), é amplamente utilizada nas normas direcionadas ao cálculo estrutural de perfis formados a frio e pode ser encontrada na forma das Equações (28) e (29).

$$b_{ef} = \frac{b\left(1-\frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \leq b \ , \qquad (28)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}}\right)^{0,5} , \qquad (29)$$

Onde:

b é largura do elemento;

b_{ef} é a largura efetiva do elemento de placa;

λ_p é o índice de esbeltez reduzido do elemento;

f_y é a resistência de escoamento do aço;

σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem elástica do elemento.

A equação teórica clássica, representada pela Equação (30) é utilizada para determinar a tensão crítica de flambagem elástica de cada elemento da seção transversal. Esse cálculo é realizado individualmente para cada placa, levando em consideração suas condições de contorno aproximadas e substituindo o elemento de placa atual.

$$\sigma_{cr} = k \ \frac{\pi^2 \ E}{12 \ (1-\upsilon^2)(\frac{b}{t})^2} \qquad , \qquad (30)$$

Onde:

σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem;

E é o modulo de elasticidade do aço;

ν é o coeficiente de Poisson do aço;

t é a espessura do elemento;

k é o coeficiente de flambagem local do elemento.

O Método das Larguras Efetivas (MLE) utilizados neste trabalho está embasado nas prescrições da norma NBR 14762/2010.

2.4.2.2 Método da Seção Efetiva (MSE)

Segundo a NBR 14762:2010, o Método das Seções Efetivas (MSE) é um método de cálculo para seções transversais sujeitas a compressão axial, que considera a redistribuição de tensões devido à flambagem lateral. O MSE utiliza uma seção transversal fictícia, chamada de seção efetiva, que tem a mesma área transversal da seção real, mas com uma distribuição de material diferente que leva em conta a interação entre os elementos da seção. A resistência última da seção é calculada com base na resistência de cada elemento da seção transversal multiplicado pelo seu respectivo coeficiente de segurança.

O método de análise da flambagem local de placas em colunas, que é um método direto de avaliação do estado-limite de resistência última, considera o comportamento real da seção transversal e leva em conta a interação entre as placas, conforme descrito por Batista (2010). Para a aplicação desse método, é possível calcular o valor da seção efetiva (MSE) usando as Equações (31) e (32).

$$\lambda_p = 0{,}776 \; se \; A_{ef} = A$$

$$\lambda_p > 0{,}776 \; se \; A_{ef} = A \left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_P^{0,8}}\right)\frac{1}{\lambda_p^{0,8}}, \quad (31)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_l}\right)^{0,5}, \quad (32)$$

Onde, N_l é a força axial de flambagem local elástica, calculada por meio da Equação

(33), análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, por:

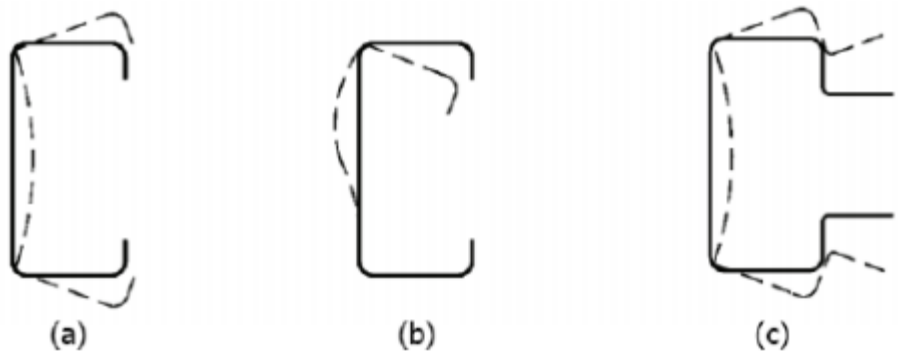
$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12\,(1-\upsilon^2)(\frac{b_w}{t})^2} A\ , \quad (33)$$

Conforme estabelecido na norma NBR 14762:2010, é possível calcular os valores de k_l por meio de equações ou obtê-los em tabelas que correspondem a valores obtidos diretamente da análise geral de estabilidade elástica.

2.4.3 Flambagem Distorcional

Em concordância com a NBR 14762/2010, a flambagem distorcional é caracterizada pela perda de estabilidade na qual ocorrem alterações na seção transversal com deslocamentos de pelo menos um dos vértices, conforme ilustrado na Figura 5. A ocorrência do modo de flambagem distorcional pode ser crítica, dependendo da forma da seção e das dimensões dos elementos, e, portanto, deve ser levado em consideração no dimensionamento.

Figura 5 – Exemplos do comportamento de perfis submetidos à flambagem distorcional



Fonte: NBR 14762:2010.

Os perfis U simples (sem enrijecedores de borda) utilizados como barras isoladas não são suscetíveis à flambagem distorcional, tornando desnecessária a verificação desse fenômeno. No caso de barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem distorcional, o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser realizado por meio da Equação (34), que é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi_{dist} A f_y}{\gamma}\ , \qquad (34)$$

Onde:

$\gamma = 1{,}20$

Onde, X_{dist} é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional, calculado pela Equação (35), por:

$$\lambda \leq 0{,}561 \; se \; \chi_{dist} = 1$$
$$\lambda_{dist} = 0{,}561 \; se \; \chi_{dist} = \left(1 - \frac{0{,}25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right)\frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}}, \qquad (35)$$

onde:

A é a área bruta da seção transversal da barra;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, dado pela Equação (36):

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5}, \qquad (36)$$

onde, N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica.

2.4.4 Método da Resistência Direta

De acordo com Carvalho et al. (2004), o método da resistência direta (MRD) pode ser utilizado como uma alternativa ao método da largura efetiva (MLE) para determinar a resistência à compressão ou flexão de perfis formados a frio. Neste método, a força axial de flambagem elástica correspondente ao modo de falha analisado (global ou local) é obtida por meio de métodos analíticos e/ou numéricos, como o Método dos Elementos Finitos ou o Método das Faixas Finitas.

O MRD é baseado nas propriedades geométricas da seção bruta e em uma análise geral de estabilidade elástica que identifica todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos. Esse método pode ser utilizado como uma alternativa para calcular a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$.

Na NBR 14762:2010 esse método pode ser verificado no Anexo C. A força axial de compressão resistente de cálculo N é dada por $\frac{N_{c,Rk}}{\gamma}$,onde γ é igual a 1,20. O valor de característico para a força axial de compressão resistente, $N_{c,Rk,}$ deve ser determinado como o menor valor obtido para os cálculos de flambagem global ($N_{c,Re}$), local ($N_{c,Rl}$) e distorcional ($N_{c,Rdist}$), que são calculados utilizando as Equações (37) e (38) conforme apresentado a seguir.

a) Flambagem global:

$$\lambda_0 \leq 1{,}5 \; se \; N_{c,Re} = \left(0{,}658^{\lambda_0{}^2}\right) A f_y$$

$$\lambda_0 > 1{,}5 \; se \; N_{c,Re} = \left(\frac{0{,}877}{\lambda_0^2}\right) A f_y, \qquad (37)$$

Onde,

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e}\right)^{0,5}, \qquad (38)$$

b) Flambagem local:

$$\lambda_l \leq 0{,}776 \; se \; N_{c,Rl} = N_{c,Re}$$

$$\lambda_l > 0{,}776 \; se \; N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}}, \qquad (39)$$

Onde,

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_l}\right)^{0,5}, \qquad (40)$$

c) Flambagem distorcional:

$$\lambda_{dist} \leq 0{,}561 \; se \; N_{c,dist} = A f_y$$

$$\lambda_{dist} > 0{,}561 \; se \; N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0{,}25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}, \qquad (41)$$

onde,

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5}, \qquad (42)$$

3 METODOLOGIA

3.1 Concepção Estrutural

3.1.1 Característica do Posto de Combustível

O projeto arquitetônico do posto de combustível do presente trabalho será igualmente aplicável para ambos os dimensionamentos, ou seja, tanto para o uso de perfis formados a frio quanto para os perfis laminados. Este projeto apresentará as seguintes características arquitetônicas:

- Obra: Posto de combustíveis – Posto Vozão;
- Localização: Rodovia BR-226 Km 405 – Bairro São Geraldo – Pau dos Ferros/RN – CEP – 59900-000;
- Dimensões gerais:
  - ✓ Comprimento: 25,00 m
  - ✓ Largura: 12,00 m
  - ✓ Altura: 6,00 m

3.1.2 Lançamento da Estrutura

O projeto estrutural é uma etapa subsequente e complementar ao projeto arquitetônico, que é responsável pela definição da função, composição e características da edificação. A concepção estrutural é iniciada pela análise do projeto arquitetônico, seguida pela seleção do sistema estrutural, análise de cargas e distribuição dos elementos estruturais.

O lançamento da estrutura, ou concepção estrutural, envolve a escolha do sistema estrutural que atua como a parte resistente do edifício, incluindo a seleção dos componentes estruturais e a determinação dos esforços atuantes. A solução estrutural deve cumprir os requisitos arquitetônicos, garantir um desempenho estrutural satisfatório e ser verificada de acordo com as normas aplicáveis.

Para garantir a eficiência e racionalidade na análise do projeto, é necessário estabelecer uma sequência coerente de trabalho. Os princípios que regem o projeto estrutural de uma estrutura metálica devem seguir o seguinte esquema geral:

i. Análise do projeto arquitetônico:
a. Dimensões da construção;
b. Características da construção;
c. Cobertura;

Existem outras considerações importantes que devem ser levadas em conta durante o processo de projeto, como a cota entre o piso acabado e o forro do edifício (pé-direito), composição das alvenarias de vedação, tipo de telha para a cobertura e fechamentos laterais, além das aberturas fixas nas faces frontais e laterais, como portas, janelas e ventilações. É fundamental que todas essas considerações sejam cuidadosamente avaliadas para garantir a segurança, a funcionalidade e a estética da edificação de acordo com as normas e regulamentações aplicáveis.

ii. Características da estrutura
a. Classificação de utilização do edifício;
b. Localização da construção;
c. Normas adotadas;
d. Especificação dos materiais;
e. Cargas básicas, entre outros.

Nesse sentido, é apresentada uma breve descrição da obra acompanhada de um esquema da distribuição estrutural escolhida, que podem ser visualizados nas de Figuras 6 a 8.

iii. Especificações do projeto
a. Tipo de estrutura: Cobertura metálica com calha central para posto de combustível;
b. Vãos em balanço no eixo da linha de pilares: 5,00 metros;
c. Vãos entre os pilares: 7,50 metros;
d. Vãos em balanço entre pilar e aba da cobertura: 6,00 metros;
e. Normas adotadas: NBR 6120 – Ações para cálculos de estruturas de edificações;
NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações;

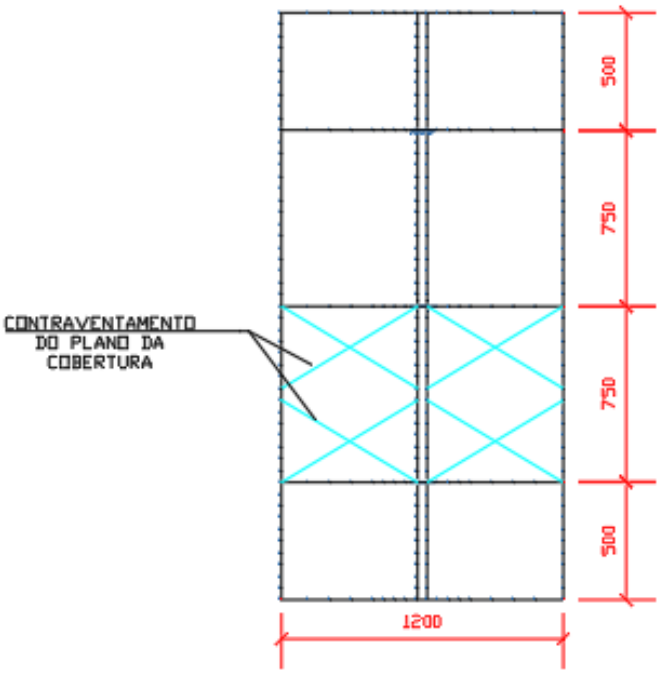
NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;

NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio;

NBR 6355 – Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização;

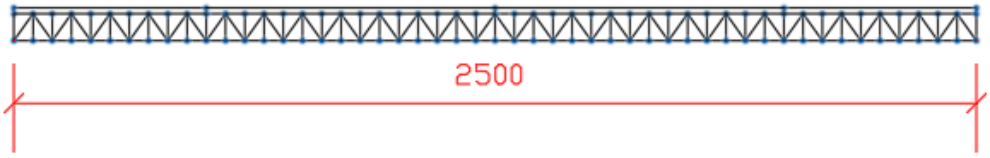
NBR 15980:2011 – Perfis laminados de aço para uso estrutural – Dimensões e tolerâncias.

Figura 6 – Plano de cobertura



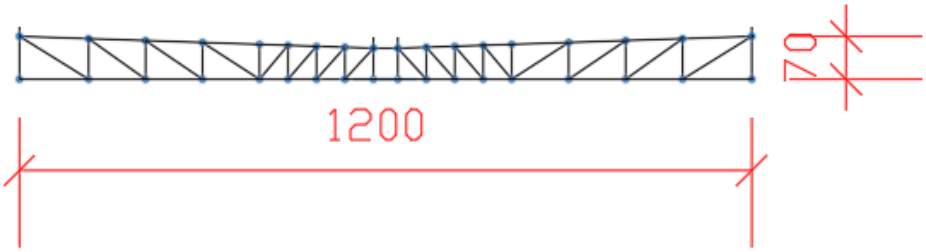
Fonte: Autor, (2023).

Figura 7 – Vista lateral da cobertura



Fonte: Autor, (2023).

Figura 8 – Vista frontal da cobertura



Fonte: Autor, (2023).

Com base nas medidas tomadas até o momento, foram desenvolvidos dois modelos analíticos em conformidade com o modelo arquitetônico. O modelo 1 consiste de perfis conformados a frio, enquanto o modelo 2 é composto por perfis laminados.

Por fim, a fim de permitir que o CYPE Metálicas 3D 2019 execute os cálculos de verificação requeridos, as conexões entre as barras foram designadas como rotuladas, enquanto as conexões entre as treliças e pilares foram consideradas como rígidas.

Cumpre salientar que elementos como terças e contraventamentos horizontais compostos por tirantes foram empregados para a determinação dos comprimentos de flambagem e para a distribuição uniforme das cargas nas treliças, respectivamente. Todavia, tais elementos não foram considerados no cálculo final do consumo da estrutura. No caso dos perfis laminados, apenas as treliças e vigas foram consideradas para a análise de consumo.

3.2 Carregamentos

De acordo com Pfeil e Pfeil (2022), o levantamento de cargas em uma cobertura metálica é uma etapa crucial do projeto estrutural, que consiste em determinar as cargas atuantes sobre a estrutura e dimensionar seus elementos de acordo com essas cargas. As cargas podem ser permanentes, como o peso próprio da estrutura, das telhas e dos equipamentos fixos, ou variáveis, como a carga de vento, de neve ou de pessoas em circulação na cobertura.

Para realizar o levantamento de cargas em uma cobertura metálica, é necessário conhecer as características do local em que a estrutura será instalada, como a região geográfica, a topografia, a velocidade do vento e a incidência de chuva e neve. A partir dessas informações, é possível calcular as cargas atuantes sobre a estrutura, considerando as normas e regulamentações técnicas aplicáveis.

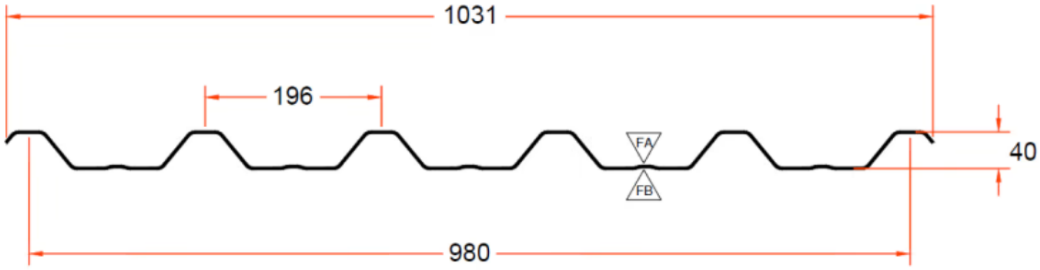
Com base nas cargas calculadas, é possível dimensionar os elementos da estrutura, como as treliças, os perfis metálicos, os contraventamentos e as ligações, de forma a garantir a segurança e estabilidade da cobertura metálica. É importante ressaltar que o levantamento de cargas em uma cobertura metálica deve ser realizado por profissionais capacitados e experientes, que utilizem ferramentas e softwares adequados para garantir a precisão e confiabilidade dos cálculos.

3.2.1 Cargas permanentes

De acordo com a NBR 6120:2019, as cargas permanentes são definidas como as cargas que atuam de forma constante e duradoura sobre a estrutura ao longo do tempo, sem sofrer variações significativas. Essas cargas podem ser classificadas em duas categorias: cargas permanentes de estrutura e cargas permanentes de acabamento.

As informações relativas à resistência e peso das telhas utilizadas são obtidas a partir dos catálogos dos fabricantes. No presente projeto, serão empregadas telhas trapezoidais de aço galvanizado com altura total de 40 mm, espessura de 0,50 mm e peso de 0,04 kN/m². É imprescindível observar as especificações fornecidas pelo fabricante em relação aos vãos das telhas, ou seja, os espaçamentos entre as terças, que deverão ser de 980 mm, conforme apresenta a Figura 9.

Figura 9 – Telha Trapezoidal LR 40



Fonte: ArcelorMittal, 2023.

O cálculo do peso próprio dos elementos estruturais será realizado pelo programa utilizado para a análise estrutural, que neste caso será o CYPE 2019.

3.2.2 Sobrecarga na cobertura

Em casos de coberturas comuns, em que não há especificações mais rigorosas, a norma NBR 8800:2008 (ABNT 2008), em seu anexo B, item B.5, estabelece uma sobrecarga mínima de 0,25 kN/m² em projeção horizontal. Esta sobrecarga deve incluir as cargas provenientes das instalações elétricas e hidráulicas, isolamento térmico e acústico, bem como pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura, com um limite de 0,05 kN/m².

