

MEMORIAL DE CÁLCULO

7º CONCURSO CBCA PARA
ESTUDANTES DE ENGENHARIA 2025

Tema:

**Treliças Planas de Aço
para Coberturas**

Realização:



Correalização:

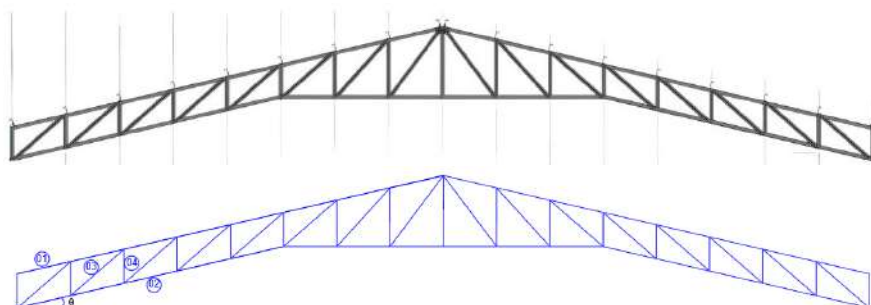


DESCRIÇÃO DO PROJETO

O projeto refere – se a uma treliça plana de cobertura de um ginásio poliesportivo, juntamente com terças, tirantes, sistema de contraventamento, sistema de travamento e ligações.

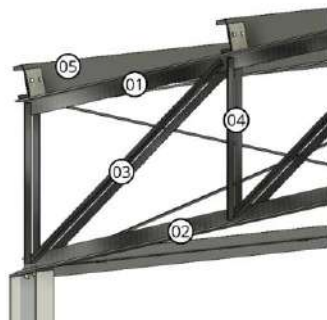
Como pode ser visto nas figuras a seguir, o projeto da treliça é composto por:

Figura 1 - Tipologia da treliça



Fonte: Autores, 2025.

Figura 2 - Vista 3D dos elementos da treliça



Fonte: Autores, 2025.

01: Banzo superior: Perfil WT 100x17,95. Massa linear: 17,95kg/m.

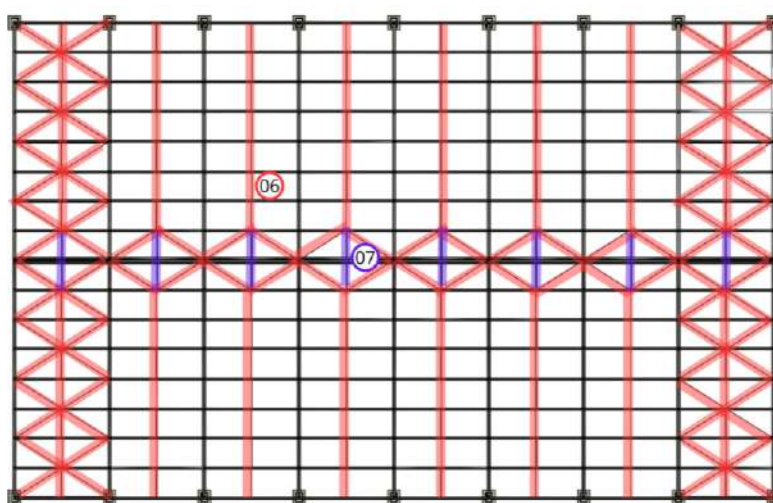
02: Banzo inferior: Perfil WT 100x17,95. Massa linear: 17,95kg/m.

03: Diagonais: Perfil L50,8x4,76 dispostas em “X”. Massa linear: 3,63kg/m.

04: Montante: Perfil L50,8x4,76 dispostas em “X”. Massa linear: 3,63kg/m.

05: Terças: Perfil U 200x75x25x2,65x7,75. Massa linear: 7,75 kg/m.

Figura 3 - Contraventamento Cobertura

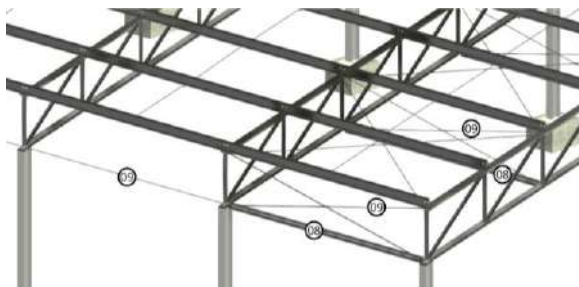


Fonte: Autores, 2025.

06: Tirantes: Barra rosqueada Ø 12,5 mm. Massa linear: 0,96 kg/m.

07: Escora entre terça e cumeeira: Perfil L44,45x3,17. Massa linear: 2,14 kg/m.

Figura 4 - Travamento banzo inferior a cada dois nós



Fonte: Autores, 2025.

08: Escora do banzo inferior: Perfil L 63,5x4,76 dispostas em “X”. Massa linear: 4,57 kg/m.

09: Travamento Banzo inferior: Barra rosqueada Ø 12,5 mm. Massa linear: 0,96 kg/m.

As ligações soldadas são feitas em fábrica e as ligações parafusadas são feitas em obra, inclusive a montagem dos 3 módulos da treliça metálica, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Separação da treliça



Fonte: Autores, 2025.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão apresentados os parâmetros f_y (resistência ao escoamento do aço) e f_u (resistência à ruptura do aço) padronizados para o dimensionamento das chapas e perfis do projeto, conforme edital do 7º Concurso CBCA (CBCA, 2025).

Tabela 1 – Perfil: f_y e f_u

Perfil e chapa	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Laminados e soldados	345	450
Tubulares e formados a frio	250	400

Fonte: Autores, 2025.

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros f_y (resistência ao escoamento do aço) e f_u (resistência à ruptura do aço) para o dimensionamento das ligações parafusadas e soldadas no projeto.

Tabela 2 – Parafusos e soldas: f_y e f_u

Parafusos e soldas	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_w (MPa)
Parafusos	635	830	-
Solda	-	-	485

Fonte: Autores, 2025.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipologia da treliça	2
Figura 2 - Vista 3D dos elementos da treliça	2
Figura 3 - Contraventamento Cobertura	3
Figura 4 - Travamento banzo inferior a cada dois nós	4
Figura 5 - Separação da treliça	4
Figura 6 - Treliça projetada	13
Figura 7 - Geometria da Treliça	14
Figura 8 - Espaçamento entre as terças e as treliças	28
Figura 9 - Determinação das cotas de referência da estrutura	30
Figura 10 - Coeficiente de pressão externa para telhados de duas águas	35
Figura 11 - Coeficiente de pressão externa média para telhados de duas águas	35
Figura 12 - Coeficientes de pressão interna	38
Figura 13 - Combinações para verificação nas terças	39
Figura 14 - Combinações para dimensionamento da treliça (C_{pe} - C_{pi})	40
Figura 15 - Área de influência	41
Figura 16 – Hipótese I	42
Figura 17 – Hipótese II	42
Figura 18 – Hipótese III	43
Figura 19 – Hipótese IV	43
Figura 20 - Área de influência da terça	60
Figura 21 - Esquema de carregamentos na terça para a 1º combinação eixo “y”	64
Figura 22 – Diagrama de esforço cortante na terça para a 1º combinação eixo “y”	65
Figura 23 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 1º combinação eixo “y”	65
Figura 24 - Esquema de carregamentos na terça para a 1º combinação eixo “x”	65
Figura 25 – Esforços cortantes na terça para a 1º combinação no eixo “x”	66
Figura 26 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 1º combinação no eixo “y”	66
Figura 27 - Esquema de carregamentos na terça para a 2º combinação no eixo “y”	67
Figura 28 – Esforços cortantes na terça para a 2º combinação no eixo “y”	67
Figura 29 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 2º combinação no eixo “y”	67
Figura 30 - Esquema de carregamentos na terça para a 2º combinação no eixo “y”	68
Figura 31 – Esforços cortantes na terça para a 2º combinação no eixo “y”	68
Figura 32 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 2º combinação no eixo “y”	68
Figura 33 - Esquema de carregamentos na terça para a 3º combinação no eixo “x”	69
Figura 34 – Esforços cortantes na terça para a 3º combinação no eixo “x”	69
Figura 35 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 3º combinação eixo “x”	69
Figura 36 - Esquema de carregamentos na terça para a 3º combinação no eixo “y”	70
Figura 37 – Esforços axiais na terça para a 3º combinação no eixo “y”	70
Figura 38 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 3º combinação no eixo “y”	70

Figura 39 - Exemplo de configuração de terças e sua disposição sobre a cobertura	71
Figura 40 – Imagem para análise da flexão em torno do eixo X	72
Figura 41 - Coeficiente de flambagem local k_l para a seção completa em barras sob flexão simples	72
Figura 42 - MA, MB e MC para cálculo de C_b	72
Figura 43 - Forças normais e momentos fletores críticos	72
Figura 44 - Imagem para análise da flexão em torno do eixo Y	72
Figura 45 - Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção	72
Figura 46 - Imagem para análise do cisalhamento no eixo X e no eixo Y	73
Figura 47 - Características do perfil U enrijecido	73
Figura 48 - Coeficiente de flambagem local k_l para a seção completa em barras sob compressão centrada	75
Figura 49 - Forças normais e momentos fletores críticos	76
Figura 50 - Deslocamentos Máximos nas terças	77
Figura 51 - Espaçamento entre as terças e as treliças	78
Figura 52 - Indicação do sentido de atuação de $F_{ser, x}$ e $F_{ser, y}$	79
Figura 53 - Indicação do sentido dos deslocamentos	80
Figura 54 - Linha de corrente da cobertura	81
Figura 55 - Sistema de tirantes flexíveis nas terças	83
Figura 56 - Carga atuante nos tirantes da cobertura ao longo do eixo	84
Figura 57 - Áreas de influência de cada terça	84
Figura 58 - Representação da terça T1 obtida pelo FTOOL	86
Figura 59 - Disposição do tirante T2	86
Figura 60 - Esquema de análise da pressão de contato	90
Figura 61 – Análise no ftool do perfil da terça	91
Figura 62 - Esquema de contraventamento	92
Figura 63 - Vista frontal para análise do sistema de contraventamento da cobertura	93
Figura 64 - Análise do contraventamento	94
Figura 65 - Sistema de travamento lateral do banzo inferior	97
Figura 66 - Vista lateral do sistema de travamento lateral	99
Figura 67 - Apoio da treliça	105
Figura 68 - Ligação segundo gênero treliça-pilar	106
Figura 69 - Disposição dos furos	107
Figura 70 - Geometria para a verificação da placa rígida	107
Figura 71 - Disposição dos furos	110
Figura 72 - Categorias de corrosividade atmosférica e exemplos de ambientes	118
Figura 73 - Sistema de pintura adequado da GERDAU	119
Figura 74 - Posição de içamento da treliça. Sem escala. Desenho ilustrativo	121
Figura 75 - Treliça plana durante etapa de montagem - a) Modelo de cálculo no ftool e b) esforços normais de tração (positivo) e compressão (negativo). Unidades em kN	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perfil: f_y e f_u	5
Tabela 2 – Parafusos e soldas: f_y e f_u	5
Tabela 3 – Resumo das ações permanentes.....	27
Tabela 4 - Resumo das ações variáveis	28
Tabela 5 - Parâmetros para o cálculo da ação do vento adotados neste projeto	29
Tabela 6 - Parâmetros meteorológicos	31
Tabela 7 - Fator de rajada	32
Tabela 8 - Valores mínimos do fator estatístico S_3	32
Tabela 9 - Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular $a \times b$, sendo b a menor dimensão	34
Tabela - Perfil U de chapa dobrada enrijecida - adotado.....	60
Tabela 11 - Tabela resumo dos esforços na terça	64
Tabela - Resumo dos momentos e cortantes encontrados nas terças.....	71
Tabela - Resumo das verificações para flexão nas terças	71
Tabela - Resumo das verificações para cisalhamento nas terças	73
Tabela - Força de compressão resistente de cálculo nas terças	73
Tabela 16 - Coeficientes para cálculo de F_{Rd} em perfil U enrijecido (com $h/t \leq 200$, $c/t \leq 210$, $c/h \leq 2,0$ e $\theta = 90^\circ$).....	77
Tabela - Resumo de deslocamentos máximos nas terças	77
Tabela - Perfis e esforços atuantes na linha de corrente da cobertura.....	82
Tabela - Cantoneira de abas iguais L 44,45 mm \times 3,17 mm.....	88
Tabela - Perfis e esforços atuantes no travamento lateral	98
Tabela - Cantoneira de abas iguais L 63,50 mm \times 4,76 mm.....	100
Tabela - Dimensão máxima de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas...	106
Tabela - Dimensão máxima de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas...	110
Tabela 24 - Consumo total de aço	115
Tabela 25 - Índices de consumo de aço (kg/m^2)	116