3.2.3 Ação do vento na estrutura

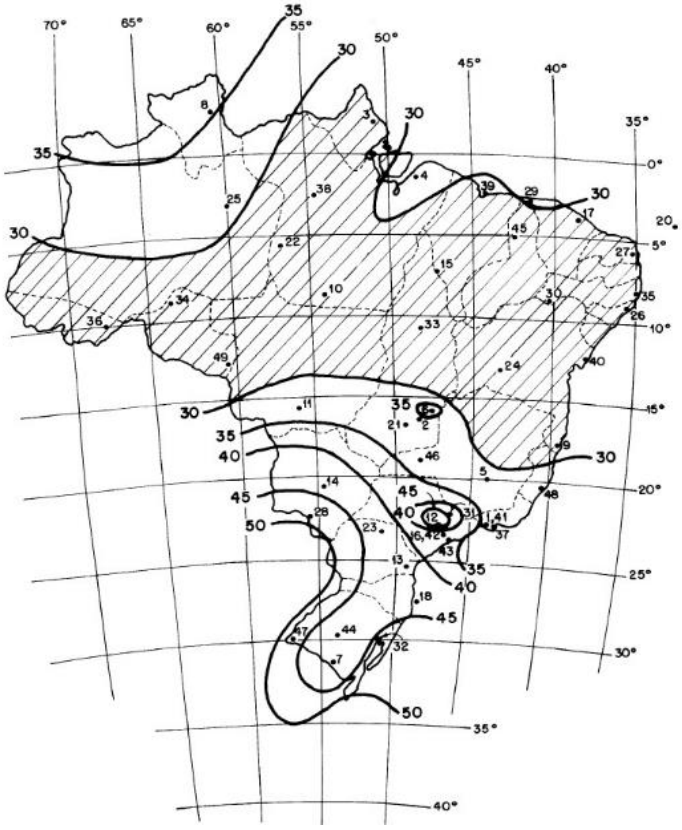
A norma ABNT NBR 6123:1988 estabelece as diretrizes para o dimensionamento de estruturas de edifícios e outras estruturas sujeitas a ações do vento. Em relação às coberturas

metálicas, a norma estabelece que as cargas do vento devem ser calculadas de acordo com a velocidade do vento na região em que a obra será construída, a altura do telhado, a rugosidade do terreno e outros fatores específicos da região. A norma também estabelece coeficientes de pressão para diferentes regiões do telhado, como cumeeiras, beirais e superfícies inclinadas. A partir desses coeficientes, é possível calcular as cargas de vento que atuam sobre a cobertura metálica e projetar a estrutura para resistir a essas cargas.

3.2.3.1 Velocidade básica do vento (V_0)

Segundo a NBR 6123:1988, a velocidade básica do vento é a velocidade de uma rajada de três segundos de duração, a dez metros de altura, em campo aberto e plano, ultrapassada, em média, uma vez em 50 anos. Essa norma estabelece mapas de isopletas para identificar a velocidade básica do vento em diferentes regiões do país. A velocidade básica do vento varia de acordo com a localização geográfica e as características da região. A Figura 10 apresentada a seguir mostra o referido mapa de isopletas presente na NBR 6123:1988, para o projeto em estudo, a velocidade básica do vento conforme a NBR 6123:1988 é de 30 m/s.

Figura 10 – Mapa de isopletas de velocidade básica do vento



Fonte: ABNT, 1988.

3.2.3.2 Fator topográfico (S_1)

A fator topográfico S_1 é utilizado para levar em consideração as variações do relevo do terreno, apresentando características próprias para algumas diversidades, e considerando o aumento ou diminuição da velocidade do vento em função da topografia do terreno. Caso seja necessário obter um conhecimento mais preciso da influência do relevo, ou se a aplicação das indicações da NBR 6123 tornar-se difícil pela complexidade do relevo, é recomendado o recurso a ensaios de modelos topográficos em túnel de vento ou a medidas anemométricas no próprio terreno.

Considerando as características topográficas e caracterização da vizinhança do projeto, será adotado o fator topográfico S_1 = 1,00.

3.2.3.3 Fator de rugosidade (S_2)

O fator de rugosidade de terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S2) é determinado de acordo com a norma NBR 6123:1988. Para a presente edificação, o terreno é classificado como Categoria II, o que significa que é aberto em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, como árvores e edificações baixas. Quanto às dimensões da edificação, ela se enquadra na Classe A, que se refere a todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação, em que a maior dimensão horizontal ou vertical não excede 20 m.

O fator S2 utilizado na determinação da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido por meio da Equação 43.

$$S_2 = b \,.F_r \,.(\frac{z}{10})^p \,, \qquad (43)$$

Onde, os parâmetros meteorológicos utilizados para alimentar a equação são obtidos através da Figura 11.

Figura 11 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT, 1988.

Adotando os valores de acordo com as características do projeto e com a tabela anteriormente apresentada, tem-se que:

$$S_2 = 1{,}00.\,1{,}00.\,(\frac{6}{10})^{0{,}085} = 0{,}96$$

3.2.3.4 Fator estatístico (S_3)

O fator S_3 é um parâmetro baseado em conceitos estatísticos que leva em consideração o grau de segurança requerido à vida útil da edificação. De acordo com a norma NBR 6123:1988, a vida útil da edificação é definida como um período de cinquenta anos, com uma probabilidade de 63% de a velocidade do vento ser excedida pelo menos uma vez durante esse período.

De acordo com o Figura 12 da NBR 6123:1988, trata-se de uma edificação com baixo fator de ocupação, pertencente ao Grupo 3.

Figura 12 – Valores mínimos do fator estatístico S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT, 1988.

3.2.3.5 Velocidade característica do vento (V_k) e pressão dinâmica do vento (q)

A velocidade do vento característica foi obtida pela Equação 44, sendo:

$$V_k = V_0 . S_1 . S_2 . S_3 = 27{,}36 \frac{m}{s}, \qquad (44)$$

Conhecido o valor da velocidade característica do vento, foi calculada a pressão dinâmica do vento, expressa pela Equação (45).

$$q = 0{,}613 \, . V_k = 0{,}46 \, \frac{kN}{m^2}, \quad (45)$$

3.2.3.6 Coeficientes aerodinâmicos

Após a determinação dos esforços decorrentes da pressão do vento, torna-se necessário estabelecer a forma como o vento atua na edificação. De acordo com a norma NBR 6123/1988, tais esforços são representados por meio de coeficientes aerodinâmicos, os quais são divididos em Coeficientes de pressão e de forma externos (Cpe) e Coeficientes de pressão interna (Cpi). Para o presente caso, os valores desses coeficientes serão estabelecidos de acordo com o item 8 da mencionada norma, que trata dos Coeficientes de forças para muros, placas e coberturas isoladas.

No caso em que a altura h seja inferior ao limite previamente estabelecido ou quando obstruções são dispostas sob ou em torno da cobertura, a estrutura deve resistir à ação do vento na zona de obstrução, calculada para uma edificação fechada e com cobertura igual, com Coeficiente de Pressão Interna (Cpi) igual a + 0,8 para obstruções localizadas na borda de sotavento e Cpi igual a -0,3 para obstruções localizadas na borda de barlavento.

De acordo com a tabela 32 do Anexo F da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), considerando as características geométricas da construção, foi obtido que os coeficientes de pressão e de forma externos para coberturas com duas águas simétricas, de calha central, em edificações de planta retangular, foram adotados valores aproximados, de acordo com a Figura 13.

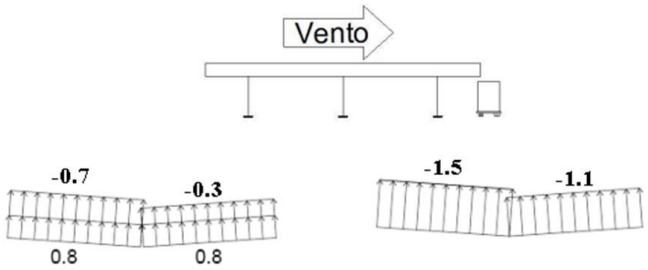
Figura 13 – Coeficientes de pressão e forma adotados

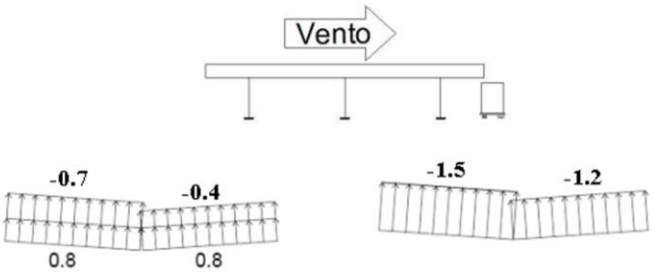
h/b	a/b	h'_p/h	C_e			
			$\alpha = 90°$		$\alpha = 0°$	
			EF	GH	EG	FH
0,5	1	0,05	-0,6	-0,2	-0,7	-0,1
		0,1 a 0,2	-0,7	-0,4	-0,7	-0,3
	2	0,05	-0,8	-0,3	-0,4	+0,2
		0,1 a 0,2	-0,8	-0,5	-0,5	+0,2

Fonte: Autor (2023).

Conhecidos os valores dos coeficientes de pressão e de forma, foi mensurado os carregamentos provenientes das ações do vento incidentes à barlavento e à sotavento com ângulos de 0° e 90°, como mostra as Figuras 14 e 15.

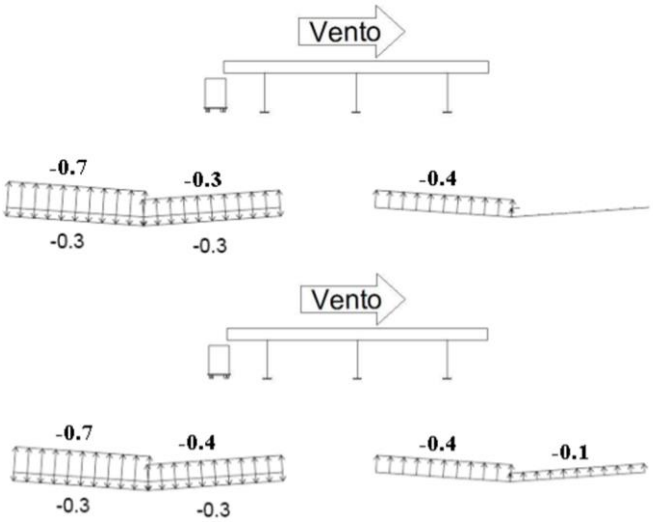
Figura 14 – Carregamento devido à ação do vento à sotavento com ângulo de 0° e 90°, respectivamente





Fonte: Autor (2023).

Figura 15 – Carregamento devido à ação do vento à barlavento com ângulo de 0° e 90°, respectivamente



Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados obtidos anteriormente, constatou-se que a ação do vento na região de sotavento é mais crítica para a segurança da estrutura. Portanto, para fins de dimensionamento adequado, adotou-se o coeficiente de pressão Cp = 1,5.

3.2.4 Combinação de Ações

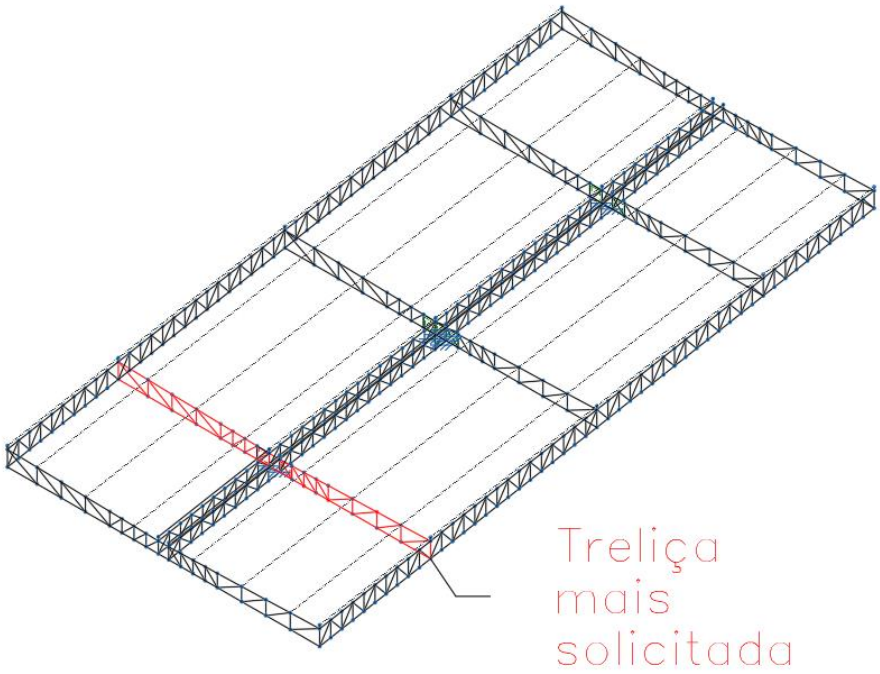
O software utilizado para o dimensionamento, CYPE METÁLICAS 3D (2019), gera diversas combinações de ações para a verificação da estrutura, levando em conta tanto as condições de Estado Limite Último (ELU). No tópico resultados deste trabalho, serão apresentadas as combinações mais desfavoráveis identificadas em cada elemento verificado, seguindo as normas pertinentes atualizadas (NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço formadas por perfis a frio e NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto para edifícios).

3.3 Dimensionamento com uso de Perfis Formados a Frio

Os esforços solicitantes foram determinados por meio do software CYPE METÁLICAS 3D (2019). Com base no processamento global da estrutura, o software gerou o memorial de cálculo em conformidade com as normas aplicáveis. A seguir, serão apresentados os resultados do dimensionamento das barras mais solicitadas de cada componente estrutural da treliça apoiada no pilar central, (montantes, diagonais, banzo superior, banzo inferior e terças). O memorial de cálculo detalhado de cada barra mencionada neste tópico pode ser consultado nos ANEXOS A ao E, respectivamente.

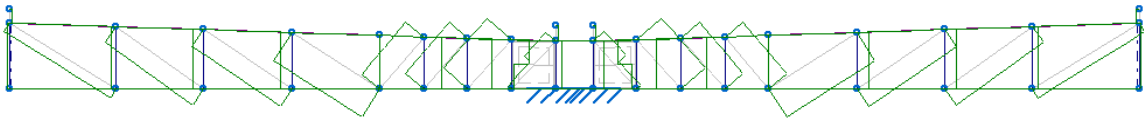
Diante da dificuldade da apresentação de diagramas de esforços através de imagens em 3D devido a poluição visual, será apresentado o caminho sistemático através de uma sequência de imagens onde o objetivo é representar em 2D a treliça com esforços mais desfavoráveis. A Figura 16 indica a visualização global da cobertura isolada, indicando a treliça da Figura 17. A Figura 18 mostra as barras solicitadas axialmente por grupo.

Figura 16 – Representação global da cobertura isolada indicando a treliça verificada



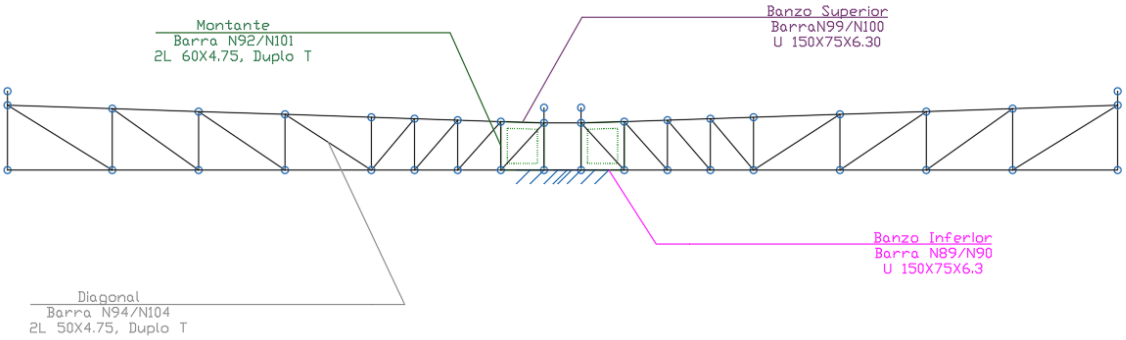
Fonte: Autor (2023).

Figura 17 – Exemplo de esforços axiais na treliça



Fonte: Autor (2023).

Figura 18 – Indicação das barras mais solicitadas axialmente (por grupo).



Fonte: Autor (2023).

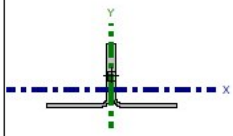
A verificação dos elementos previamente mencionados foi executada por meio do software CYPE METÁLICAS 3D (2019), em conformidade com os requisitos especificados pela norma ABNT NBR 14762:2010. Os resultados serão analisados individualmente para os elementos que apresentaram maior carga estrutural, a fim de compará-los com os parâmetros estabelecidos pela referida norma. As seções críticas dos elementos de cada grupo são apresentadas nas Figuras 18 a 22.

3.3.1 Montantes

A Figura 18 mostra um resumo das características da seção crítica dos montantes para perfil duplo T.

Figura 18 – Resumo das características da seção crítica dos montantes

Perfil: L 60x4.75, Duplo T união soldada (Cordão descontínuo)
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N92	N101	0.538	10.55	36.84	68.74	0.79	0.00	-12.61

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.538	0.538	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para a combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{t,Sd}$ = 25,20 kN.

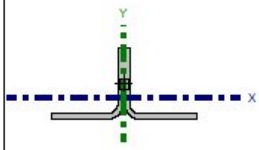
A força normal resistente de tração $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{t,Rd} = \frac{A\,f_y}{\gamma}$$

Deste modo, tem-se que $N_{t,Rd}$ = 119,92 kN.

3.3.2 Diagonais

Figura 19 – Resumo das características da seção crítica das diagonais



Perfil: L 50x4.75, Duplo T união soldada (Cordão descontínuo)
Material: Aço (A-36)

Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N94	N104	1.110	8.65	20.64	39.87	0.65	0.00	-10.09

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	1.110	1.110	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para a combinação de ações 1,25 PP + 1,25 Telhado Metálico + 1.5 SobrecargaNormativa é de $N_{t,Sd}$ = 34,41 kN.