SUMÁRIO

DESCRIÇÃO DO PROJETO	1
1. INTRODUÇÃO	13
2. NORMAS UTILIZADAS	13
3. ANÁLISE DA ESCOLHA DA GEOMETRIA E PERFIS.....	14
3.1. TIPO DE TRELIÇA ADOTADA	14
3.2. ESCOLHA DA INCLINAÇÃO DA TRELIÇA	15
3.3. DISTÂNCIA ENTRE BANZOS.....	17
3.4. NÚMERO DE DIVISÕES	18
3.5. DESENHO DA TRELIÇA (RIGIDEZ CENTEAL E AUSÊNCIA DE TIRANTE) 20	
3.6. PERFIS ESCOLHIDOS	21
4. CÁLCULO ESTRUTURAL.....	24
4.1. AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA	26
4.1.1. AÇÕES PERMANENTES.....	26
4.1.2. AÇÕES VARIÁVEIS.....	28
4.1.2.1. AÇÃO VARIÁVEL ACIDENTAL	28
4.1.2.2. AÇÃO VARIÁVEL DE UTILIZAÇÃO	28
4.1.2.3. AÇÃO VARIÁVEL DEVIDO AO VENTO	28
4.2. COMBINAÇÕES DAS AÇÕES	44
4.2.1. COMBINAÇÃO PARA ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU).....	44
4.3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS	45
4.3.1. DIAGONAL E MONTANTE	45
4.3.2. BANZOS.....	55
4.3.3. TERÇA	59
4.3.3.1. DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS	71
4.3.3.2. VERIFICAÇÃO DE FLEXÃO NAS TERÇAS	71
4.3.3.2.1. VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE PARA O INÍCIO DE ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA PARA O EIXO X ($M_{Rd, ex}$)	72

4.3.3.2.2. VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE PARA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO PARA O EIXO X (MRd, FLT_x)	72
4.3.3.2.3. VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE PARA FLAMBAGEM DISTORCIONAL PARA O EIXO X (MRd, FLT_x).....	72
4.3.3.2.4. VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE PARA O INÍCIO DE ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA PARA O EIXO Y (MRd, ey).....	72
4.3.3.2.5. VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE PARA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO PARA O EIXO Y (MRd, FLT_y).....	72
4.3.3.3. VERIFICAÇÃO DE CISALHAMENTO NAS TERÇAS	72
4.3.3.3.1. VERIFICAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO NO EIXO Y (VR, dy).....	73
4.3.3.3.2. VERIFICAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO NO EIXO X (VR, dx).....	73
4.3.3.4. VERIFICAÇÃO DE COMPRESSÃO NAS TERÇAS.....	73
4.3.3.4.1. VERIFICAÇÃO DA FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DE CÁLCULO PARA FLAMBAGEM GLOBAL POR FLEXÃO, POR TORÇÃO OU POR FLEXO-TORÇÃO (Nc, Rd, FT)	74
4.3.3.4.2. VERIFICAÇÃO DA FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DE CÁLCULO PARA FLAMBAGEM DISTORCIONAL ($Nc, Rd, dist$).....	76
4.3.3.4.3. VERIFICAÇÃO DE BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO COMPOSTA	77
4.3.3.5. VERIFICAÇÃO DA DISPENSA DE ENRIJECEDOR NAS TERÇAS	77
4.3.3.6. VERIFICAÇÃO DO DESLOCAMENTO MÁXIMO VERTICAL NAS TERÇAS	77
4.3.4. LINHA DE CORRENTE	81
4.3.4.1. TIRANTE FLEXÍVEL	83
4.3.4.2. ESCORA	87
4.3.5. TIRANTES DE CONTRAVENTAMENTO DA COBERTURA.....	92
4.3.6. SISTEMA DE TRAVAMENTO LATERAL DO BANZO INFERIOR	97
4.4. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES.....	105
4.4.1. LIGAÇÃO ENTRE TRELIÇA E PILAR	105
4.4.1.1. APOIO DE SEGUNDO GÊNERO	105
4.4.1.1.1. DISPOSIÇÃO CONSTRUTIVA	106

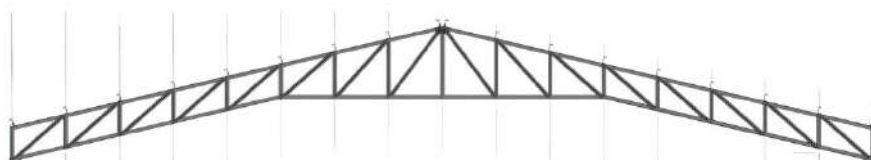
4.4.1.1.2.	DIMENSIONAMENTO DE PARAFUSOS – TRAÇÃO	108
4.4.1.1.3.	DIMENSIONAMENTO DE PARAFUSOS – CISALHAMENTO	108
4.4.1.1.4.	DIMENSIONAMENTO DE PARAFUSOS – TRAÇÃO E CISALHAMENTO COMBINADO	109
4.4.1.1.5.	DIMENSIONAMENTO DA PRESSÃO DE CONTATO EM FUROS NA MESA DO PERFIL WT	109
4.4.1.2.	APOIO DE PRIMEIRO GÊNERO	110
4.4.2.	LIGAÇÃO ENTRE MONTANTE, DIAGONAL E BANZOS	110
4.4.3.	LIGAÇÃO ENTRE TERÇA E BANZO SUPERIOR	111
4.4.4.	ENTRE SEGMENTOS DA TRELIÇA	111
4.4.4.1.	ESFORÇOS SOLICITANTES	111
4.4.4.2.	DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS	111
	APOIO DE PRIMEIRO GÊNERO	111
4.4.4.3.	PARAFUSOS A TRAÇÃO	112
4.4.4.4.	PARAFUSOS AO CISALHAMENTO	112
4.4.4.5.	PARAFUSOS AO CISALHAMENTO E TRAÇÃO	112
4.4.4.6.	PRESSÃO DE CONTATO EM FUROS NA CHAPA	113
4.4.4.7.	RASGAMENTO NA CHAPA	113
4.4.4.8.	CISALHAMENTO NA CHAPA	114
4.4.4.9.	TRAÇÃO NA CHAPA	114
4.4.4.10.	FLEXÃO NA CHAPA	114
4.4.4.11.	SOLDA DOS PERFIS	114
5.	CONCLUSÃO TÉCNICA	115
5.1.	ESTIMATIVA DO CONSUMO TOTAL DE AÇO ESTRUTURAL PARA A ESTRUTURA DE COBERTURA E PLANILHA COM ÍNDICES DE CONSUMO DE AÇO (KG/M³)	115
5.2.	COMENTÁRIOS SOBRE O COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM CASO DE INCÊNDIO	116
5.3.	COMENTÁRIOS SOBRE A MANUTENÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA	116
5.4.	VANTAGENS DO USO DO AÇO ESTRUTURAL NO PROJETO DESENVOLVIDO	119

5.5. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA APLICADA À COBERTURA METÁLICA COM TRELIÇAS PLANAS	120
5.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O IÇAMENTO DA TRELIÇA NA ETAPA DE MONTAGEM.....	121
REFERÊNCIAS	124
APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES	127

1. INTRODUÇÃO

Este memorial de cálculo é parte integrante do projeto estrutural da **treliça plana de aço para cobertura de um ginásio**, concorrente do **7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia 2025**. Abrange o dimensionamento de treliças planas, terças, tirantes, sistema de contraventamento e ligações. Além disso, o detalhamento técnico é apresentado para assegurar que a fabricação, o transporte e a montagem da estrutura ocorram de forma eficiente. Na Figura abaixo é apresentada a treliça projetada.

Figura 6 - Treliça projetada



Fonte: Autores, 2025.

O presente projeto segue rigorosamente as diretrizes das principais normas técnicas brasileiras aplicáveis, que asseguram a segurança, funcionalidade e durabilidade do projeto. A análise das ações atuantes na treliça plana considerou fatores como peso próprio, ações do vento, sobrecargas acidentais e de utilização.

2. NORMAS UTILIZADAS

- ABNT NBR 6120/2019 – Cargas para o cálculo de estruturas em edificações
- ABNT NBR 6123/2023 – Forças devidas ao vento em edificações
- ABNT NBR 8800/2024 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações
- ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

3. ANÁLISE DA ESCOLHA DA GEOMETRIA E PERFIS

3.1. TIPO DE TRELIÇA ADOTADA

A escolha pela tipologia de treliça com banzos parcialmente paralelos e rigidez aumentada no centro se justifica pela combinação entre desempenho estrutural adequado e racionalidade construtiva. Diferentemente de outras geometrias mais complexas, a treliça com banzos paralelos apresenta repetição modular de seus elementos, o que facilita significativamente o processo de fabricação em oficina e montagem em campo. Essa padronização reduz o número de cortes especiais, simplifica as ligações e contribui para maior rapidez na execução, minimizando custos e potenciais erros durante a construção.

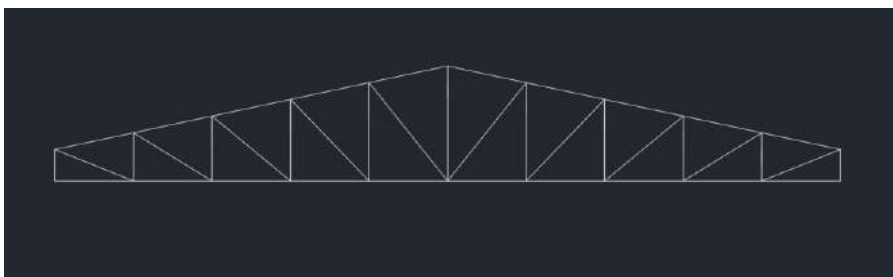
Figura 7 - Geometria da Treliça



Fonte: Autores, 2025.

Do ponto de vista estrutural, os banzos parcialmente paralelos com rigidez central proporcionam boa rigidez global, garantindo adequada redistribuição dos esforços atuantes e maior eficiência no comportamento frente às cargas verticais de cobertura e ações do vento. Essa configuração permite ainda melhor compatibilidade com a disposição das terças e com a cobertura em painéis sanduíche, otimizando o desempenho da estrutura como um todo. Dessa forma, a escolha dessa tipologia representa uma solução equilibrada, que alia segurança e eficiência estrutural a ganhos práticos de execução, mostrando-se adequada ao atendimento das exigências do concurso e às boas práticas da engenharia metálica.

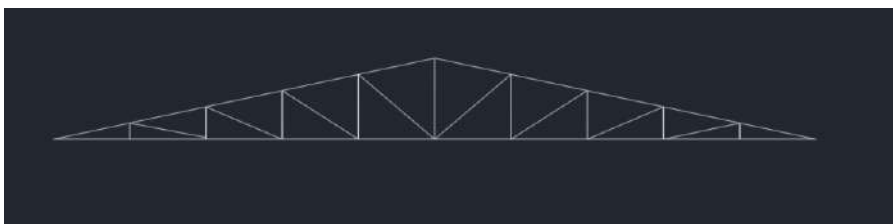
Figura 9 – Treliça trapezoidal



Fonte: Autores, 2025.

Figura 9 – Treliça triangular

Figura 8 - Treliça triangular



Fonte: Autores, 2025.

3.2. ESCOLHA DA INCLINAÇÃO DA TRELIÇA

Neste projeto, optou-se pela adoção da inclinação de 13° para a tesoura metálica principal, decisão fundamentada nos resultados obtidos por Ribeiro *et al.* (2025), que investigaram de forma detalhada a relação entre a geometria da treliça e o desempenho estrutural com foco no consumo racional de aço.

Figura 9 - Inclinação da treliça



Fonte: Autores, 2025.

O artigo de Ribeiro *et al.* (2025) avaliou, por meio de simulações com o Método dos Elementos Finitos (MEF), a influência do comprimento do montante vertical de extremidade sobre a redistribuição de esforços e sobre a massa total de aço consumida em treliças do tipo Howe, com vão de 24 metros e inclinação inicial de 10% no banzo superior. Foram realizadas 21 simulações numéricas, começando com a simulação de uma treliça sem montante de canto até simulações com a distância de 1 metro entre banzos, com o objetivo de compreender como pequenas modificações geométricas poderiam impactar o consumo de aço. Os resultados demonstraram que ajustes geométricos aparentemente simples produzem efeitos significativos: verificou-se uma redução de até 52% na massa total de aço entre as situações extremas de comprimento do montante, evidenciando o impacto direto da geometria sobre a eficiência estrutural.