A força normal resistente de tração $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{t,Rd} = \frac{A\, f_y}{\gamma}$$

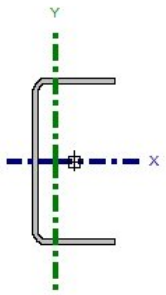
Deste modo, tem-se que $N_{t,Rd}$ = 98,32 kN.

3.3.3 Banzo superior

A Figura 20 mostra o resumo das características da seção crítica do banzo superior.

Figura 20 – Resumo das características da seção crítica do banzo superior

Perfil: U150X75X6.30
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N99	N100	0.467	17.58	594.88	95.32	2.33	-15.80	0.00

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavorável produzidos na barra, para a combinação de hipóteses PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é dado abaixo e deve satisfazer a relação:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} = \leq 1{,}00 = 0{,}946$$

Onde:

i. Resistência à compressão

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{c,Sd}$ = 249,02 kN.

Pela equação (18), $N_{c,Rd}$ = 335,99 kN.

ii. Fator de flambagem global X

O fator de redução associado à flambagem X, pode ser obtido pela equação (19), e é igual a 1,00.

iii. Índice de esbeltez reduzido λ_0

Pela equação (21), tem-se que λ_0 = 0,10.

iv. Força normal de flambagem elástica N_e

A força de flambagem elástica deve ser tomada como o menor valor entre N_{ey} e N_{exz}, sendo N_{ey} o menor valor e igual a 2129,49 kN, obtido através da equação (23).

v. Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não foi executada devido ausência ou grandeza de valor mínimo comparado aos outros esforços solicitantes.

vi. Resistência à flexão no eixo y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

O momento fletor solicitante desfavorável produz-se na barra para a combinação de hipóteses PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda, onde M_{Sd} = 0,82 kN.m.

O momento fletor resistente de cálculo é igual a M_{Rd} = 4,06 kN.m, foi obtido através da equação:

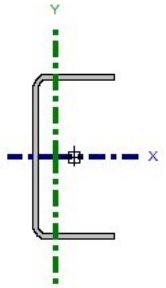
$$M_{Rd} = \frac{W_{ef}\ f_y}{\gamma}, \qquad (46)$$

Sendo W_{ef} o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme o artigo 9.2 da NBR 14762:2010, σ calculada para o estado de limite último de escoamento da seção.

3.3.4 Banzo inferior

Figura 21 – Resumo das características da seção crítica do banzo inferior

Perfil: U150X75X6.30
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N90	N107	0.467	17.58	594.88	95.32	2.33	-15.80	0.00

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à flexo-torção

Os esforços solicitantes de cálculo desfavorável produzidos na barra, para a combinação de hipóteses PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é dado abaixo e deve satisfazer a relação:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1{,}00 = 0{,}986$$

i. Força normal de tração resistente de cálculo

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para a combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.5 SobrecargaNormativa é de $N_{t,Sd}$ = 254,36 kN. A força normal resistente de tração $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g\ f_y}{\gamma}$$

Deste modo, tem-se que $N_{t,Rd}$ = 399,62 kN.

ii. Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não foi executada devido ausência ou grandeza de valor mínimo comparado aos outros esforços solicitantes.

iii. Resistência à flexão no eixo y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

O momento fletor solicitante desfavorável produz-se na barra para a combinação de hipóteses PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda, onde M_{Sd} = 1,42 kN.m.

O momento fletor resistente de cálculo é igual a M_{Rd} = 4,06 kN.m, foi obtido através da equação:

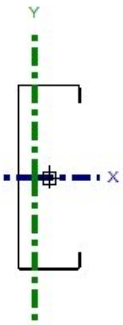
$$M_{Rd} = \frac{W_{ef}\ f_y}{\gamma}, \qquad (46)$$

Sendo W_{ef} o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme o artigo 9.2 da NBR 14762:2010, σ calculada para o estado de limite último de escoamento da seção.

3.3.5 Terças

Figura 22 – Resumo das características da seção crítica das terças

Perfil: C250X85X25X2.66
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N11	N43	7.500	12.03	1134.61	114.47	0.28	-18.20	0.00

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.50	0.50
L_K	7.500	7.500	3.750	3.750
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a) Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2.1)

O momento fletor solicitante de cálculo desfavorável M_{Sd} para a combinação e hipóteses PP + TelhadoMetálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de 15,25 kN.m, e foi tomado como o menor valor entre (i), (ii) e (iii):

i. Início de escoamento da seção efetiva (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2.1)
Pela equação (46), M_{Rd} = 20,63 kN.m, sendo:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef}\ f_y}{\gamma}$$

onde, W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2 da ABNT NBR 14762:2010.

ii. Flambagem lateral com torção (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2.1)

Para seções duplamente simétricas ou monossimétricas o momento fletor de flambagem lateral com torção é dado por:

$$M_e = C_b\ .r_0\ .(N_{ey}\ .N_{ez})^{0,5}$$

Onde C_b é um coeficiente de equivalência de momento na flexão, tomado como C_b = 1,0. Deste modo, tem-se que M_e = 18,88 kN.m.

- Índice de esbeltez reduzido λ_0

O índice de esbeltez reduzido é dado pela equação:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_x\ .f_y}{M_{ex}}}$$

Logo, tem-se que λ_0 = 0,10.

- Fator de redução associado à flambagem lateral com torção X_{FLT}

O fator redução de flambagem lateral com torção é definido por:

$$Se\ \lambda_0\ \leq 0{,}6\ \chi_{FLT} = 1$$

$$Se\ 0{,}6\ \leq\ \lambda_0\ \leq 1{,}336\ \chi_{FLT} = 1{,}11\ .(1 - 0{,}278\lambda_0^2)$$

$$Se\ \lambda_0\ \geq\ 1{,}336\ \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2}$$

Logo, obtém-se que λ_0 = 0,74.

iii. Flambagem por distorção (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2.3)

A flambagem por distorção é dado pela equação:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist}\ .\ W\ f_y}{\gamma}$$

Onde W é o módulo resistente elástico da seção bruta em relação a fibra extrema com maior tensão. Deste modo, M_{Rd} = 15,84 kN.m.

- Índice de esbeltez reduzida associada à flambagem por distorção λ_{dist}

O índice de esbeltez reduzida associada a flambagem por torção é dada por:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W\ .f_y}{M_{dist}}}$$

Onde W é o módulo resistente elástico da seção bruta em relação a fibra extrema com maior tensão. Deste modo, λ_{dist} = 1,02.

- Momento fletor de flambagem por distorção elástica M_{dist}

Para esta verificação foi aplicado o critério da norma AISI S100-07 (2007), devido a inexistência da formulação necessária pela ABNT NBR 14762:2010. Desta forma, M_{dist} é dado por:

$$M_{dist} = W\ .k_d\ .\frac{\pi^2\ .E}{12\ .(1 -\ \upsilon^2)}\ .(\frac{t}{b_t})^2$$

Onde k_d é o coeficiente de flambagem por distorção. Deste modo, M_{dist} = 21,74 kN.m.

- Coeficiente de flambagem por distorção k_d

O coeficiente de flambagem por distorção é dado por:

$$k_d = 0{,}5\ \leq 0{,}6.\ \left(\frac{b_t\ .D}{b_w\ .\ t}\right)^{0{,}7}\ \leq\ 8{,}0$$

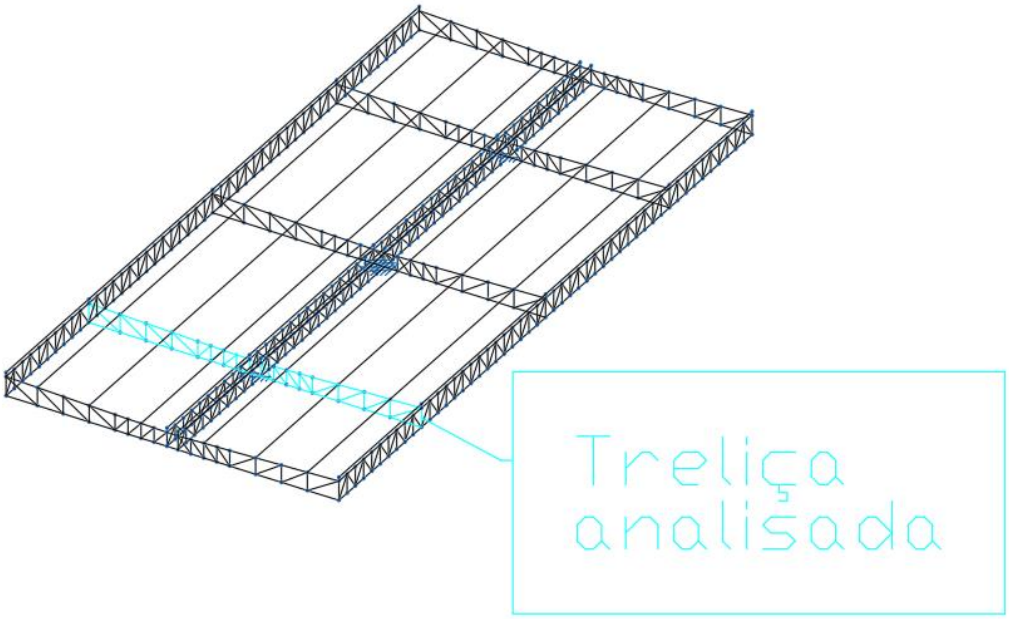
Logo, tem-se que k_d = 1,35.

3.4 Dimensionamento com uso de Perfis Laminados

Com o intuito de manter a linearidade nos resultados deste trabalho, o dimensionamento da cobertura isolada também foi realizado com o auxílio do software CYPE METÁLICAS 3D para os perfis, mantendo as seções dos perfis utilizados no dimensionamento com o uso de Perfis Formados a Frio. A verificação dos perfis submetidos às combinações de ações foi realizada com base nas diretrizes estabelecidas na norma NBR 8800:2008. A Figura 23 indica a visualização global da cobertura isolada, indicando a treliça da Figura 24. O dimensionamento das terças será apresentado posteriormente, a seção crítica deste elemento pode ser conferida na Figura 25.

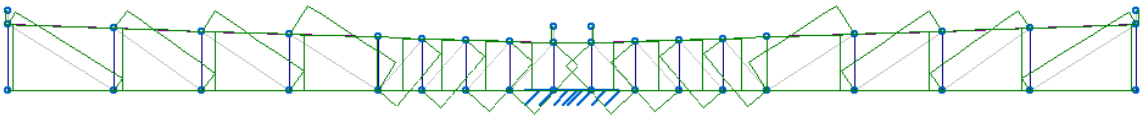
O memorial de cálculo detalhado de cada barra mencionada neste tópico pode ser consultado nos ANEXOS F ao J, respectivamente.

Figura 23 – Representação global da cobertura isolada com indicação da treliça verificada



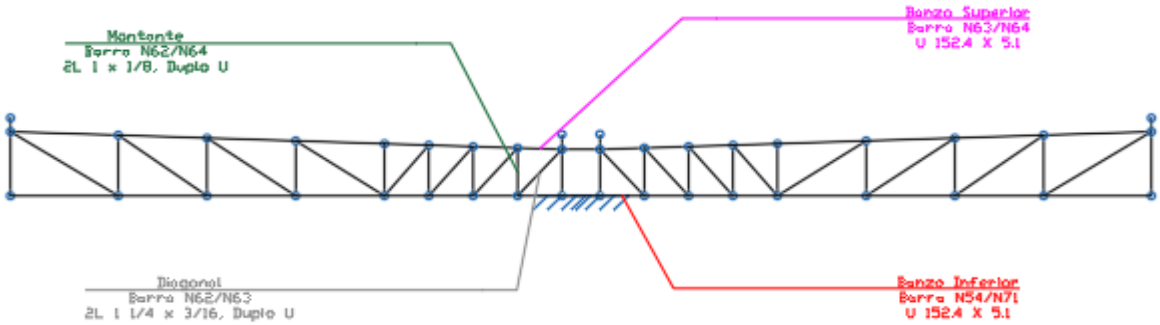
Fonte: Autor (2023).

Figura 24 – Exemplo de esforços axiais na treliça



Fonte: Autor (2023).

Figura 25 - Indicação das barras mais solicitadas axialmente (por grupo)



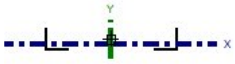
Fonte: Autor (2023).

A verificação dos elementos previamente mencionados foi executada por meio do software CYPE METÁLICAS 3D (2019), em conformidade com os requisitos especificados pela norma ABNT NBR 8800:2008. Os resultados serão analisados individualmente para os elementos que apresentaram maior carga estrutural, a fim de compará-los com os parâmetros estabelecidos pela referida norma. As seções críticas dos elementos de cada grupo são apresentadas nas figuras 26 a 30.

3.4.1 Montantes

Figura 26 – Resumo das características da seção crítica dos montantes

Perfil: L 1 X 1/8, Duplo U união genérica (Distância entre os perfis: 90.0 / 90.0 mm e Perfis independentes)
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N62	N64	0.522	3.06	1.82	122.89	0.10	0.00	-5.20

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.522	0.522	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a) Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para a combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{t,Sd}$ = 24,50 kN.

A força normal resistente de tração $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

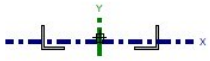
$$N_{t,Rd} = \frac{A_g\, f_y}{\gamma_{a1}}$$

Deste modo, tem-se que $N_{t,Rd}$ = 37,44 kN.

3.4.2 Diagonais

Figura 27 – Resumo das características da seção crítica das diagonais

Perfil: L 1 1/4 X 3/16, Duplo U união genérica (Distância entre os perfis: 90.0 / 90.0 mm e Ligação à distância máxima)
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	$I_x^{(1)}$ (cm4)	$I_y^{(1)}$ (cm4)	$I_t^{(2)}$ (cm4)	$x_g^{(3)}$ (mm)	$y_g^{(3)}$ (mm)
N62	N63	0.689	5.74	5.26	265.24	0.43	0.00	-6.30

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.689	0.689	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à compressão

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{c,Sd}$ = 33,26 kN.

Pela equação (18), $N_{c,Rd}$ = 49,57 kN.onde:

i. Fator de redução total associado à resistência à compressão X

A flambagem X, segundo o artigo 5.3.3 da ABNT NBR 8800:2008 é de 0,760, dado pela equação:

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0{,}658^{\lambda_0^2}$$

ii. Índice de esbeltez reduzido λ_0

Pela equação (21), tem-se que λ_0 = 0,810.

iii. Força axial de flambagem elástica N_e

A força axial de flambagem elástica, N_e, obtida pelo Anexo E da ABNT 8800:2008 é de 109,41 kN e recebe o menor valor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$(N_e - N_{ex}).(N_e - N_{ey}).(N_e - N_{ez}) - N_e^2.(N_e - N_{ey}).\left(\frac{x_0}{r_0}\right)^2$$

$$- N_e^2.(N_e - N_{ex}).\left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 = 0$$

onde, N_{ex} = 109,41 kN, N_{ey} = 5191,41 kN.

iv. Flambagem local de barras axialmente comprimidas (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que os elementos da seção transversal possuem relação entre largura e espessura (b/t) que não satisfaçam as seguintes relações:

$$\frac{b}{t} \leq (\frac{b}{t})_{lim}$$

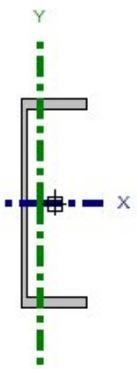
Mesa: Elemento do Grupo 3, conforme a Tabela F .1. do Anexo F presente na NBR 8800:2008, sendo (b/t) = 6,72 mm e $(b/t)_{lim}$ = 12,73 mm, onde:

$$(\frac{b}{t})_{lim} = 0{,}45.\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

3.4.3 Banzo superior

Figura 28 – Resumo das características da seção crítica do banzo superior

Perfil: U 152.4 x 5.1
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N63	N64	0.467	15.50	546.00	28.80	2.74	-9.78	0.00

Notas:
(1) Inércia em relação ao eixo indicado
(2) Momento de inércia à torção uniforme
(3) Coordenadas do centro de gravidade

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a. Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{c,Sd}$ = 229,79 kN.

Pela equação (18), $N_{c,Rd}$ = 273,78 kN.

Onde:

i. Fator de redução total associado à resistência à compressão X

O fator de redução associado à flambagem X, segundo o artigo 5.3.3 da ABNT NBR 8800:2008 é de 0,777, dado pela equação:

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0{,}658^{\lambda_0^2}$$

ii. Índice de esbeltez reduzido λ_0

Pela equação (21), tem-se que λ_0 = 0,776.

iii. Força axial de flambagem elástica N_e

A força axial de flambagem elástica, N_e = 643,38 kN, foi obtida através do menor valor entre os pontos seguintes, para seções monossimétricas conforme o Anexo E da NBR 8800:2008.

- Para flambagem em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal, pela equação (23) tem-se N_{ey} = 643,38 kN.

- Para flambagem por flexo-torção $N_{ex,z}$ = 43110,43 kN, dado pela equação:

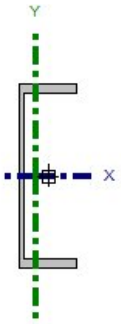
$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2.[1 - (\frac{x_0}{r_0})^2} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4.N_{ex}.N_{ez}.[1 - (\frac{x_0}{r_0})^2}{(N_{ex} + N_{ez})^2}}\right]$$

Onde, N_{ex} = 43110,43 kN, obtido pela equação (22).

3.4.4 Banzo inferior

Figura 29 – Resumo das características da seção crítica do banzo inferior

Perfil: U 152.4 x 5.1
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N54	N71	0.467	15.50	546.00	28.80	2.74	-9.78	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

a) Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produzido na barra, para a combinação de ações PP + Telhado Metálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de $N_{t,Sd}$ = 274,72 kN.

A força normal resistente de tração $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

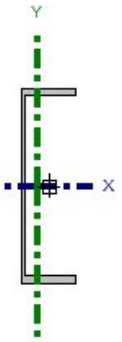
$$N_{t,Rd} = \frac{A_g\, f_y}{\gamma_{a1}}$$

Deste modo, tem-se que $N_{t,Rd}$ = 352,27 kN.