A análise revelou que inclinações muito reduzidas dos banzos superiores, associadas a montantes de pequena altura, tendem a concentrar esforços excessivos nas diagonais próximas às extremidades, exigindo perfis mais robustos e, portanto, maior consumo de aço. Além disso, Ribeiro *et al.* (2025) destacam que a introdução de diagonais pouco inclinadas gera concentrações de esforços e instabilidades locais, o que compromete a eficiência global da treliça. Por outro lado, quando o comprimento do montante e a inclinação da tesoura são aumentados, observa-se uma redistribuição mais equilibrada dos esforços, com redução dos esforços axiais nos banzos e diagonais, permitindo a utilização de perfis mais leves e otimizando a estrutura como um todo.

A escolha da inclinação de 13° se mostra, portanto, a mais adequada para este projeto, pois situa-se em um patamar superior ao valor mínimo adotado em projetos convencionais (entre 8° e 10°), oferecendo vantagens tanto estruturais quanto funcionais. Primeiramente, garante uma melhor eficiência na redistribuição das forças internas, reduzindo solicitações críticas e permitindo a utilização de seções metálicas mais econômicas. Em segundo lugar, a inclinação de 13° proporciona melhores condições de escoamento de águas pluviais, mitigando o risco de sobrecargas localizadas por acúmulo de água na cobertura, o que contribui para a durabilidade do sistema.

Portanto, a adoção da inclinação de 13° para a tesoura metálica projetada neste memorial constitui a decisão mais racional e fundamentada. Tal escolha promove:

Otimização estrutural, ao reduzir esforços internos críticos e permitir seções mais econômicas;

Racionalidade construtiva, ao favorecer detalhes executivos mais simples e compatíveis com a industrialização da construção metálica;

Eficiência funcional, ao melhorar o desempenho da cobertura quanto ao escoamento de águas pluviais e durabilidade;

Compromisso ambiental, ao reduzir o volume de aço empregado, alinhando-se às diretrizes globais de sustentabilidade.

3.3. DISTÂNCIA ENTRE BANZOS

A definição da distância entre os banzos superior e inferior é um dos parâmetros geométricos mais relevantes no desempenho global de uma treliça metálica. Tal escolha interfere diretamente na distribuição interna de esforços, na esbeltez dos elementos comprimidos e, sobretudo, no consumo de aço, que é o principal indicador de racionalidade estrutural em projetos de coberturas metálicas. Neste trabalho, adotou-se o valor de 1,00 m para essa distância, decisão que se justifica técnica e cientificamente com base no estudo de Rezende *et al.* (2024). Por outro lado, o aumento da altura entre banzos proporciona diagonais mais inclinadas e uma redistribuição mais equilibrada dos esforços, reduzindo as forças críticas nos banzos e permitindo a utilização de seções mais leves em diversos elementos da treliça.

Figura 10 - Distância entre banzos



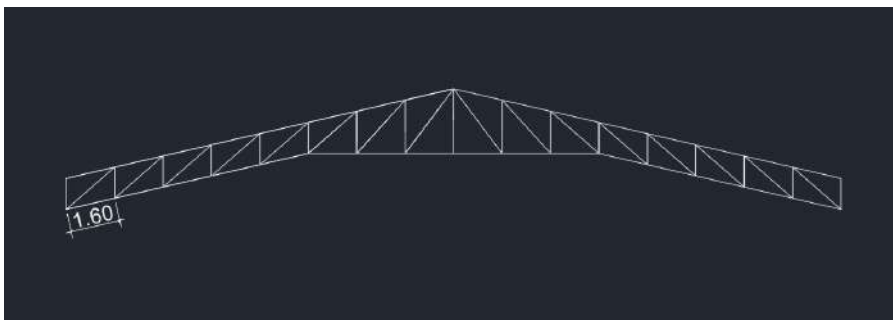
Fonte: Autores, 2025.

No caso específico da adoção de 1,00 m, observa-se que esse valor representa um ponto de equilíbrio entre duas necessidades distintas: de um lado, reduzir as solicitações internas nos banzos e diagonais; de outro, evitar o alongamento excessivo dos montantes, que poderia comprometer sua estabilidade por flambagem.

3.4. NÚMERO DE DIVISÕES

Para o presente projeto foi decidida a divisão entre 16 partes menores na estrutura da treliça, com 1,6m de distância entre terças. Essa escolha se deve ao fato de que a divisão será encontrada nos nós da estrutura, onde as terças irão se localizar, porém por uma limitação da distância de 2 metros entre esses perfis o número de divisões mínimas da estrutura teria de ser 13. Porém, para um número ímpar de divisões a estrutura perderia a equidistância entre as terças metálicas, dificultando a montagem das peças.

Figura 11 - Distância entre terças de projeto



Fonte: Autores, 2025.

No entanto, as 14 divisões ideais para o projeto não seriam possíveis, uma vez que o comprimento das diagonais aumentaria, e por consequência, a esbeltez do elemento também. Será verificado no cálculo a compressão dos elementos que o limite de esbeltez para peças comprimidas é da ordem de 200, e para 14 divisões o menor perfil L (perfil utilizado para diagonais e montantes, que será explicado em um tópico mais adiante) que atenderia a esse critério possuiria uma aba muito grande para utilizar a alma do perfil WT como ligação, precisando de uma chapa para ligar os elementos estruturais, o que encareceria a obra, aumentaria o peso da estrutura e dificultaria a montagem.

Figura 12- Distância entre terças para 14 divisões



Fonte: Autores, 2025.

Figura 13- Distância entre terças para 18 divisões



Fonte: Autores, 2025.

Finalmente, chega-se à conclusão de que a melhor divisão da estrutura seria em 16 partes menores, pois atenderia a todos os critérios admitidos: perfis leves e baratos para sua construção, distância entre terças atendidas e melhor eficiência estrutural.

3.5. DESENHO DA TRELIÇA (RIGIDEZ CENTEAL E AUSÊNCIA DE TIRANTE)

Com angulação, distância entre banzos e número de divisões definidos, a geometria da treliça está quase totalmente determinada. No entanto, a escolha dos montantes e diagonais foi definida de forma a dispor os montantes em todos os nós da estrutura, para garantir o travamento entre os banzos, e as diagonais saindo do banzo superior do sentido do centro da treliça para o banzo inferior no sentido da extremidade da estrutura. Essa disposição garante que esses elementos apresentem maiores esforços de tração em relação a esforços de compressão, o que é extremamente preferível em estruturas de aço, já que a sua resistência para essas cargas é maior, além do perfil sofrer menos com problemas gerados pela esbeltez.

Figura 14- Geometria de projeto



Fonte: Autores, 2025.

FIGURA XX – Geometria que favorece esforços de compressão nos montantes e diagonais



Fonte: Autores, 2025.

Também foi definido que na parte central da estrutura haverá uma parte onde não haverá a geometria de banzos paralelos, aumentando a rigidez central da estrutura. Essa escolha se baseia em: diminuir o deslocamento na parte mais crítica da estrutura e dispensar a utilização de tirantes metálicos para a treliça, aumentando sua segurança e a circulação no nível em que ficaria esse tirante (uma vez que o galpão é um ginásio poliesportivo, haverá movimentação de

bolas de futsal, vôlei, etc. na altura desse tirante, o que pode atrapalhar a experiência das pessoas que utilizam esse espaço), além de ser esteticamente mais favorecido.

Figura 15- Tirante para estrutura com banzos integralmente paralelos



Fonte: Autores, 2025.

3.6. PERFIS ESCOLHIDOS

Para diagonais e montantes, o perfil escolhido será o de cantoneira, enquanto para os banzos a escolha foi o perfil WT.

Figura 16 - Perfis para tesoura metálica

PERFIL ESCOLHIDO	LOCAIS DE APLICAÇÃO

Fonte: Autores, 2025.

O perfil L foi escolhido por suportar principalmente cargas axiais, que são os esforços que são determinantes para a estrutura, e ser leve e barato. A sua disposição será não convencional, pois embora as cantoneiras ajam em dupla na estrutura, a forma com que serão

soldadas e dispostas será em forma de cruz, ao contrário da forma de T ou C que usualmente são utilizadas. A essa escolha deve-se ao fato de facilitar a manutenção e possível pintura entre esses elementos, ao contrário do perfil em forma de T, que dificulta a manutenção entre as abas internas das cantoneiras, e dessa forma não criará uma forma côncava, ao contrário do perfil em forma de C, que poderia prender alguma bola de futsal, vôlei, basquete etc. o que melhoraria a experiência do usuário.

É válido o destaque para escolha da disposição geométrica dos perfis L no presente projeto, onde foi determinada a solução para cantoneiras formando uma cruz, ao invés da habitual solução em forma de T. Há dois bons motivos para essa escolha: construtivo, pois a manutenção e pintura das cantoneiras estariam dificultadas na região entre as abas internas entre perfis, e estrutural, pois essa geometria permite um maior raio de giração em perfis compostos que se localizam nas diagonais da região central da treliça, aumentando sua resistência à compressão e diminuindo a esbeltez do perfil, ao contrário da solução convencional que aumentaria o raio de giração de apenas um único eixo.

Figura 17 - Notícia sobre acidentes em coberturas metálicas

Adolescente sobe em teto de quadra para tirar bola, não consegue descer

Por Redação Correio Online - Publicado às 09:13 em 16/01/24



Fonte: Correio Online, 2024.

<https://correioonline.com/adolescente-sobe-em-teto-de-quadra-para-tirar-bola-nao-consegue-descer>

Reportagem sobre acidente em coberturas metálicas

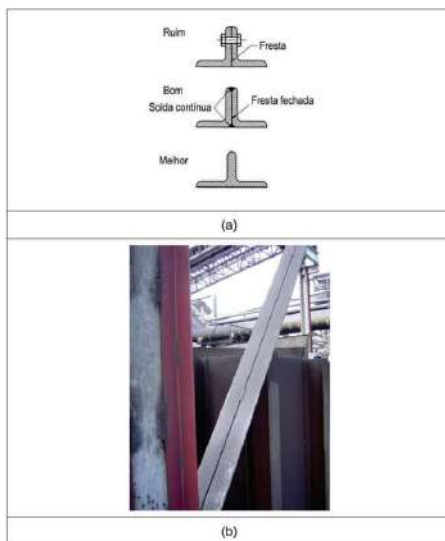


Fonte: TV ARAPUAN, 2023.



Além disso, as diagonais da parte central da treliça serão formadas por perfis compostos, e essa geometria aumentaria o raio de giração nos dois eixos em comparação ao perfil individual, o que aumentaria consideravelmente a sua resistência.

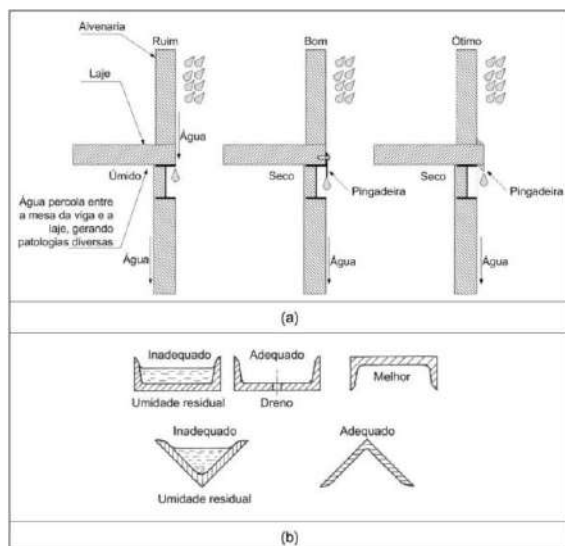
Perfis compostos com problema de manutenção



Fonte: CBCA, 2017.

O perfil WT foi escolhido por possuir uma rigidez muito maior que os perfis do tipo C presentes no mercado, possibilitando o sistema de travamento a cada 2 nós, que não seria possível com o referido perfil formado a frio devido ao seu pequeno raio de giração. Além disso, é mais leve que os perfis I presentes no mercado, e já seria suficiente para suportar problemas de resistência e esbelteza que o projeto necessita. O fato de a ligação com as cantoneiras poder ser feita na alma do perfil também é um diferencial, pois não precisaria se utilizar chapas para fazer a ligação com as diagonais e montantes.