3.4.5 Terças

Figura 30 – Resumo das características da seção crítica das terças

Perfil: U 203.2 x 5.6
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N11	N43	7.500	21.68	1344.30	54.10	4.36	-12.59	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.50	0.50
L_K	7.500	7.500	3.750	3.750
C_b	-		1.000	

Notação:
β: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Fonte: Autor (2023).

b) Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

O momento fletor solicitante de cálculo desfavorável M_{Sd} para a combinação e hipóteses PP + TelhadoMetálico + 1.4 VentoSotavento90°esquerda é de 12,20 kN.m

- Índice de esbeltez λ

O índice de esbeltez, pelo Anexo G da ABNT NBR 8800:2008, é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

Onde h é a altura da alma, tomada igual a distância entre as faces internas da mesa e t_w é a espessura da alma. Desta forma, λ = 32,89. Assim, considera-se uma viga não-esbelta.

- Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas λ_r

O parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas é dado por:

$$\lambda_r = 5{,}70 \,.\, \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Logo, tem-se que λ_r = 161,22.

- Momento fletor resistente de cálculo M_{Rd}

O momento fletor resistente de cálculo para vigas não esbeltas dever ser tomado como o menor valor entre (i), (ii), (iii) e (iv).

i. Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2)

O máximo momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd} = \frac{1{,}50\ .W\ .f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde, W é o módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão, sendo assim, $W = W_x = 132{,}31\ cm^2$. Desta forma $M_{Rd} = 15{,}78$ kN.m.

ii. Estado limite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G)

O estado limite último de flambagem lateral com torção onde $\lambda > \lambda_r$, é dado por:

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

- Índice de esbeltez

O índice de esbeltez λ é o parâmetro de esbeltez dado por:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

Sendo, a distância entre pontos destravados $L_b = 3{,}75$m e o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão $r_y = 1{,}58$. Desta forma, $\lambda = 237{,}39$.

- Parâmetro de esbeltez reduzido para seções semicompactas λ_r

O parâmetro de esbeltez reduzido para seções semicompactas λ_r é dado por:

$$\lambda_r = \frac{1{,}38\ .\sqrt{I_y\ .J}}{r_y\ .J\ .\beta_1}\ .\sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27\ .C_w\ .B_1^2}{I_y}}}$$

Onde, o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y I_y = 54,10 cm^4, a constante de torção da seção transversal J = 4,36 cm^4, β_1 = 0,027 cm^{-1} e a constante de empenamento da seção transversal C_w = 4359,75 cm^6. Desta forma λ_r = 186,56.

- Momento crítico elástico à flambagem lateral com torção M_{cr}

O momento crítico elástico à flambagem lateral com torção é dado por:

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

Onde, o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme C_b = 1,00. Desta forma, M_{cr} = 17,36 kN.m.

- Momento resistente de plastificação da seção M_{pl}

O momento resistente de plastificação da seção é dado por:

$$M_{pl} = Z_x \,.f_y$$

Onde, o módulo de resistência plástico da seção Z_x = 153,13 cm^3. Desta forma, M_{pl} = 38,28 kN. Tem-se então que, M_{Rd} = 15,78 kN.

iii. Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G)

Para vigas compactas, onde $\lambda \leq \lambda_{pl}$, o momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é dado por:

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

- Índice de esbeltez λ

O índice de esbeltez é dado por:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$

Onde, a largura da mesa comprimida b_f é de 57,40 mm e a espessura da mesa comprimida t_f = 9,50 mm. Desta forma, λ = 6,04.

- Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas λ_r

O parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas é dado por:

$$\lambda_p = 0{,}38 \,.\, \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Deste modo, tem-se que λ_p = 10,75.

- Momento resistente de plastificação da seção M_{pl}

O momento resistente de plastificação da seção é dado por:

$$M_{pl} = Z_x \,.\, f_y$$

Onde, o módulo de resistência plástico da seção Z_x = 153,13 cm³. Desta forma, M_{pl} = 38,28 kN.

iv. Estado limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G)

Para vigas compactas, onde $\lambda \leq \lambda_{pl}$, o momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é dado por:

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

- Índice de esbeltez λ

O índice de esbeltez é dado por:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$

Onde, a largura da mesa comprimida b_f é de 57,40 mm e a espessura da mesa comprimida t_f = 9,50 mm. Desta forma, λ = 6,04.

- Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas λ_r

O parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas é dado por:

$$\lambda_p = 0{,}38 \,.\, \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Deste modo, tem-se que λ_p = 10,75.

- Momento resistente de plastificação da seção M_{pl}

O momento resistente de plastificação da seção é dado por:

$$M_{pl} = Z_x \,.\, f_y$$

Onde, o módulo de resistência plástico da seção Z_x = 153,13 cm³. Desta forma, M_{pl} = 38,28 kN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante dos cálculos realizados para o dimensionamento da cobertura isolada proposta neste trabalho, foi possível a obtenção de resultados coerentes quanto ao uso distinto em cada projeto. Como já citado, buscou-se manter as seções designadas para cada componente estrutural, ainda que, por questões executivas, no caso de seções compostas, a disposição entre elas não fosse a mesma, por exemplo o uso de seções formadas por dupla cantoneira.

Em linhas gerais, tornou-se viável realizar a mensuração do consumo de aço nesse tipo de estrutura. As figuras 31 e 32 apresentam as tabelas de resumo fornecidas pelo software CYPE Metálicas 3D em relação ao consumo de aço na estrutura. Conforme evidenciado pelos dados, há um consumo de aço cerca de 42% maior no caso dos perfis laminados em comparação aos perfis conformados a frio, totalizando uma diferença de 2843,69 kg.

Figura 31 – Levantamento quantitativo do consumo aço dobrado

Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
			L 60x4.75, Duplo T união soldada	160.268			0.169			1327.72		
			L 50x4.75, Duplo T união soldada	232.585			0.201			1579.77		
		L			392.854			0.370			2907.49	
			U150X75X6.30	72.019			0.127			994.07		
			U150X75X4.25	6.717			0.009			71.18		
			U150X50X4.18	248.013			0.245			1921.65		
		U			326.749			0.380			2986.89	
			C100X50X17X2.00	250.000			0.110			866.36		
		C			250.000			0.110			866.36	
Aço dobrado	A-36					969.602			0.861			6760.75

Fonte: Autor (2023).

Figura 32 – Levantamento quantitativo do consumo de aço laminado

Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
			L 1 X 1/8, Duplo U união genérica	163.835			0.050			393.55		
			L 1 1/4 X 3/16, Duplo U união genérica	235.735			0.135			1062.20		
		L			399.570			0.185			1455.75	
			U 152.4 x 5.1	320.032			0.496			3893.99		
			U 203.2 x 5.6	250.000			0.542			4254.70		
		Perfil U			570.032			1.038			8148.69	
Aço laminado	A-36 250Mpa					969.602			1.223			9604.44

Fonte: Autor (2023).

Para uma avaliação criteriosa da estrutura, não só o consumo, mas também o coeficiente de aproveitamento η, é um aspecto crucial. Este coeficiente é definido como a razão entre a solicitação mais crítica em uma seção e a sua capacidade resistente correspondente. Em outras palavras, o coeficiente de aproveitamento η, expresso em porcentagem, deve ser menor ou igual

a 100% para fins de verificação, e quanto mais próximo de 100% estiver, melhor será o aproveitamento do elemento estrutural em questão.

O Quadro 1 exibe os coeficientes de aproveitamento das seções mais críticas (por grupos) para ambos os dimensionamentos, juntamente com uma média para ambos. Os cálculos correspondentes à verificação das seções críticas estão detalhados nos anexos de A ao J.

Quadro 1 – Coeficiente de aproveitamento η (%) das seções críticas

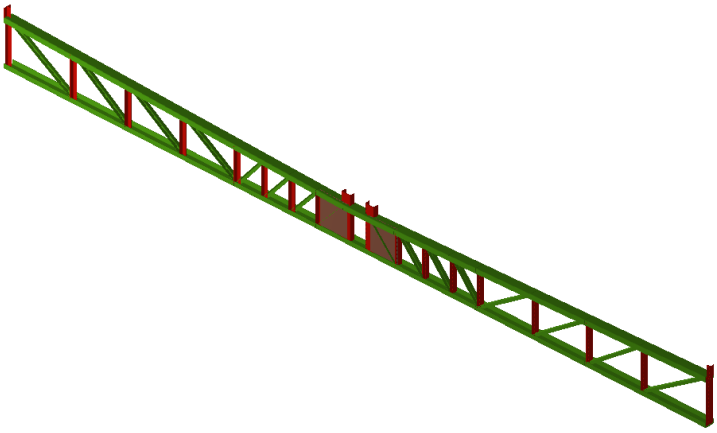
	η Aço laminado	**η Aço dobrado**
Banzo superior	84,0	94,6
Banzo inferior	80,4	98,6
Diagonais	67,5	35,0
Montantes	70,5	21,0
Terças	77,3	83,4
$\eta_{médio}$	75,94	66,44

Fonte: Autor (2023).

Embora haja uma diferença total média de 9,55% entre a média dos coeficientes de aproveitamento das estruturas, é perceptível que a estrutura composta por aço dobrado apresenta uma discrepância significativa entre os resultados obtidos no banzo superior e banzo inferior em relação aos montantes e diagonais. Essa disparidade ocorre devido à falta de rigidez nesses pontos, sendo assim necessária a tomara de decisão do projetista, de modo que o problema seja solucionado viavelmente.

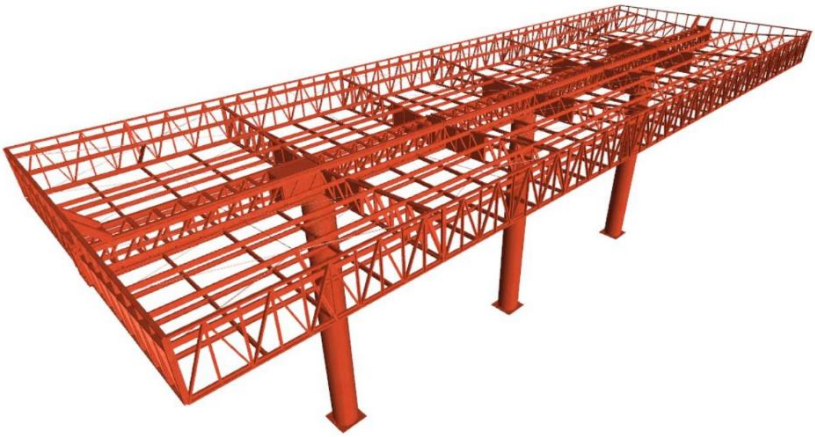
Como solução, foram adotadas placas com espessura de 2,5mm, adicionadas nas treliças mais próximas ao pilar, com ligações rígidas entre seus vértices e os nós da treliça, neste momento, a estrutura a passa a comporta-se como pórtico. A Figura 33 ilustra a aplicação das chapas no projeto em questão, enquanto as imagens 34 e 35 apresentam a cobertura de um posto de combustível de arquitetura similar ao projeto deste trabalho e o detalhe das placas nos pontos de apoio, respectivamente.

Figura 33 – Detalhe da treliça com auxílio de chapa de aço 2,5 mm



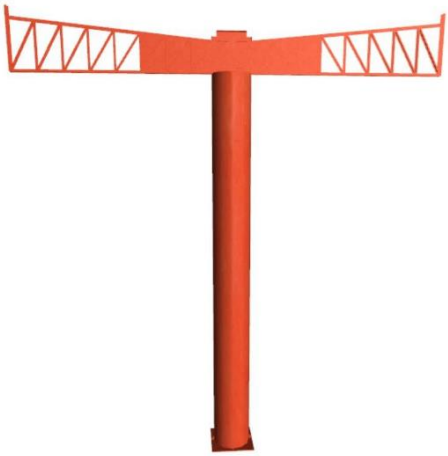
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 – Posto de combustível com uma linha de pilares



Fonte: Página do Engenheiro Ítallo Bernardo.[1]

Figura 35 – Vista frontal da treliça



Fonte: Página do Engenheiro Ítallo Bernardo.[2]

[1] Disponível em: https://calculistaestrutural.com.br/curso/cype3d-posto. Acesso em: 01 de mai. 2023.
[2] Disponível em: https://calculistaestrutural.com.br/curso/cype3d-posto. Acesso em: 01 de mai. 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir preliminarmente que o uso de perfis formados a frio apresenta vantagens em termos de custo-benefício em comparação ao uso de perfis laminados. No entanto, essa conclusão não pode ser considerada como uma regra geral no projeto e dimensionamento de estruturas metálicas. De acordo com Teixeira (2020), é possível observar uma vantagem no uso de perfis de aço dobrado a frio em relação aos perfis laminados, especialmente para distâncias menores, quando a altura da treliça e o espaçamento entre os pórticos são variáveis importantes. Embora essa vantagem esteja relacionada à massa de aço resultante, é um indicativo positivo de que, em determinadas condições, essa pode ser uma opção viável.

Para além das considerações relacionadas às dimensões e usabilidade das edificações em aço, é de extrema importância realizar um levantamento de dados sobre a disponibilidade do material na região onde será realizada a construção, bem como verificar a existência de mão de obra capacitada para executar o serviço. Esses aspectos devem ser avaliados desde a fase inicial de levantamento orçamentário e concepção estrutural.

Diante do cenário de crescente aplicação de aço em sistemas estruturais, seja por questões estéticas, de durabilidade, baixo impacto ambiental ou difusão dos métodos construtivos envolvendo o uso de aço, é fundamental a realização de estudos a respeito da viabilidade e disponibilidade desses materiais na região.

De acordo com o relatório da ABCEM (2021), a produção de estruturas e materiais em aço apresentou um crescimento de 24,9% em 2020, consolidando-se como um dos principais materiais para a construção civil. Dessa forma, a previsão é de que esse crescimento se mantenha otimista para 2021.

Os estudos mencionados devem ter como objetivo a disseminação das vantagens do uso do aço na construção civil na região, buscando promover o aumento do investimento e da capacitação da mão-de-obra local. Para isso, é importante identificar as características específicas da região que possam influenciar a aplicação do material, bem como avaliar as necessidades do mercado local e dos clientes em potencial. Ademais, a divulgação dos resultados obtidos nos estudos para as partes interessadas pode contribuir para a conscientização sobre as vantagens e oportunidades oferecidas pelo uso de aço na construção civil, incentivando o investimento e o desenvolvimento da cadeia produtiva na região.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800/08**: Projetos de estruturas de aço e estruturas mistas de e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **6120/2019**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123/88**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355/2012**: Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **14762/10**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ANDRADE, Sebastião. **Comportamento e Projeto de Estruturas de Aço**. Rio de Janeiro. 2016.

ABCEM (Brasil). **Produção de estruturas e materiais em aço cresce 24,9%**. 202. Disponível em: https://www.abcem.org.br/site/blog/producao-de-estruturas-e-materiais-em-aco-cresce-24-9. Acesso em: 05 jan. 2021.

ALMEIDA, P.H.F. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Transferência de Cargas em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

BATISTA, E. M. **Effective section method**: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction. Thin-walled Structures, v.48, p. 345-356, 2010.

BERNARDO, Ítallo. **CYPE3D - Posto**: curso posto de combustíveis. Curso posto de combustíveis. 2023. Disponível em: https://calculistaestrutural.com.br/curso/cype3d-posto. Acesso em: 01 maio de 2023.

CAPANEMA, D. C. O. **Análise da confiabilidade de barras em perfis formados a frio submetidas à força axial de compressão pelo método FORM [manuscrito].** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2018.

CARDOSO, H. S. **Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

CARVALHO, P. R. M.; GRIGOLETTI, G.; TAMAGNA, A.; ITURRIOZ, I. **Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio.** Porto Alegre: Brasil, 2004.

CASTRO, L.A. **Análise de Segurança no Projeto de Estruturas: Método dos Estados Limites**. São Carlos, 1997.

CHODRAUI, G. M. B. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São.

CHIAVERINI, Vicente, "Aços e Ferros fundidos" 7° Edição – 1996, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM.

DUTRA, C.M. **Estudo do Comportamento Estrutural do Conector Crestbond Considerando Variações Geométricas e Mecânicas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

Fadel; **CARQUEJA**, Moacir H. Andrade. **Apostila** de **Estruturas Metálicas** I. 2ª edição. Universidade Federal de Santa Catarina, **Florianópolis**, SC. **2012**.

FUSCO, P. B. (1981). **"Estruturas de Concreto – Solicitações Normais"**, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, pp. 2-81.

GALAMBOS, T.V.; ELLINGWOOD, B.; MACGREGOR, J.G.; CORNELL, C.A. **Probability-based load criteria: assessment of current design practice.** USA: Journal of the Structural Division, v. 108, n. ST5, p. 959-977, 1982.

GALAMBOS, T. V. **Design Codes. Engineering Safety**. Inglaterra: McGraw-Hill, p. 47-71, 1992.

GALAMBOS, T. V. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. 5ª Ed. John Wiley & Sons, inc. New York, 1998. 911 p.

Hancock, G. J. Murray, T. M., e Ellifritt, D. S. (2001). Cold-formed Steel Structures to limites, Dissertação de Mestrado – EESC/USP.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático**. 9. ed. Rio de Janeiro, 2022.

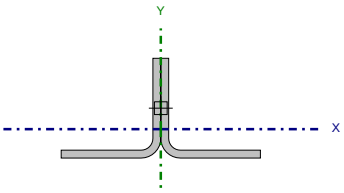
SILY, B. T. P. **Avaliação probabilística da resistência à compressão axial de perfis de aço formados a frio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Estruturas, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2012.

TEIXEIRA, Igor de Lima. **Otimização de Coberturas em Aço de Perfil Formado a Frio de Edifícios Industriais**. 2020. 116 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Cap. 7. The AISI Specification, Marcell-Dekker, New York.

YU, W.W. **Cold-Formed steel design**. New York: Jonh Wiley & Sons, 2000, 756 p.