Banzos com problema de manutenção



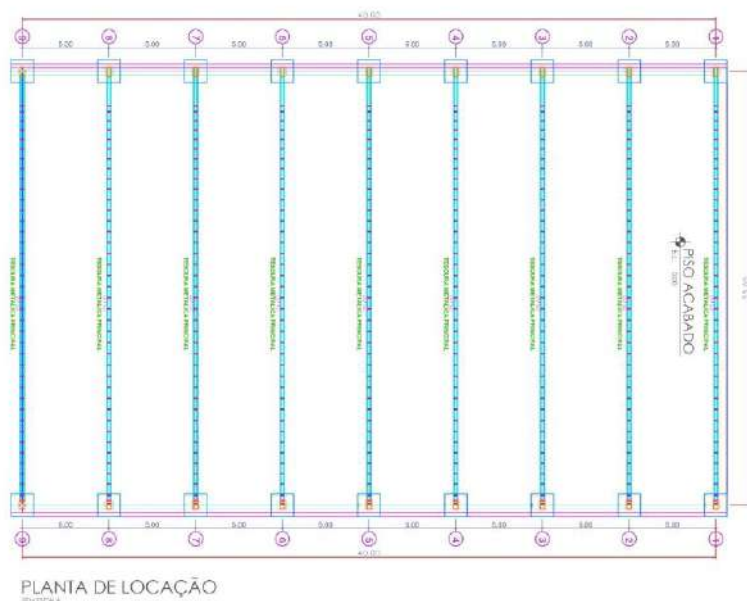
Fonte: CBCA, 2017.

4. CÁLCULO ESTRUTURAL

O projeto contempla o dimensionamento e o detalhamento da cobertura de um ginásio poliesportivo localizado em Guarulhos – SP, contemplando: treliça principal da estrutura, terças, tirantes de apoio das terças (linhas de corrente), sistema de contraventamento da cobertura e sistema de travamento lateral do banzo inferior, conforme as bases técnicas do concurso.

As principais características da edificação foram fornecidas previamente pelo edital: largura de 25,0m, comprimento de 40,0m, vão livre de 25,0m para a tesoura principal, pé-direito de 7,50m e cobertura em telha metálica tipo sanduíche.

FIGURA XX – Planta de localização dos pilares



Fonte: CBCA, 2025.

Para a concepção da estrutura, foram considerados perfis metálicos laminados e formados a frio. A escolha final dos perfis levou em conta não apenas a resistência e rigidez exigidas, mas também aspectos de fabricação, transporte e montagem, visando uma solução compatível com a realidade da construção metálica no Brasil.

As ações atuantes na cobertura abrangeram o peso próprio da estrutura, o peso das telhas metálicas, sobrecargas de utilização, cargas concentradas sobre as terças, peso adicional de painéis fotovoltaicos e os efeitos do vento. Para tanto, foram utilizadas como referência a ABNT NBR 6120:2019 (Cargas para o cálculo de estruturas de edificações) e a ABNT NBR 6123:2023

(Forças devidas ao vento em edificações), além da ABNT NBR 8800:2024, que estabelece os critérios de dimensionamento de estruturas de aço para perfis laminados, e a ABNT NBR 14762:2010 que estabelece os critérios de dimensionamento de estruturas de aço para perfis formados a frio.

A análise estrutural da tesoura foi conduzida adotando o modelo isostático com barras biarticuladas e carregamento aplicado exclusivamente nos nós, em conformidade com as diretrizes do concurso. Às terças foram verificadas como vigas biapoçadas, com redução do vão teórico em torno do eixo de menor inércia, enquanto os tirantes e elementos de contraventamento foram dimensionados para garantir estabilidade global e local da estrutura.

Além disso, foram empregados *softwares* de análise estrutural, como o *Ftool* (*Frame Analysis Tool*), para validação dos esforços internos e deslocamentos, o *AutoCAD*, para verificação das propriedades geométricas de perfis compostos e o *REVIT* para desenho das pranchas e vistas 3D do projeto. Complementa-se também consultas a tabelas técnicas e bibliografias de referência, incluindo Pfeil (*Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*, 20), Fakury (*Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto*, 2016) e publicações do CBCA (*Manual CBCA: Projeto e Durabilidade*, *Manual CBCA: Galpões para Usos Gerais*) sobre galpões e coberturas metálicas.

Dessa forma, a metodologia adotada buscou integrar critérios normativos, fundamentos teóricos e ferramentas computacionais, garantindo precisão no cálculo, clareza no detalhamento e eficiência na solução final proposta.

4.1. AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA

4.1.1. Ações permanentes

As ações iniciais a serem consideradas para os cálculos seguem os valores especificados no edital do 7º Concurso CBCA (CBCA, 2025).

- Cobertura: telhas metálicas do tipo sanduíche, compostas por duas chapas galvanizadas de 0,43 mm de espessura e núcleo de poliuretano (PUR) com 40 mm de espessura. Será considerado o peso próprio de $0,1 \text{ kN/m}^2$ ($10,0 \text{ kgf/m}^2$);

- Carga de painéis fotovoltaicos: será considerado $0,0375 \text{ kN/m}^2$ ($3,75 \text{ kgf/m}^2$) aplicados a área total da cobertura;

Nos demais elementos da cobertura, as ações iniciais a serem adotadas nos cálculos seguem os valores estabelecidos no Manual de Galpões de Usos Gerais (CBCA, 2018).

- Treliça: $0,20 \text{ kN/m}^2$;
- Contraventamentos: $0,05 \text{ kN/m}^2$;
- Terças e tirantes: $0,10 \text{ kN/m}^2$;

A carga permanente total atuante será de $0,49 \text{ kN/m}^2$, como pode ser visto na **Tabela 3**.

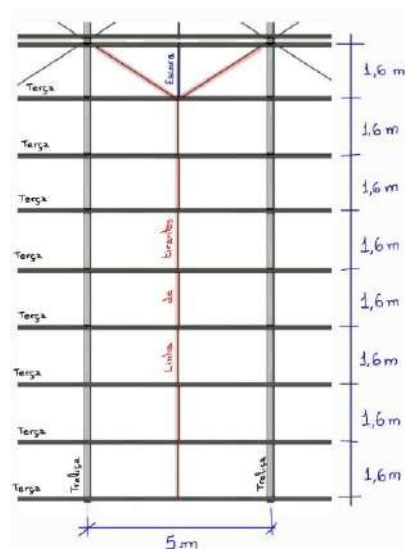
Tabela 3 – Resumo das ações permanentes

Elementos estruturais	Ações atuantes
Telhas metálicas do tipo sanduíche	$0,10 \text{ kN/m}^2$
Painéis fotovoltaicos	$0,0375 \text{ kN/m}^2$
Treliça	$0,20 \text{ kN/m}^2$
Contraventamentos	$0,05 \text{ kN/m}^2$
Terças e tirantes	$0,10 \text{ kN/m}^2$
Total permanente	$0,49 \text{ kN/m}^2$

Fonte: Autores, 2025.