Barra N92/N101

Perfil: L 60x4.75, Duplo T união soldada (Cordão descontínuo)
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N92	N101	0.538	10.55	36.84	68.74	0.79	0.00	-12.61

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.538	0.538	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 14762:2010)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	M_xV_y	M_yV_x	$N_cM_xM_y$	$N_tM_xM_y$	M_t	
N92/N101	$(b_f/t) \leq 200$ Passa	$\lambda_{xx,c} \leq 200.0$ $\lambda_{yy,c} \leq 200.0$ Passa	x: 0.538 m η = 21.0	x: 0 m η = 11.8	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	V_{Sd} = 0.00 N.A.(2)	V_{Sd} = 0.00 N.A.(2)	N.A.(3)	N.A.(3)	N.A.(4)	N.A.(5)	$M_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(6)	PASSA h = 21.0

Notação:
b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura
l : Limitação de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
M_xV_y: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados
M_yV_x: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados
$N_cM_xM_y$: Resistência à flexo-compressão
$N_tM_xM_y$: Resistência à flexo-tração
M_t: Resistência à torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(4) *Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(5) *Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(6) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*

Nota: A análise de peças compostas é realizada através da verificação de cada um dos perfis simples que as constituem. As verificações destes perfis são realizadas para os esforços calculados a partir daqueles que atuam sobre a peça composta, segundo as suas características mecânicas. Para as verificações de estabilidade, utiliza-se a esbeltez mecânica ideal, obtida em função da esbeltez da peça e uma esbeltez complementar que considera a distância das ligações entre os perfis simples.

Valores máximos da relação comprimento-espessura (ABNT NBR 14762:2010 Artigo 9.1.2 Tabela 4)

Elemento: Mesa

Em almas de vigas sem enrijecedores transversais, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 200.

(b / t) ≤ 200 (b / t) : *10* ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : *48.15* mm

t: A espessura. t : *4.75* mm

Limitação de esbeltez (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7.4)

O índice de esbeltez KL/r das barras comprimidas não deve exceder 200.

Para barras compostas comprimidas, isto é, aquelas constituídas por um ou mais perfis associados, além de atender ao disposto em 9.7.4, o índice de esbeltez de cada perfil componente da barra deve ser inferior:

a) à metade do índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de presilhas (chapas separadoras);

$\lambda_c = KL_c/r_c \leq 200$

$l_{xx,c}$: 28.8 ✓

$l_{yy,c}$: 21.1 ✓

Onde:

$K_xL_{x,c}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo X. — $K_xL_{x,c}$: 0.538 m

$K_yL_{y,c}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo Y. — $K_yL_{y,c}$: 0.538 m

$r_{x,c}$: Raio de giração da seção composta, em relação ao eixo principal X. — $r_{x,c}$: 1.87 cm

$r_{y,c}$: Raio de giração da seção composta, em relação ao eixo principal Y. — $r_{y,c}$: 2.55 cm

$K_xL_{x,s}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção simples, em relação ao eixo X. — $K_xL_{x,s}$: 0.538 m

$K_yL_{y,s}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção simples, em relação ao eixo Y. — $K_yL_{y,s}$: 0.000 m

$r_{x,s}$: Raio de giração da seção simples, em relação ao eixo principal X. — $r_{x,s}$: 1.87 cm

$r_{y,s}$: Raio de giração da seção simples, em relação ao eixo principal Y. — $r_{y,s}$: 1.87 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.210 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N101, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Asforço axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 25.20 kN

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$\mathbf{N_{t,Rd}} = A\, f_y / \gamma$ — $N_{t,Rd}$: 119.92 kN

Onde:

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 5.28 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.118 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N92, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. — $N_{c,Sd}$: 12.43 kN

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{c,Rd}} = \chi A_{ef} f_y / \gamma$$

$N_{c,Rd}$: 105.21 kN

Onde:

A_{ef}: Área efetiva da seção transversal da barra. — A_{ef} : 5.28 cm²

c: Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1{,}5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$ — c : 0.96

Sendo:

l_0: Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas. — $l_{0,ft}$: 0.32

$$\lambda_0 = \left[\frac{Af_y}{N_e}\right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Esforço axial crítico elástico de flambagem mínimo. — N_e : 1257.15 kN

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 5.28 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.2

A tensão crítica elástica de flambagem σ_{cr} é o valor da menor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$i_0^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,x}) \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,y}) \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,T}) - \sigma_{cr}^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,y}) \cdot x_0^2 - \sigma_{cr}^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,x}) \cdot y_0^2 = 0$$

s_{cr} : 2382.47 MPa

Onde:

$s_{cr,x}$: Tensão crítica elástica de flambagem por flexão da seção composta, em torno do eixo X. — $s_{cr,x}$: 2382.47 MPa

$s_{cr,y}$: Tensão crítica elástica de flambagem por flexão da seção composta, em torno do eixo Y. — $s_{cr,y}$: 4445.51 MPa

$s_{cr,T}$: Tensão crítica elástica de flambagem por torção da seção composta. — $s_{cr,T}$: ∞

I_x: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo X. — I_x : 36.84 cm4

I_y: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo Y. — I_y : 68.74 cm4

I_t: Módulo de torção uniforme da seção composta. — I_t : 0.79 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção composta. — C_w : 0.00 cm6

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal. — G : 76923 MPa

l_x: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo X, calculada levando em conta o tipo de ligações e o espaçamento. — l_x : 28.78

l_y: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo Y, calculada levando em conta o tipo de ligações e o espaçamento. — l_y : 21.07

K_zL_z: Comprimento efetivo de flambagem por torção da seção composta. — K_zL_z : 0.000 m

r_0: Raio de giração polar da seção composta, em relação ao centro de torção.

$$\mathbf{i_0^2} = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2$$

r_0 : 3.30 cm

Sendo:

r_x, r_y: Raios de giração da seção composta, em relação aos eixos principais de inércia X e Y. — r_x : 1.87 cm; r_y : 2.55 cm

x_0, y_0: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, relativas ao centro de gravidade da seção composta. — x_0 : 0.00 cm; y_0 : -0.95 cm

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

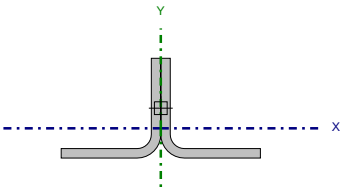
Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Barra N94/N104

Perfil: L 50x4.75, Duplo T união soldada (Cordão descontínuo)
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N94	N104	1.110	8.65	20.64	39.87	0.65	0.00	-10.09

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	1.110	1.110	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 14762:2010)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	M_xV_y	M_yV_x	$N_cM_xM_y$	$N_tM_xM_y$	M_t	
N94/N104	$(b_f/t) \leq 200$ Passa	$\lambda_{xx,c} \leq 200.0$ $\lambda_{yy,c} \leq 200.0$ Passa	x: 1.11 m η = 35.0	x: 0 m η = 26.4	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	V_{Sd} = 0.00 N.A.(2)	x: 0 m η = 0.1	N.A.(3)	N.A.(3)	N.A.(4)	N.A.(5)	$M_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(6)	PASSA h = 35.0

Notação:
b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura
l: Limitação de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
M_xV_y: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados
M_yV_x: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados
$N_cM_xM_y$: Resistência à flexo-compressão
$N_tM_xM_y$: Resistência à flexo-tração
M_t: Resistência à torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(4) *Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(5) *Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(6) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*

Nota: A análise de peças compostas é realizada através da verificação de cada um dos perfis simples que as constituem. As verificações destes perfis são realizadas para os esforços calculados a partir daqueles que atuam sobre a peça composta, segundo as suas características mecânicas. Para as verificações de estabilidade, utiliza-se a esbeltez mecânica ideal, obtida em função da esbeltez da peça e uma esbeltez complementar que considera a distância das ligações entre os perfis simples.

Valores máximos da relação comprimento-espessura (ABNT NBR 14762:2010 Artigo 9.1.2 Tabela 4)

Elemento: Mesa

Em almas de vigas sem enrijecedores transversais, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 200.

(b / t) ≤ 200 (b / t) : *8* ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : *38.13* mm

t: A espessura. t : *4.75* mm

Limitação de esbeltez (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7.4)

O índice de esbeltez KL/r das barras comprimidas não deve exceder 200.

Para barras compostas comprimidas, isto é, aquelas constituídas por um ou mais perfis associados, além de atender ao disposto em 9.7.4, o índice de esbeltez de cada perfil componente da barra deve ser inferior:

a) à metade do índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de presilhas (chapas separadoras);

$\lambda_c = KL_c/r_c \leq 200$

$l_{xx,c}$: 71.8 ✓

$l_{yy,c}$: 51.7 ✓

Onde:

$K_xL_{x,c}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo X. — $K_xL_{x,c}$: 1.110 m

$K_yL_{y,c}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo Y. — $K_yL_{y,c}$: 1.110 m

$r_{x,c}$: Raio de giração da seção composta, em relação ao eixo principal X. — $r_{x,c}$: 1.54 cm

$r_{y,c}$: Raio de giração da seção composta, em relação ao eixo principal Y. — $r_{y,c}$: 2.15 cm

$K_xL_{x,s}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção simples, em relação ao eixo X. — $K_xL_{x,s}$: 1.110 m

$K_yL_{y,s}$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão da seção simples, em relação ao eixo Y. — $K_yL_{y,s}$: 0.000 m

$r_{x,s}$: Raio de giração da seção simples, em relação ao eixo principal X. — $r_{x,s}$: 1.54 cm

$r_{y,s}$: Raio de giração da seção simples, em relação ao eixo principal Y. — $r_{y,s}$: 1.54 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.350 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N104, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Asforço axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 34.41 kN

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{t,Rd}} = A\, f_y / \gamma$$

$N_{t,Rd}$: 98.32 kN

Onde:

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 4.33 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.264 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N94, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. — $N_{c,Sd}$: 18.12 kN

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{c,Rd}} = \chi\, A_{ef} f_y / \gamma$$

$N_{c,Rd}$: 68.56 kN

Onde:

A_{ef}: Área efetiva da seção transversal da barra. — A_{ef} : 4.33 cm²

c: Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1{,}5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$ — c : 0.76

Sendo:

l_0: Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas. — $l_{0,ft}$: 0.81

$$\lambda_0 = \left[\frac{A f_y}{N_e}\right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Esforço axial crítico elástico de flambagem mínimo. — N_e : 165.47 kN

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 4.33 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.2

A tensão crítica elástica de flambagem σ_{cr} é o valor da menor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$i_0^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,x}) \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,y}) \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,T}) - \sigma_{cr}^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,y}) \cdot x_0^2 - \sigma_{cr}^2 \cdot (\sigma_{cr} - \sigma_{cr,x}) \cdot y_0^2 = 0$$

s_{cr} : 382.49 MPa

Onde:

$s_{cr,x}$: Tensão crítica elástica de flambagem por flexão da seção composta, em torno do eixo X. — $s_{cr,x}$: 382.49 MPa

$s_{cr,y}$: Tensão crítica elástica de flambagem por flexão da seção composta, em torno do eixo Y. — $s_{cr,y}$: 738.70 MPa

$s_{cr,T}$: Tensão crítica elástica de flambagem por torção da seção composta. — $s_{cr,T}$: ∞

I_x: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo X. — I_x : 20.64 cm4

I_y: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo Y. — I_y : 39.87 cm4

I_t: Módulo de torção uniforme da seção composta. — I_t : 0.65 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção composta. — C_w : 0.00 cm6

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal. — G : 76923 MPa

l_x: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo X, calculada levando em conta o tipo de ligações e o espaçamento. — l_x : 71.84

l_y: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo Y, calculada levando em conta o tipo de ligações e o espaçamento. — l_y : 51.69

K_zL_z: Comprimento efetivo de flambagem por torção da seção composta. — K_zL_z : 0.000 m

r_0: Raio de giração polar da seção composta, em relação ao centro de torção.

$$\mathbf{i_0^2} = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2$$

r_0 : 2.76 cm

Sendo:

r_x, r_y: Raios de giração da seção composta, em relação aos eixos principais de inércia X e Y. — r_x : 1.54 cm; r_y : 2.15 cm

x_0, y_0: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, relativas ao centro de gravidade da seção composta. — x_0 : 0.00 cm; y_0 : -0.78 cm

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.001 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N94, para a combinação de hipóteses 1.25·PP+TelhadoMetálico.

V_{Sd} : 0.02 kN

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$^{(1)}V_{Rd}$: 24.70 kN

para $^{(1)}h/t \leq 1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.6 f_y h t/\gamma$

$1.08(EK_v/f_y)^{0.5}$: 33.46

para $^{(2)}1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} < h/t \leq 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.65t^2\left(k_v f_y E\right)^{0.5}/\gamma$

h / t : 8.03

para $^{(3)}h/t > 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = \left[0.905Ek_v t^3/h\right]/\gamma$

$1.4(EK_v/f_y)^{0.5}$: 43.38

Onde:

t: Espessura da alma. — t : 4.75 mm

h: Largura da alma. — h : 38.13 mm

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

K_v: Coeficiente de flambagem local por esforço cortante que, para uma mesa, é dado por: — K_v : 1.20

$\mathbf{k_v} = 1.20$

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

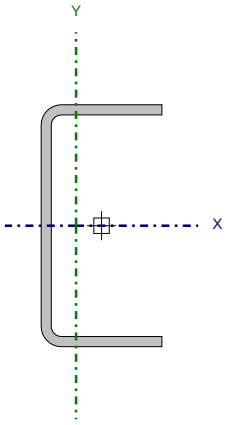
Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Barra N99/N100

Perfil: U150X75X6.30
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N99	N100	0.467	17.58	594.88	95.32	2.33	-15.80	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 14762:2010)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	M_xV_y	M_yV_x	$N_cM_xM_y$	$N_tM_xM_y$	M_t	
N99/N100	x: 0 m (b_w/t) ≤ 90 Passa	λ_{xx} ≤ 200.0 λ_{yy} ≤ 200.0 Passa	x: 0.233 m η = 35.0	x: 0 m η = 74.1	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	x: 0.233 m η = 20.1	x: 0 m η = 3.3	x: 0 m η = 0.2	N.A.(2)	x: 0.233 m η = 4.2	x: 0.233 m η = 94.6	x: 0.233 m η = 45.9	$M_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(3)	PASSA h = 94.6

Notação:
b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura
l: Limitação de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
M_xV_y: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados
M_yV_x: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados
$N_cM_xM_y$: Resistência à flexo-compressão
$N_tM_xM_y$: Resistência à flexo-tração
M_t: Resistência à torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.
(2) Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.
(3) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Valores máximos da relação comprimento-espessura (ABNT NBR 14762:2010 Artigo 9.1.2 Tabela 4)

A relação comprimento-espessura desfavorável é obtida no nó N99.

Elemento: Alma

Em almas de perfis U não enrijezidos sujeitas à compressão uniforme, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 90.

(b / t) ≤ 90 (b / t) : *20* ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : *124.80* mm

t: A espessura. t : *6.30* mm

Limitação de esbeltez (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7.4)

O índice de esbeltez l das barras comprimidas não deve exceder o valor 200.

$\lambda = KL/r < 200$

l_{xx} : 8.6 ✓

l_{yy} : 40.4 ✓

Onde:

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. K_xL_x : 0.500 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. K_yL_y : 0.940 m

r_x: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal X. r_x : 5.82 cm

r_y: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal Y. r_y : 2.33 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.350 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N99, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{t,Sd}$: Asforço axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd}$: 139.67 kN

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{t,Rd}} = A\, f_y / \gamma$$

$N_{t,Rd}$: 399.62 kN

Onde:

A: Área bruta da seção transversal da barra. A : 17.58 cm²

f_y: Tensão de escoamento. f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. g : 1.1

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.741 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N99, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. $N_{c,Sd}$: 249.02 kN

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{c,Rd}} = \chi\, A_{ef} f_y / \gamma$$

$N_{c,Rd}$: 335.99 kN

Onde:

A_{ef}: Área efetiva da seção transversal da barra. A_{ef} : 17.58 cm²

c: Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1{,}5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$

c_{yy} : 0.92

c_{xz} : 1.00

Sendo:

l_0: Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$l_{0,yy}$: 0.45

$l_{0,xz}$: 0.10

$$\lambda_0 = \left[\frac{Af_y}{N_e}\right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 17.58 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.2

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos por a) e b): — N_e : 2129.48 kN

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$\mathbf{N_{ey}} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

N_{ey} : 2129.48 kN

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção.

$$\mathbf{N_{exz}} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2\left[1-(x_0/r_0)^2\right]}\left[1-\sqrt{1-\frac{4N_{ex}N_{ez}\left[1-(x_0/r_0)^2\right]}{(N_{ex}+N_{ez})^2}}\right]$$

N_{exz} : 46969.79 kN

Onde:

$$\mathbf{N_{ex}} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$$

N_{ex} : 46969.79 kN

$$\mathbf{N_{ez}} = \frac{1}{r_0^2}\left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t\right]$$

N_{ez} : ∞

I_x: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X. — I_x : 594.88 cm4

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y. — I_y : 95.32 cm4

I_t: Momento de inércia à torção uniforme. — I_t : 2.33 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção. — C_w : 3236.65 cm6

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal. — G : 76923 MPa

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. — K_xL_x : 0.500 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. — K_yL_y : 0.940 m

K_zL_z: Comprimento efetivo de flambagem por torção. — K_zL_z : 0.000 m

r_0: Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$\mathbf{r_0} = \left[r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2\right]^{0.5}$$

r_0 : 7.80 cm

Sendo:

r_x, r_y: Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente. — r_x : 5.82 cm; r_y : 2.33 cm

x_0, y_0: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção. — x_0 : -46.40 mm; y_0 : 0.00 mm

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.201 ✓

O momento fletor solicitante de cálculo desfavorável M_{Sd} produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N99, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

M_{Sd} : 0.82 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como:

M_{Rd} : 4.06 kN·m

$$\mathbf{M_{Rd}} = W_{ef} f_y / \gamma$$

Onde:

W_{ef}: Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com s calculada para o estado limite último de escoamento da seção. — W_{ef} : 17.88 cm³

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.033 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N99, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd} : 3.52 kN

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}.

V_{Sd} : 1.76 kN

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$^{(1)}V_{Rd}$: 53.61 kN

para $^{(1)}h/t \leq 1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.6 f_y h t/\gamma$ — $1.08(EK_v/f_y)^{0.5}$: 33.46

para $^{(2)}1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} < h/t \leq 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.65t^2\left(k_v f_y E\right)^{0.5}/\gamma$ — h / t : 9.90

para $^{(3)}h/t > 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = \left[0.905 Ek_v t^3/h\right]/\gamma$ — $1.4(EK_v/f_y)^{0.5}$: 43.38

Onde:

t: Espessura da alma. — t : 6.30 mm

h: Largura da alma. — h : 62.40 mm

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

K_v: Coeficiente de flambagem local por esforço cortante que, para uma mesa, é dado por: — K_v : 1.20

$$\mathbf{k_v} = 1.20$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.002 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N99, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd} : 0.23 kN

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$^{(1)}V_{Rd}$: 107.21 kN

para $^{(1)}h/t \leq 1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.6f_y ht/\gamma$

$1.08(EK_v/f_y)^{0.5}$: 68.31

para $^{(2)}1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} < h/t \leq 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.65t^2\left(k_v f_y E\right)^{0.5}/\gamma$

h / t : 19.81

para $^{(3)}h/t > 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = \left[0.905Ek_v t^3/h\right]/\gamma$

$1.4(EK_v/f_y)^{0.5}$: 88.54

Onde:

t: Espessura da alma.	t :	6.30	mm
h: Largura da alma.	h :	124.80	mm
f_y: Tensão de escoamento.	f_y :	250.00	MPa
E: Módulo de elasticidade.	E :	200000	MPa
g: Coeficiente de ponderação das resistências.	g :	1.1	
K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:	K_v :	5.00	

$\mathbf{k_v} = 5.00$

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} produzem-se num ponto situado a uma distância 0.233 m do nó N99, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}}\right)^2$$

h : 0.042 ✓

Onde:

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo.	M_{Sd} :	0.82	kN·m
$M_{0,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.	$M_{0,Rd}$:	4.06	kN·m
V_{Sd}: Força cortante solicitante de cálculo.	V_{Sd} :	3.49	kN
V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.	V_{Rd} :	107.21	kN

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavoráveis produzem-se num ponto situado a uma distância 0.233 m do nó N99, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

h : 0.946 ✓

Onde:

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. — $N_{c,Sd}$: 249.02 kN

$M_{x,Sd}$, $M_{y,Sd}$: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente. — $M_{x,Sd}$: 0.05 kN·m; $M_{y,Sd}$: 0.82 kN·m

$N_{c,Rd}$: Força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 9.7. — $N_{c,Rd}$: 335.99 kN

$M_{x,Rd}$, $M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2. — $M_{x,Rd}$: 18.03 kN·m; $M_{y,Rd}$: 4.06 kN·m

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavoráveis produzem-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N99, para a combinação de hipóteses 1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

Os esforços devem satisfazer as seguintes expressões de interação:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

h : 0.459 ✓

Onde:

$N_{t,Sd}$: Força normal de tração solicitante de cálculo. — $N_{t,Sd}$: 139.67 kN

$M_{x,Sd}$, $M_{y,Sd}$: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente. — $M_{x,Sd}$: 0.03 kN·m; $M_{y,Sd}$: 0.44 kN·m

N_{Rd}: Força normal de tração resistente de cálculo conforme 9.6. — N_{Rd} : 399.62 kN

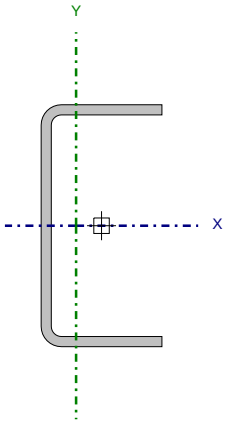
$M_{x,Rd}$, $M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2. — $M_{x,Rd}$: 18.03 kN·m; $M_{y,Rd}$: 4.06 kN·m

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Barra N90/N107

Perfil: U150X75X6.30
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N90	N107	0.467	17.58	594.88	95.32	2.33	-15.80	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 14762:2010)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	M_xV_y	M_yV_x	$N_cM_xM_y$	$N_tM_xM_y$	M_t	
N90/N107	x: 0 m (b_w/t) ≤ 90 Passa	λ_{xx} ≤ 200.0 λ_{yy} ≤ 200.0 Passa	x: 0.233 m η = 63.7	x: 0.233 m η = 42.5	M_{Sd} = 0.00 N.A.(1)	x: 0.467 m η = 34.9	x: 0.233 m η = 4.3	V_{Sd} = 0.00 N.A.(2)	N.A.(3)	x: 0.467 m η = 12.4	x: 0.467 m η = 61.2	x: 0.467 m η = 98.6	$M_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(4)	PASSA h = 98.6

Notação:
b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura
l: Limitação de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
M_xV_y: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados
M_yV_x: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados
$N_cM_xM_y$: Resistência à flexo-compressão
$N_tM_xM_y$: Resistência à flexo-tração
M_t: Resistência à torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(4) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*

Valores máximos da relação comprimento-espessura (ABNT NBR 14762:2010 Artigo 9.1.2 Tabela 4)

A relação comprimento-espessura desfavorável é obtida no nó N90.

Elemento: Alma

Em almas de perfis U não enrijezidos sujeitas à compressão uniforme, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 90.

(b / t) ≤ 90 (b / t) : *20* ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : *124.80* mm

t: A espessura. t : *6.30* mm

Limitação de esbeltez (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7.4)

O índice de esbeltez l das barras comprimidas não deve exceder o valor 200.

$\lambda = KL/r < 200$

l_{xx} : 8.6 ✓

l_{yy} : 40.4 ✓

Onde:

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. K_xL_x : 0.500 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. K_yL_y : 0.940 m

r_x: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal X. r_x : 5.82 cm

r_y: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal Y. r_y : 2.33 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.637 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N90, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Asforço axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd}$: 254.36 kN

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{t,Rd}} = A\, f_y / \gamma$$

$N_{t,Rd}$: 399.62 kN

Onde:

A: Área bruta da seção transversal da barra. A : 17.58 cm²

f_y: Tensão de escoamento. f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. g : 1.1

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.425 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N90, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. $N_{c,Sd}$: 142.66 kN

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$\mathbf{N_{c,Rd}} = \chi\, A_{ef} f_y / \gamma$$

$N_{c,Rd}$: 335.99 kN

Onde:

A_{ef}: Área efetiva da seção transversal da barra. A_{ef} : 17.58 cm²

c: Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1{,}5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$

c_{yy} : 0.92

c_{xz} : 1.00

Sendo:

l_0: Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$l_{0,yy}$: 0.45

$l_{0,xz}$: 0.10

$$\lambda_0 = \left[\frac{Af_y}{N_e}\right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra. — A : 17.58 cm²

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.2

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos por a) e b): — N_e : 2129.48 kN

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$\mathbf{N_{ey}} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

N_{ey} : 2129.48 kN

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção.

$$\mathbf{N_{exz}} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2\left[1-(x_0/r_0)^2\right]}\left[1-\sqrt{1-\frac{4N_{ex}N_{ez}\left[1-(x_0/r_0)^2\right]}{(N_{ex}+N_{ez})^2}}\right]$$

N_{exz} : 46969.79 kN

Onde:

$$\mathbf{N_{ex}} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$$

N_{ex} : 46969.79 kN

$$\mathbf{N_{ez}} = \frac{1}{r_0^2}\left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t\right]$$

N_{ez} : ∞

I_x: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X. — I_x : 594.88 cm4

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y. — I_y : 95.32 cm4

I_t: Momento de inércia à torção uniforme. — I_t : 2.33 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção. — C_w : 3236.65 cm6

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal. — G : 76923 MPa

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. — K_xL_x : 0.500 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. — K_yL_y : 0.940 m

K_zL_z: Comprimento efetivo de flambagem por torção. — K_zL_z : 0.000 m

r_0: Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$\mathbf{r_0} = \left[r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2\right]^{0.5}$$

r_0 : 7.80 cm

Sendo:

r_x, r_y: Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente. — r_x : 5.82 cm; r_y : 2.33 cm

x_0, y_0: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção. — x_0 : -46.40 mm; y_0 : 0.00 mm

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.349 ✓

O momento fletor desfavorável de cálculo M_{Sd} é obtido para o nó N107, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

M_{Sd} : 1.42 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como:

M_{Rd} : 4.06 kN·m

$$\mathbf{M_{Rd}} = W_{ef} f_y / \gamma$$

Onde:

W_{ef}: Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com s calculada para o estado limite último de escoamento da seção. — W_{ef} : 17.88 cm^3

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.043 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N90, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd} : 4.63 kN

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}.

V_{Sd} : 2.32 kN

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$^{(1)}V_{Rd}$: 53.61 kN

para $^{(1)}h/t \leq 1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.6 f_y h t/\gamma$ — $1.08(EK_v/f_y)^{0.5}$: 33.46

para $^{(2)}1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} < h/t \leq 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.65t^2\left(k_v f_y E\right)^{0.5}/\gamma$ — h / t : 9.90

para $^{(3)}h/t > 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = \left[0.905 E k_v t^3/h\right]/\gamma$ — $1.4(EK_v/f_y)^{0.5}$: 43.38

Onde:

t: Espessura da alma. — t : 6.30 mm

h: Largura da alma. — h : 62.40 mm

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

E: Módulo de elasticidade. — E : 200000 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

K_v: Coeficiente de flambagem local por esforço cortante que, para uma mesa, é dado por: — K_v : 1.20

$$\mathbf{k_v} = 1.20$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} são obtidos no nó N107, para a combinação de hipóteses
PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}}\right)^2$$

h : 0.124 ✓

Onde:

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo.	M_{Sd} :	1.42	kN·m
$M_{0,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.	$M_{0,Rd}$:	4.06	kN·m
V_{Sd}: Força cortante solicitante de cálculo.	V_{Sd} :	4.60	kN
V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.	V_{Rd} :	107.21	kN

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços de cálculo desfavoráveis são obtidos no nó N107, para a combinação de hipóteses
1.25·PP+1.25·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

h : 0.612 ✓

Onde:

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.	$N_{c,Sd}$:	142.66	kN
$M_{x,Sd}$, $M_{y,Sd}$: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.	$M_{x,Sd}$:	0.00	kN·m
	$M_{y,Sd}$:	0.76	kN·m
$N_{c,Rd}$: Força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 9.7.	$N_{c,Rd}$:	335.99	kN
$M_{x,Rd}$, $M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.	$M_{x,Rd}$:	18.03	kN·m
	$M_{y,Rd}$:	4.06	kN·m

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços desfavoráveis de cálculo são obtidos no nó N107, para a combinação PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

Os esforços devem satisfazer as seguintes expressões de interação:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

h : 0.986 ✓

Onde:

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

$M_{x,Sd}$, $M_{y,Sd}$: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.

N_{Rd}: Força normal de tração resistente de cálculo conforme 9.6.

$M_{x,Rd}$, $M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

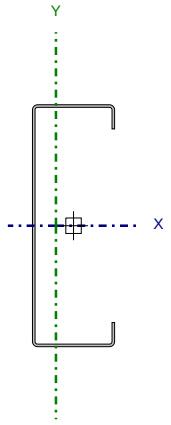
$N_{t,Sd}$:	254.36	kN
$M_{x,Sd}$:	0.00	kN·m
$M_{y,Sd}$:	1.42	kN·m
N_{Rd} :	399.62	kN
$M_{x,Rd}$:	18.03	kN·m
$M_{y,Rd}$:	4.06	kN·m

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Barra N11/N43

Perfil: C250X85X25X2.66
Material: Aço (A-36)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N11	N43	7.500	12.03	1134.61	114.47	0.28	-18.20	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.50	0.50
L_K	7.500	7.500	3.750	3.750
C_m	-	-	1.000	1.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_m: Coeficiente de momentos
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 14762:2010)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	M_xV_y	M_yV_x	$N_cM_xM_y$	$N_tM_xM_y$	M_t	
N11/N43	x: 0.469 m (b_w/t) ≤ 500 (b_l/t) ≤ 60 Passa	λ_{xx} ≤ 300.0 λ_{yy} ≤ 300.0 Passa	$N_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(1)	$N_{c,Sd}$ = 0.00 N.A.(2)	x: 3.75 m η = 83.4	M_{Sd} = 0.00 N.A.(3)	V_{Sd} = 0.00 N.A.(4)	x: 0 m η = 10.5	x: 3.281 m η = 36.9	N.A.(5)	N.A.(6)	N.A.(7)	$M_{t,Sd}$ = 0.00 N.A.(8)	PASSA h = 83.4

Notação:
b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura
l : Limitação de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
M_xV_y: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados
M_yV_x: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados
$N_cM_xM_y$: Resistência à flexo-compressão
$N_tM_xM_y$: Resistência à flexo-tração
M_t: Resistência à torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.*
(3) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(4) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(5) *Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(6) *Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(7) *Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.*
(8) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*

Valores máximos da relação comprimento-espessura (ABNT NBR 14762:2010 Artigo 9.1.2 Tabela 4)

A relação comprimento-espessura desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância 0.469 m do nó N11.

Elemento: Alma

Em elementos comprimidos com ambas as bordas vinculadas a elementos AA, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 500.

(b / t) ≤ 500 (b / t) : 90 ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : 239.36 mm

t: A espessura. t : 2.66 mm

Elemento: Mesa

Em elementos comprimidos AA, tendo uma borda vinculada à alma ou mesa e a outra ao enrijecedor de borda simples, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 60.

(b / t) ≤ 60 (b / t) : 28 ✓

Sendo:

b: Comprimento do elemento. b : 74.36 mm

t: A espessura. t : 2.66 mm

Limitação de esbeltez (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7.4)

É recomendado que o índice de esbeltez l das barras tracionadas não exceda o valor 300.

$\lambda = KL/r < 300$

l_{xx} : 77.2 ✓

l_{yy} : 243.2 ✓

Onde:

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. K_xL_x : 7.500 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. K_yL_y : 7.500 m

r_x: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal X. r_x : 9.71 cm

r_y: Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal Y. r_y : 3.08 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.834 ✓

O momento fletor solicitante de cálculo desfavorável M_{Sd} produz-se num ponto situado a uma distância de 3.750 m do nó N11, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

M_{Sd} : 12.72 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado em a), b) y c):

M_{Rd} : 15.25 kN·m

a) Início de escoamento da la seção efetiva (9.8.2.1)

$$\mathbf{M_{Rd}} = W_{ef} f_y / \gamma$$

M_{Rd} : 20.63 kN·m

Onde:

W_{ef}: Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com s calculada para o estado limite último de escoamento da seção. — W_{ef} : 90.77 cm³

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

b) Flambagem lateral com torção (9.8.2.2)

$$\mathbf{M_{Rd}} = \chi_{FLT} W_{c,ef} f_y / \gamma$$

M_{Rd} : 15.25 kN·m

Onde:

$W_{c,ef}$: Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, adotando s = $c_{FLT} f_y$. — $W_{c,ef}$: 90.77 cm³

f_y: Tensão de escoamento. — f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. — g : 1.1

c_{FLT}: Fator de redução associado à flambagem lateral com torção.

$$^{(1)}\lambda_0 \leq 0.6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1$$

$$^{(2)}0.6 < \lambda_0 < 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1.11\left(1 - 0.278\lambda_0^{\,2}\right)$$

$$^{(3)}\lambda_0 \geq 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1/\lambda_0^{\,2}$$

$^{(2)}c_{FLT}$: 0.74

Sendo:

$$\lambda_0 = \left(W_c f_y / M_e\right)^{0.5}$$

l_0 : 1.10

W_c: Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida. — W_c : 90.77 cm³

O momento fletor de flambagem lateral com torção M_e, em regime elástico, pode ser calculado pela seguinte expressão para barras com seccão duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria:

$$\mathbf{M_e} = C_b r_0 \left(N_{ey} N_{et}\right)^{0.5}$$

M_e : 18.88 kN·m

Onde:

C_b: Coeficiente de equivalência de momento na flexão. — C_b : 1.00

$$\mathbf{N_{ey}} = \frac{\pi^2 E I_y}{\left(K_y L_y\right)^2}$$

N_{ey} : 160.68 kN

$$\mathbf{N_{ez}} = \frac{1}{r_0^{\,2}}\left[\frac{\pi^2 E C_w}{\left(K_z L_z\right)^2} + G I_t\right]$$

N_{ez} : 158.73 kN

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y. — I_y : 114.47 cm4

I_t: Momento de inércia à torção uniforme. — I_t : 0.28 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção. C_w : 14254.47 cm6

E: Módulo de elasticidade. E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal. G : 76923 MPa

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem lateral. K_yL_y : 3.750 m

K_zL_z: Comprimento efetivo de flambagem por torção. K_zL_z : 3.750 m

r_0: Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$\mathbf{r_0} = \left[r_x^{\,2} + r_y^{\,2} + x_0^{\,2} + y_0^{\,2}\right]^{0.5}$$

r_0 : 11.82 cm

Sendo:

r_x, r_y: Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente. r_x : 9.71 cm; r_y : 3.08 cm

x_0, y_0: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção. x_0 : -60.00 mm; y_0 : 0.00 mm

c) Flambagem por distorção (9.8.2.3)

$$\mathbf{M_{Rd}} = \chi_{dist}\, W f_y / \gamma$$

M_{Rd} : 15.84 kN·m

Onde:

W: Módulo resistente elástico da seção bruta em relação à fibra extrema com maior tensão. W : 90.77 cm³

f_y: Tensão de escoamento. f_y : 250.00 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. g : 1.1

c_{dist}: Fator de redução associado à flambagem por distorção.

$$\lambda_{\mathbf{dist}} > 0.673 \rightarrow \chi_{dist} = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_{dist}}\right)\frac{1}{\lambda_{dist}}$$

c_{dist} : 0.77

Sendo:

l_{dist}: Índice de esbeltez reduzida associado à flambagem por distorção.

$$\lambda_{\mathbf{dist}} = \left(W f_y / M_{dist}\right)^{0.5}$$

l_{dist} : 1.02

M_{dist}: Momento fletor de flambagem por distorção elástica (A norma não contempla a formulação necessária para esta verificação, portanto, aplica-se o critério da norma AISI S100-07 (2007)).

$$\mathbf{M_{dist}} = W k_d \frac{\pi^2 E}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\frac{t}{b_f}\right)^2$$

M_{dist} : 21.74 kN·m

Onde:

k_d: Coeficiente de flambagem por distorção.

$$\mathbf{k_d} = 0.5 \le 0.6\left(\frac{b_f D}{b_w t}\right)^{0.7} \le 8.0$$

k_d : 1.35

E: Módulo de elasticidade. E : 200000 MPa

n: Coeficiente de Poisson. n : 0.3

b_w: Largura da alma. b_w : 250.00 mm

b_f: Largura da aba. b_f : 85.00 mm

D: Comprimento do enrijecedor da mesa. D : 25.00 mm

t: A espessura. t : 2.66 mm

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.105 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N11, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd} : 6.79 kN

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$^{(3)}V_{Rd}$: 64.69 kN

para $^{(1)}h/t \leq 1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.6f_y ht/\gamma$

$1.08(EK_v/f_y)^{0.5}$: 68.31

para $^{(2)}1.08\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} < h/t \leq 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = 0.65t^2\left(k_v f_y E\right)^{0.5}/\gamma$

h / t : 89.98

para $^{(3)}h/t > 1.4\left(Ek_v/f_y\right)^{0.5} \rightarrow \mathbf{V_{Rd}} = \left[0.905Ek_v t^3/h\right]/\gamma$

$1.4(EK_v/f_y)^{0.5}$: 88.54

Onde:

t: Espessura da alma. t : 2.66 mm

h: Largura da alma. h : 239.36 mm

f_y: Tensão de escoamento. f_y : 250.00 MPa

E: Módulo de elasticidade. E : 200000 MPa

g: Coeficiente de ponderação das resistências. g : 1.1

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por: K_v : 5.00

$\mathbf{k_v} = 5.00$

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} produzem-se num ponto situado a uma distância 3.281 m do nó N11, para a combinação de hipóteses PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}}\right)^2$$

h : 0.369 ✓

Onde:

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo. M_{Sd} : 12.52 kN·m

$M_{0,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1. $M_{0,Rd}$: 20.63 kN·m

V_{Sd}: Força cortante solicitante de cálculo. V_{Sd} : 0.85 kN

V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3. V_{Rd} : 64.69 kN

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

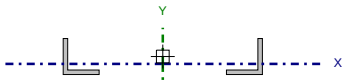
Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Barra N62/N64

Perfil: L 1 X 1/8, Duplo U união genérica (Distância entre os perfis: 90.0 / 90.0 mm e Perfis independentes)
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N62	N64	0.522	3.06	1.82	122.89	0.10	0.00	-5.20

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.522	0.522	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_u	M_v	V_u	V_v	NM_uM_v	T	NMVT	σ τ f	
N62/N64	λ ≤ 200.0 Passa	x: 0.522 m η = 70.5	x: 0 m η = 65.6	N.A. (1)	N.A. (1)	N.A. (2)	N.A. (2)	N.A. (3)	N.A. (4)	N.A. (5)	N.A. (6)	PASSA h = 70.5

Notação:
l : Limitação do índice de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_u: Resistência à flexão eixo U
M_v: Resistência à flexão eixo V
V_u: Resistência ao esforço cortante U
V_v: Resistência ao esforço cortante V
NM_uM_v: Resistência ao esforço axial e flexão combinados
T: Resistência à torção
NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante
s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.*
(4) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*
(5) *Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.*
(6) *Não há interação entre os dois esforços cortantes, nem entre os dois momentos fletores, nem entre esforço axial e flexão nem entre momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.*

Nota: A análise de peças compostas é realizada através da verificação de cada um dos perfis simples que as constituem. As verificações destes perfis são realizadas para os esforços calculados a partir daqueles que atuam sobre a peça composta, segundo as suas características mecânicas. Para as verificações de estabilidade, utiliza-se a esbeltez mecânica ideal, obtida em função da esbeltez da peça e uma esbeltez complementar que considera a distância das ligações entre os perfis simples.

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$\lambda \leq 200$ — l : 105.7 ✓

Onde:

l : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

l_u : 53.7

l_v : 105.7

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U. — $K_u \cdot L_u$: 0.522 m

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V. — $K_v \cdot L_v$: 0.522 m

r_u, r_v: Raios de giração em relação aos eixos principales U, V, respectivamente. — r_u : 0.97 cm; r_v : 0.49 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.705 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N64, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 24.50 kN

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{t,Rd}$: 34.77 kN

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 1.53 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.656 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N62, para a combinação de ações 1.5·PP+1.5·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{c,Sd}$: 12.63 kN

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{c,Rd}$: 19.24 kN

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão. — c : 0.553

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 1.53 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$ c : 0.553

Onde:

l_0: Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$ l_0 : 1.189

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. A_g : 1.53 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

N_e: Força axial de flambagem elástica. N_e : 27.04 kN

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal monossimétrica, cujo eixo principal U é o eixo de simetria, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a) e (b): N_e : 27.04 kN

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia V da seção transversal:

$$N_{ev} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_v}{(K_v \cdot L_v)^2}$$ N_{ev} : 27.04 kN

Onde:

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V. $K_v \cdot L_v$: 0.522 m

I_v: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo V. I_v : 0.37 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexotorção:

$$N_{euz} = \frac{N_{eu} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - (u_0/r_0)^2\right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{eu} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - (u_0/r_0)^2\right]}{(N_{eu} + N_{ez})^2}}\right]$$ N_{euz} : 104.69 kN

Onde:

$$N_{eu} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_u}{(K_u \cdot L_u)^2}$$ N_{eu} : 104.69 kN

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U. $K_u \cdot L_u$: 0.522 m

I_u: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo U. I_u : 1.45 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J\right]$$ N_{ez} : ∞

Sendo:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção. $K_z \cdot L_z$: 0.000 m

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

C_w: Constante de empenamento da seção transversal. C_w : 0.02 cm6

G: Módulo de elasticidade transversal do aço. G : 77000 MPa

J: Constante de torção da seção transversal. J : 0.05 cm4

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

$$\mathbf{r_0} = \sqrt{\left(r_u^2 + r_v^2 + u_0^2 + v_0^2\right)}$$ r_0 : 1.37 cm

Onde:

r_u, r_v: Raios de giração em relação aos eixos principales U, V, respectivamente. r_u : 0.97 cm; r_v : 0.49 cm

U_0, V_0: Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principales U, V, respectivamente. U_0 : 8.36 mm; V_0 : 0.00 mm

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 3 da Tabela F.1.

$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ 7.99 ≤ 12.73

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 7.99

Onde:

b: Largura. b : 25.40 mm

t: Espessura. t : 3.18 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$(\mathbf{b/t})_{\mathbf{lim}} = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ $(b/t)_{lim}$: 12.73

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência à flexão eixo U (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo V (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante U (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante V (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

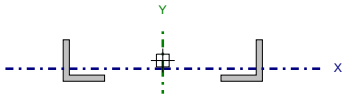
Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes, nem entre os dois momentos fletores, nem entre esforço axial e flexão nem entre momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

Barra N62/N63

Perfil: L 1 1/4 X 3/16, Duplo U união genérica (Distância entre os perfis: 90.0 / 90.0 mm e Ligação à distância máxima)
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N62	N63	0.689	5.74	5.26	265.24	0.43	0.00	-6.30

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.00	0.00
L_K	0.689	0.689	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_u	M_v	V_u	V_v	NM_uM_v	T	NMVT	σ τ f	
N62/N63	$\lambda_s \leq 1/2 \cdot \lambda_c$ $\lambda_c \leq 200.0$ Passa	x: 0.689 m η = 26.4	x: 0 m η = 67.1	x: 0.344 m η = 0.2	x: 0.344 m η = 0.3	x: 0 m η < 0.1	x: 0 m η < 0.1	N.A. (1)	N.A. (2)	N.A. (3)	x: 0.344 m η = 67.5	PASSA h = 67.5

Notação:
l : Limitação do índice de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_u: Resistência à flexão eixo U
M_v: Resistência à flexão eixo V
V_u: Resistência ao esforço cortante U
V_v: Resistência ao esforço cortante V
NM_uM_v: Resistência ao esforço axial e flexão combinados
T: Resistência à torção
NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante
s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.*
(2) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*
(3) *Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.*

Nota: A análise de peças compostas é realizada através da verificação de cada um dos perfis simples que as constituem. As verificações destes perfis são realizadas para os esforços calculados a partir daqueles que atuam sobre a peça composta, segundo as suas características mecânicas. Para as verificações de estabilidade, utiliza-se a esbeltez mecânica ideal, obtida em função da esbeltez da peça e uma esbeltez complementar que considera a distância das ligações entre os perfis simples.

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras simples comprimidas não deve ser superior a 1/2 do índice de esbeltez da barra composta. Adicionalmente, o índice de esbeltez das barras compostas comprimidas, tomado como a maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$\lambda_s \leq 1/2 \cdot \lambda_c$ — 16.2 ≤ 36.0 ✓

$\lambda_c \leq 200$ — l_c : 72.0 ✓

Onde:

l_s: Índice de esbeltez da seção simples.

$$\lambda_s = \frac{l}{r_{s,min}}$$

l_s : 16.2

Sendo:

l: Espaçamento na direção longitudinal entre soldas ou outros elementos de ligação entre os perfis da seção composta. — l : 0.100 m

$r_{u,s}, r_{v,s}$: Raios de giração em relação aos eixos principales U, V, respectivamente. — $r_{u,s}$: 1.20 cm; $r_{v,s}$: 0.62 cm

l_c: Índice de esbeltez da seção composta.

l_u: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo U, calculada levando em conta o tipo de ligação e o seu espaçamento. — l_u : 72.0

l_v: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo V, calculada levando em conta o tipo de ligação e o seu espaçamento. — l_v : 10.4

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.264 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N63, para a combinação de ações 1.5·PP+1.5·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 17.25 kN

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{t,Rd}$: 65.23 kN

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 2.87 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.671 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N62, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{c,Sd}$: 33.26 kN

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{c,Rd}$: 49.57 kN

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão. — c : 0.760

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 2.87 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$\lambda_0 \le 1.5 \;\rightarrow\; \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

c : 0.760

Onde:

l_0: Índice de esbeltez reduzido.

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

l_0 : 0.810

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 2.87 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

N_e: Força axial de flambagem elástica. — N_e : 109.41 kN

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção composta é dada pelo valor da menor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$(N_e - N_{ex}) \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot (N_e - N_{ez}) - N_e^2 \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot \left(\frac{x_0}{r_0}\right)^2 - N_e^2 \cdot (N_e - N_{ex}) \cdot \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 = 0$$

N_e : 109.41 kN

Onde:

N_{ex}: Esforço axial crítico elástico de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo X. — N_{ex} : 109.41 kN

N_{ey}: Esforço axial crítico elástico de flambagem por flexão da seção composta, em relação ao eixo Y. — N_{ey} : 5191.41 kN

N_{ez}: Esforço axial crítico elástico de flambagem por torção da seção composta. — N_{ez} : ∞

I_x: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo X. — I_x : 5.26 cm4

I_y: Momento de inércia da seção composta, em relação ao eixo Y. — I_y : 305.31 cm4

J: Constante de torção da seção composta. — J : 0.43 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção composta. — C_w : 0.31 cm6

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

G: Módulo de elasticidade transversal do aço. — G : 77000 MPa

l_x: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo X, calculada levando em conta o tipo de ligação e o seu espaçamento. — l_x : 72.0

l_y: Esbeltez mecânica da seção composta, em relação ao eixo Y, calculada levando em conta o tipo de ligação e o seu espaçamento. — l_y : 10.4

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção da seção composta. — $K_z \cdot L_z$: 0.000 m

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

r_0 : 7.51 cm

Onde:

r_x, r_y: Raios de giração da seção composta em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente. — r_x : 0.96 cm; r_y : 7.29 cm

X_0, Y_0: Coordenadas do centro de esforços cortantes na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção composta. — X_0 : 0.00 mm; Y_0 : -15.07 mm

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 3 da Tabela F.1.

$(b/t) \le (b/t)_{lim}$ — 6.72 ≤ 12.73

Sendo:

(b / t): Relação entre largura e espessura. (b / t) : 6.72

Onde:

b: Largura. b : 32.00 mm

t: Espessura. t : 4.76 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$(\mathbf{b/t})_{\mathbf{lim}} = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$(b/t)_{lim}$: 12.73

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência à flexão eixo U (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Este caso não está contemplado na norma. Aplica-se o critério da CYPE Ingenieros baseado na norma ANSI/AISC 360-05 (LRFD).

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.002 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.344 m do nó N62, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{M_{u,Sd}} = M_{x,Sd} \cdot \cos\alpha - M_{y,Sd} \cdot \sin\alpha$$

$M_{u,Sd}$: 0.00 kN·m

Onde:

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{x,Sd}$: 0.00 kN·m

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{y,Sd}$: 0.00 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções: M_{Rd} : 0.63 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 0.63 kN·m

Onde:

W_u: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_u : 1.84 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessário, pois o comprimento de flambagem lateral é nulo.

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessária, já que a seção considera-se compacta.

Já que se cumpre '$\lambda \leq \lambda_p$', não é necessário realizar esta verificação. 6.72 ≤ 15.27

Onde:

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

l : 6.72

Sendo:

b: Largura da aba da cantoneira. b : 32.00 mm

t: Espessura da cantoneira. t : 4.76 mm

$$\lambda_p = 0.54 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

l_p : 15.27

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência à flexão eixo V (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Este caso não está contemplado na norma. Aplica-se o critério da CYPE Ingenieros baseado na norma ANSI/AISC 360-05 (LRFD).

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.003 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.344 m do nó N62, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{M_{v,Sd}} = M_{x,Sd} \cdot \sin\alpha + M_{y,Sd} \cdot \cos\alpha$$

$M_{v,Sd}^{+}$: 0.00 kN·m

Onde:

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{x,Sd}^{-}$: 0.00 kN·m

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{y,Sd}^{-}$: 0.00 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções: M_{Rd} : 0.31 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 0.31 kN·m

Onde:

W_v: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_v : 0.90 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessária, já que o eixo de flexão não é o de maior inércia.

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessária, já que a seção considera-se compacta.

Já que se cumpre '$\lambda \leq \lambda_p$', não é necessário realizar esta verificação. 6.72 ≤ 15.27

Onde:

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

l : 6.72

Sendo:

b: Largura da aba da cantoneira. b : 32.00 mm

t: Espessura da cantoneira. t : 4.76 mm

$$\lambda_p = 0.54 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

l_p : 15.27

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência ao esforço cortante U (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Este caso não está contemplado na norma. Aplica-se o critério da CYPE Ingenieros baseado na norma ANSI/AISC 360-05 (LRFD).

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h < 0.001 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N62, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{V_{u,Sd}} = V_{x,Sd} \cdot \cos\alpha + V_{y,Sd} \cdot \sin\alpha$$

$V_{u,Sd}^{-}$: 0.01 kN

Onde:

$V_{x,Sd}$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. $V_{x,Sd}^{-}$: 0.00 kN

$V_{y,Sd}$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. $V_{y,Sd}^{+}$: 0.01 kN

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

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

V_{Rd} : 29.37 kN

Onde:

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 32.31 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = \mathrm{MIN}\left(\frac{b_{horz} \cdot t_{horz}}{\cos\alpha}; \frac{b_{vert} \cdot t_{vert}}{\sin\alpha}\right)$$

A_w : 2.15 cm²

Onde:

b_{horz}: Largura da aba horizontal. b_{horz} : 32.00 mm

t_{horz}: Espessura da aba horizontal. t_{horz} : 4.76 mm

b_{vert}: Largura da aba vertical. b_{vert} : 32.00 mm

t_{vert}: Espessura da aba vertical. t_{vert} : 4.76 mm

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante V (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Este caso não está contemplado na norma. Aplica-se o critério da CYPE Ingenieros baseado na norma ANSI/AISC 360-05 (LRFD).

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h < 0.001 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N62, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{V_{v,Sd}} = -V_{x,Sd} \cdot \sin\alpha + V_{y,Sd} \cdot \cos\alpha$$

$V_{v,Sd}^{+}$: 0.01 kN

Onde:

$V_{x,Sd}$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. $V_{x,Sd}^{-}$: 0.00 kN

$V_{y,Sd}$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. $V_{y,Sd}^{+}$: 0.01 kN

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

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

V_{Rd} : 29.37 kN

Onde:

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 32.31 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = \mathrm{MIN}\left(\frac{b_{horz} \cdot t_{horz}}{\sin\alpha}; \frac{b_{vert} \cdot t_{vert}}{\cos\alpha}\right)$$

A_w : 2.15 cm²

Onde:

b_{horz}: Largura da aba horizontal. b_{horz} : 32.00 mm

t_{horz}: Espessura da aba horizontal. t_{horz} : 4.76 mm

b_{vert}: Largura da aba vertical. b_{vert} : 32.00 mm

t_{vert}: Espessura da aba vertical. t_{vert} : 4.76 mm

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{|\sigma_{Sd}|}{\sigma_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.675 ✓

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se em um ponto situado a uma distância 0.344 m do nó N62 para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda e no ponto da seção transversal de coordenadas U = 12.16 mm, V = -1.68 mm em relação aos eixos principais de inércia.

As tensões normais σ_{Sd} são dadas por:

$$\sigma_{Sd} = \sigma_{N_{Sd}} + \sigma_{M_{u,Sd}} + \sigma_{M_{v,Sd}}$$

s_{Sd} : -116.58 MPa

Onde:

$$\sigma_{N_{Sd}} = \frac{N_{c,Sd}}{Q \cdot A_g}$$

s_{NSd} : -115.86 MPa

Sendo:

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{c,Sd}$: 33.25 kN

Q: Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F). — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 2.87 cm²

$$\sigma_{M_{u,Sd}} = -\frac{M_{u,Sd}}{I_u} \cdot V$$

$s_{Mu,Sd}$: -0.03 MPa

Sendo:

$M_{u,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. — $M_{u,Sd}^-$: 0.00 kN·m

I_u: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo U. — I_u : 4.16 cm4

V: Coordenada, em relação ao eixo V, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta. — V : -1.68 mm

$$\sigma_{M_{v,Sd}} = -\frac{M_{v,Sd}}{I_v} \cdot U$$

$s_{Mv,Sd}$: -0.70 MPa

Sendo:

$M_{v,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. — $M_{v,Sd}^+$: 0.00 kN·m

I_v: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo V. — I_v : 1.10 cm4

U: Coordenada, em relação ao eixo U, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta. — U : 12.16 mm

A tensão resistente de cálculo, σ_{Rd}, é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

s_{Rd} : 172.72 MPa

(a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}}$$

s_{Rd} : 227.27 MPa

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

(b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Rd} = \frac{\chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

s_{Rd} : 172.72 MPa

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \le 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

c : 0.760

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_e}}$$ l_0 : 0.810

$$\sigma_e = \frac{N_e}{Q \cdot A_g}$$ s_e : 381.21 MPa

Onde:

N_e: Força axial de flambagem elástica. N_e : 109.41 kN

Q: Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F). Q : 1.000

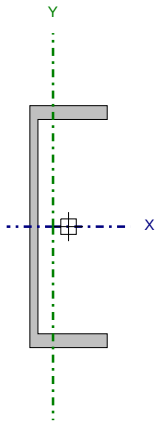
A_g: Área bruta da seção transversal da barra. A_g : 2.87 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Barra N63/N64

Perfil: U 152.4 x 5.1
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N63	N64	0.467	15.50	546.00	28.80	2.74	-9.78	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	NM_xM_y	T	NMVT	σ τ f	
N63/N64	λ ≤ 200.0 Passa	x: 0.467 m η = 39.1	x: 0 m η = 83.9	N.A.(1)	x: 0.233 m η = 0.2	x: 0 m η < 0.1	N.A.(2)	x: 0.233 m η = 84.0	N.A.(3)	N.A.(4)	N.A.(5)	PASSA h = 84.0

Notação:
l : Limitação do índice de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
NM_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados
T: Resistência à torção
NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante
s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*
(4) *Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.*
(5) *Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.*

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$\lambda \leq 200$ — l : 69.0 ✓

Onde:

l : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

l_x : 8.4
l_y : 69.0

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X. — $K_x \cdot L_x$: 0.500 m

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. — $K_y \cdot L_y$: 0.940 m

r_x, r_y: Raios de giração em relação aos eixos principales X, Y, respectivamente. — r_x : 5.94 cm; r_y : 1.36 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.391 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N64, para a combinação de ações 1.5·PP+1.5·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 137.65 kN

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{t,Rd}$: 352.27 kN

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.839 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N63, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{c,Sd}$: 229.79 kN

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{c,Rd}$: 273.78 kN

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão. — c : 0.777

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

c : 0.777

Onde:

l_0: Índice de esbeltez reduzido.

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

l_0 : 0.776

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

N_e: Força axial de flambagem elástica. — N_e : 643.38 kN

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal monossimétrica, cujo eixo principal X é o eixo de simetria, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a) e (b): N_e : 643.38 kN

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

$$\mathbf{N_{ey}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

N_{ey} : 643.38 kN

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. $K_y \cdot L_y$: 0.940 m

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y. I_y : 28.80 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexotorção:

$$\mathbf{N_{exz}} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - (x_0/r_0)^2\right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - (x_0/r_0)^2\right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}}\right]$$

N_{exz} : 43110.43 kN

Onde:

$$\mathbf{N_{ex}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2}$$

N_{ex} : 43110.43 kN

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X. $K_x \cdot L_x$: 0.500 m

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X. I_x : 546.00 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

$$\mathbf{N_{ez}} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J\right]$$

N_{ez} : ∞

Sendo:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção. $K_z \cdot L_z$: 0.000 m

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

C_w: Constante de empenamento da seção transversal. C_w : 1282.36 cm6

G: Módulo de elasticidade transversal do aço. G : 77000 MPa

J: Constante de torção da seção transversal. J : 2.74 cm4

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

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

r_0 : 6.77 cm

Onde:

r_x, r_y: Raios de giração em relação aos eixos principales X, Y, respectivamente. r_x : 5.94 cm; r_y : 1.36 cm

X_0, Y_0: Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principales X, Y, respectivamente. X_0 : -29.69 mm; Y_0 : 0.00 mm

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ 5.61 ≤ 15.84

Sendo:

(b / t): Relação entre largura e espessura. (b / t) : 5.61

Onde:

b: Largura. b : 48.80 mm

t: Espessura. t : 8.70 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$\mathbf{(b/t)_{lim}} = 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$(b/t)_{lim}$: 15.84

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ 26.47 ≤ 42.14

Sendo:

(b / t): Relação entre largura e espessura. (b / t) : 26.47

Onde:

b: Largura. b : 135.00 mm

t: Espessura. t : 5.10 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$(\mathbf{b/t})_{\mathbf{lim}} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$(b/t)_{lim}$: 42.14

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.002 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N63, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

M_{Sd}^-: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{Sd}^- < 0.01 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções: M_{Rd} : 2.87 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 2.87 kN·m

Onde:

W_y: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_y : 8.43 cm^3

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ 5.61 ≤ 10.75

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ M_{Rd} : 4.23 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$ l : 5.61

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida. b_f : 48.80 mm

t_f: Espessura da mesa comprimida. t_f : 8.70 mm

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ l_p : 10.75

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{M_{pl}} = Z \cdot f_y$$ M_{pl} : 4.65 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico. Z_y : 18.60 cm^3

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(c) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ 26.47 ≤ 31.68

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ M_{Rd} : 4.23 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$ l : 26.47

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. h : 135.00 mm

t_w: Espessura da alma. t_w : 5.10 mm

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ l_p : 31.68

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{M_{pl}} = Z \cdot f_y$$ M_{pl} : 4.65 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico. Z_y : 18.60 cm^3

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h < 0.001 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N63, para a combinação de ações 1.5·PP+TelhadoMetálico.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. — V_{Sd} : 0.04 kN

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

$\lambda \leq \lambda_p$ — 5.61 ≤ 34.08

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

V_{Rd} : 115.79 kN

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$

l : 5.61

Sendo:

b_f: Largura das mesas. — b_f : 48.80 mm

t_f: Espessura das mesas. — t_f : 8.70 mm

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

l_p : 34.08

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem. — k_v : 1.20

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 127.37 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = 2 \cdot b_f \cdot t_f$$

A_w : 8.49 cm²

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$\eta \leq 1$ h : 0.840 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.233 m do nó N63, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{c,Sd}$: 229.79 kN

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{x,Sd}^{-}$: 0.00 kN·m

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{y,Sd}^{-}$ < 0.01 kN·m

$N_{Sd} / N_{Rd} \geq 0.2$ 0.839 ≥ 0.200

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

h : 0.840

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3). $N_{c,Rd}$: 273.78 kN

$M_{x,Rd}$,$M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2). $M_{x,Rd}$: 19.15 kN·m $M_{y,Rd}$: 2.87 kN·m

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

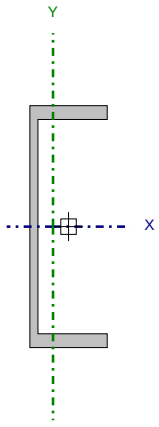
Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

Barra N54/N71

Perfil: U 152.4 x 5.1
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N54	N71	0.467	15.50	546.00	28.80	2.74	-9.78	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	2.01	1.07	0.00	0.00
L_K	0.940	0.500	0.000	0.000
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	NM_xM_y	T	NMVT	σ τ f	
N54/N71	λ ≤ 200.0 Passa	η = 78.0	η = 58.8	N.A.(1)	x: 0.467 m η = 2.8	x: 0.467 m η = 0.2	N.A.(2)	x: 0.467 m η = 80.4	N.A.(3)	N.A.(4)	N.A.(5)	PASSA h = 80.4

Notação:
l : Limitação do índice de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
NM_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados
T: Resistência à torção
NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante
s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(3) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*
(4) *Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.*
(5) *Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.*

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$\lambda \leq 200$ — l : 69.0 ✓

Onde:

l : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

l_x : 8.4
l_y : 69.0

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X. — $K_x \cdot L_x$: 0.500 m

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. — $K_y \cdot L_y$: 0.940 m

r_x, r_y: Raios de giração em relação aos eixos principales X, Y, respectivamente. — r_x : 5.94 cm; r_y : 1.36 cm

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

h : 0.780 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{t,Sd}$: 274.72 kN

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{t,Rd}$: 352.27 kN

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

h : 0.588 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações 1.5·PP+1.5·TelhadoMetálico+1.5·SobrecargaNormativa.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável. — $N_{c,Sd}$: 160.93 kN

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

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

$N_{c,Rd}$: 273.78 kN

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão. — c : 0.777

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

c : 0.777

Onde:

l_0: Índice de esbeltez reduzido.

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

l_0 : 0.776

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local. — Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra. — A_g : 15.50 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

N_e: Força axial de flambagem elástica. — N_e : 643.38 kN

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal monossimétrica, cujo eixo principal X é o eixo de simetria, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a) e (b): N_e : 643.38 kN

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

$$\mathbf{N_{ey}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

N_{ey} : 643.38 kN

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. $K_y \cdot L_y$: 0.940 m

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y. I_y : 28.80 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexotorção:

$$\mathbf{N_{exz}} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - (x_0/r_0)^2\right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - (x_0/r_0)^2\right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}}\right]$$

N_{exz} : 43110.43 kN

Onde:

$$\mathbf{N_{ex}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2}$$

N_{ex} : 43110.43 kN

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X. $K_x \cdot L_x$: 0.500 m

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X. I_x : 546.00 cm4

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

$$\mathbf{N_{ez}} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J\right]$$

N_{ez} : ∞

Sendo:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção. $K_z \cdot L_z$: 0.000 m

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

C_w: Constante de empenamento da seção transversal. C_w : 1282.36 cm6

G: Módulo de elasticidade transversal do aço. G : 77000 MPa

J: Constante de torção da seção transversal. J : 2.74 cm4

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

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

r_0 : 6.77 cm

Onde:

r_x, r_y: Raios de giração em relação aos eixos principales X, Y, respectivamente. r_x : 5.94 cm; r_y : 1.36 cm

X_0, Y_0: Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principales X, Y, respectivamente. X_0 : -29.69 mm; Y_0 : 0.00 mm

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ 5.61 ≤ 15.84

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 5.61

Onde:

b: Largura. b : 48.80 mm

t: Espessura. t : 8.70 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$\mathbf{(b/t)_{lim}} = 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$(b/t)_{lim}$: 15.84

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ 26.47 ≤ 42.14

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 26.47

Onde:

b: Largura. b : 135.00 mm

t: Espessura. t : 5.10 mm

$(b/t)_{lim}$: Relação limite entre largura e espessura.

$$(\mathbf{b/t})_{\mathbf{lim}} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$(b/t)_{lim}$: 42.14

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.028 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N71, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

M_{Sd}^-: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{Sd}^- : 0.08 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções: M_{Rd} : 2.87 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 2.87 kN·m

Onde:

W_y: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_y : 8.43 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ 5.61 ≤ 10.75

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ M_{Rd} : 4.23 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$ l : 5.61

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida. b_f : 48.80 mm

t_f: Espessura da mesa comprimida. t_f : 8.70 mm

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ l_p : 10.75

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{M_{pl}} = Z \cdot f_y$$ M_{pl} : 4.65 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico. Z_y : 18.60 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

(c) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ 26.47 ≤ 31.68

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ M_{Rd} : 4.23 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$ l : 26.47

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. h : 135.00 mm

t_w: Espessura da alma. t_w : 5.10 mm

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ l_p : 31.68

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{M_{pl}} = Z \cdot f_y$$ M_{pl} : 4.65 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico. Z_y : 18.60 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.002 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N71, para a combinação de ações
1.5·PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. — V_{Sd} : 0.20 kN

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

$\lambda \leq \lambda_p$ — 5.61 ≤ 34.08

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

V_{Rd} : 115.79 kN

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$

l : 5.61

Sendo:

b_f: Largura das mesas. — b_f : 48.80 mm

t_f: Espessura das mesas. — t_f : 8.70 mm

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

l_p : 34.08

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem. — k_v : 1.20

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 127.37 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = 2 \cdot b_f \cdot t_f$$

A_w : 8.49 cm²

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$\eta \leq 1$ h : 0.804 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N71, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd}$: 274.72 kN

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{x,Sd}^{-}$: 0.00 kN·m

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. $M_{y,Sd}^{-}$: 0.08 kN·m

$N_{Sd} / N_{Rd} \geq 0.2$ 0.780 ≥ 0.200

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

h : 0.804

Onde:

$N_{t,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2). $N_{t,Rd}$: 352.27 kN

$M_{x,Rd}$,$M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

$M_{x,Rd}$: 19.15 kN·m

$M_{y,Rd}$: 2.87 kN·m

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

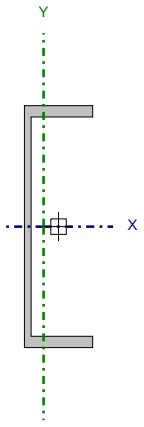
Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

Barra N11/N43

Perfil: U 203.2 x 5.6
Material: Aço (A-36 250Mpa)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
Inicial	Final		Área (cm²)	I_x (1) (cm4)	I_y (1) (cm4)	I_t (2) (cm4)	x_g (3) (mm)	y_g (3) (mm)
N11	N43	7.500	21.68	1344.30	54.10	4.36	-12.59	0.00

Notas:
(1) *Inércia em relação ao eixo indicado*
(2) *Momento de inércia à torção uniforme*
(3) *Coordenadas do centro de gravidade*

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	1.00	1.00	0.50	0.50
L_K	7.500	7.500	3.750	3.750
C_b	-		1.000	

Notação:
b: Coeficiente de flambagem
L_K: Comprimento de flambagem (m)
C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	NM_xM_y	T	NMVT	σ τ f	
N11/N43	N.A.(1)	N.A.(2)	N.A.(3)	x: 3.75 m η = 77.3	N.A.(4)	N.A.(5)	x: 0 m η = 4.2	N.A.(6)	N.A.(7)	N.A.(8)	N.A.(9)	PASSA h = 77.3

Notação:
l : Limitação do índice de esbeltez
N_t: Resistência à tração
N_c: Resistência à compressão
M_x: Resistência à flexão eixo X
M_y: Resistência à flexão eixo Y
V_x: Resistência ao esforço cortante X
V_y: Resistência ao esforço cortante Y
NM_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados
T: Resistência à torção
NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante
s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção
x: Distância à origem da barra
h: Coeficiente de aproveitamento (%)
N.A.: Não aplicável

Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.A.):
(1) *A verificação não procede, já que não há força axial de compressão.*
(2) *A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração.*
(3) *A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.*
(4) *A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.*
(5) *A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.*
(6) *Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.*
(7) *A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.*
(8) *Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.*
(9) *Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.*

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

A verificação não procede, já que não há força axial de compressão.

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.773 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.750 m do nó N11, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

M_{Sd}^{+}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. — M_{Sd}^{+} : 12.20 kN·m

Já que '$\lambda \leq \lambda_r$', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G). — 32.89 ≤ 161.22

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

l : 32.89

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. — h : 184.20 mm

t_w: Espessura da alma. — t_w : 5.60 mm

$$\lambda_r = 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

l_r : 161.22

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções: — M_{Rd} : 15.78 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 45.11 kN·m

Onde:

W_x: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. — W_x : 132.31 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda > \lambda_r$ — 237.39 > 186.56

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

M_{Rd} : 15.78 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

l : 237.39

Sendo:

$L_{b,sup}$: Distância entre pontos travados à flambagem lateral. — $L_{b,sup}$: 3.750 m

r_y: Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão. — r_y : 1.58 cm

$$\lambda_r = \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}}$$

l_r : 186.56

Sendo:

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y. — I_y : 54.10 cm4

J: Constante de torção da seção transversal. — J : 4.36 cm4

C_w: Constante de empenamento da seção transversal. — C_w : 4359.75 cm6

$$\beta_1 = \frac{M_r}{E \cdot J}$$ — b_1 : 0.027 cm-1

$$M_r = W \cdot (f_y - \sigma_r)$$ — M_r : 23.15 kN·m

Sendo:

W_x: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. — W_x : 132.31 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

$$\sigma_r = 0.30 \cdot f_y$$ — s_r : 75.00 MPa

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + 0.039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w}\right)}$$ — M_{cr} : 17.36 kN·m

Sendo:

C_b: Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme. — C_b : 1.00

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$ — M_{pl} : 38.28 kN

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico. — Z_x : 153.13 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ — 6.04 ≤ 10.75

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ — M_{Rd} : 34.80 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f}$$ — l : 6.04

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida. — b_f : 57.40 mm

t_f: Espessura da mesa comprimida. — t_f : 9.50 mm

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ — l_p : 10.75

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$ — M_{pl} : 38.28 kN

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico. — Z_x : 153.13 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$\lambda \leq \lambda_p$ — 32.89 ≤ 106.35

$$\mathbf{M_{Rd}} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$ M_{Rd} : *34.80* kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$ l : *32.89*

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. h : *184.20* mm

t_w: Espessura da alma. t_w : *5.60* mm

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$ l_p : *106.35*

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : *200000* MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : *250.00* MPa

$$\mathbf{M_{pl}} = Z \cdot f_y$$ M_{pl} : *38.28* kN

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico. Z_x : *153.13* cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : *250.00* MPa

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. g_{a1} : *1.10*

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

h : 0.042 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N11, para a combinação de ações PP+TelhadoMetálico+1.4·VentoSotavento90°esquerda.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. — V_{Sd} : 6.51 kN

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

$\lambda \leq \lambda_p$ — 32.89 ≤ 69.57

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

V_{Rd} : 155.17 kN

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

l : 32.89

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. — h : 184.20 mm

t_w: Espessura da alma. — t_w : 5.60 mm

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

l_p : 69.57

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem. — k_v : 5.00

E: Módulo de elasticidade do aço. — E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. — f_y : 250.00 MPa

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 170.69 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = d \cdot t_w$$

A_w : 11.38 cm²

d: Altura total da seção transversal. — d : 203.20 mm

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. — g_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.