O carregamento uniformemente distribuído sobre a treliça é dado por $0,49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 5 \text{ m} = 2,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. Então, $F_{G,K} = 2,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$.

Figura 18 - Espaçamento entre as terças e as treliças



Fonte: Autores, 2025.

4.1.2. Ações Variáveis

4.1.2.1. Ação variável acidental

Será estimada conforme item 6.4 da ABNT NBR 6120:2019, que adota para coberturas comuns uma sobrecarga mínima de acordo com a equação:

$$q = 0,50 \times \alpha \text{ onde } 0,25 \text{ kN/m}^2 \leq q \leq 0,50 \text{ kN/m}^2$$

Desse modo, já que a presente cobertura terá inclinação superior a 3%, tem-se uma sobrecarga acidental de $0,25 \text{ kN/m}^2$. Neste caso, o carregamento linearmente distribuído sobre a treliça é $0,25 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m} = 1,25 \text{ kN/m}$.

4.1.2.2. Ação variável de utilização

4.1.2.3. Ação variável devido ao vento

A ação do vento foi considerada conforme as condições e parâmetros estabelecidos no edital do 7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia (CBCA, 2025), apresentados na

Tabela 5, em conformidade com os critérios da ABNT NBR 6123:2023 – Ações do vento em edificações.

Tabela 5 - Parâmetros para o cálculo da ação do vento adotados neste projeto

Parâmetro	Observações
Velocidade básica do vento (Guarulhos – SP)	$V_0 = 38 \text{ m/s}$
Localização da edificação	Terreno plano, inserido em zona suburbana densamente construída.
Classe de ocupação	Ambientes com capacidade de aglomeração superior a 300 pessoas.
Geometria da edificação	Comprimento de 40,0 m; Largura de 25,0 m; Altura das paredes laterais de 7,50 m.
Coeficientes de pressão interna	$c_{pi}^+ = + 0,20$ $c_{pi}^- = - 0,30$

Fonte: Autores, 2025.

A força do vento que incide sobre um elemento da edificação, como uma parede ou um telhado, é determinada pela diferença entre as forças externas e internas aplicadas à superfície. A equação para o cálculo dessa força é descrita no item 4.3.2 da ABNT NBR 6123:2023.

$$F = q * A * C * f_v$$

Onde:

- f_v : fator de vizinhança, o qual assume o valor de 1 para este projeto.
- q : pressão dinâmica do vento;
- A : área de referência, definida conforme o elemento analisado;
- C_{pe} : coeficiente de forma externo, referente a força externa à edificação, estrutura ou componente, que atua na superfície plana;
- C_{pi} : coeficiente de forma interno, referente a força interna à edificação, estrutura ou componente, que atua na superfície plana.

a) A velocidade característica do vento (V_k), conforme descrito no tópico 4.2 da ABNT NBR 6123:2023, é determinada pela multiplicação da velocidade básica do vento (V_0) pelos fatores de ajuste S_1 , S_2 e S_3 , conforme estabelecido nas seções 5.2 a 5.4 da mesma norma.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

Onde:

- O fator topográfico (S_1): Para o presente projeto situado na cidade de Guarulhos-SP, o terreno se enquadra no critério de "terreno plano ou fracamente acidentado", conforme descrito no edital do 7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia 2025. Dessa maneira, adota-se o valor correspondente a este critério, em conformidade com o tópico 5.2 da ABNT NBR 6123:2023, para o fator topográfico, garantindo que a velocidade característica do vento esteja adequada às condições locais de terreno.

$$S_1 = 1,0$$

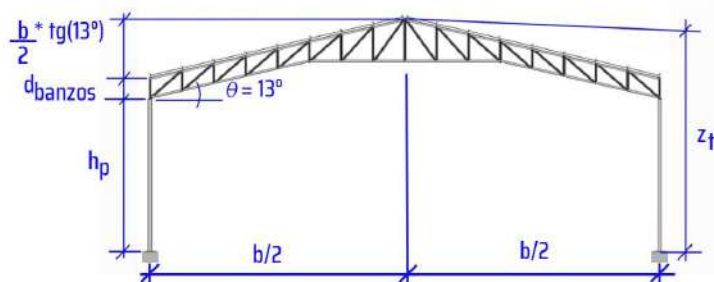
- O fator S_2 leva em consideração o efeito combinado dos seguintes critérios:

- i. Rugosidade do Terreno: A cidade de Guarulhos-SP, onde está prevista a implantação do ginásio poliesportivo, se enquadra na Categoria IV, presente no item 5.3.1 da ABNT NBR 6123:2023, de rugosidade do terreno, conforme o edital do 7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia 2025. Esta categoria caracteriza-se por terrenos dominados por obstáculos numerosos e de pouca distância entre si, situados em áreas urbanizadas.

- ii. Dimensões da Edificação: A edificação em questão possui dimensão em planta de 25 m x 40 metros, conforme retratado no edital do 7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia 2025, o que a posiciona na Classe B, conforme descrito no tópico 5.3.2 da ABNT NBR 6123:2023. Essa classe abrange edificações, estruturas ou partes delas, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja no intervalo entre 20 metros e 50 metros.

- iii. Altura sobre o Terreno: De acordo com o Instituto Aço Brasil (2010), a análise da ação do vento sobre a cobertura metálica treliçada foi realizada considerando um ponto específico, localizado na cota correspondente à cumeeira da estrutura. Tal ponto representa a extremidade superior da edificação, cuja posição está representada na **Figura X**.

Figura 19 - Determinação das cotas de referência da estrutura



Fonte: Autores, 2025.

$$Z_t = h_p + d_{banzos} + \frac{b}{2} * tg(13^\circ) = 7,5 \text{ m} + 1 \text{ m} + \frac{25 \text{ m}}{2} * 0,2309 = 11,39 \text{ m}$$

Por conseguinte, infere-se que o fator utilizado para o cálculo da velocidade do vento a uma altura acima do nível do terreno é determinado pela seguinte equação, conforme descrito no tópico 5.3.3 da ABNT NBR 6123:2023:

$$S_2 = b_m \cdot Fr * (z/10)^p$$

Onde:

- b_m é o fator de rugosidade do terreno para a categoria correspondente,
- Fr é o fator de rajada, que sempre corresponde à Categoria II,
- z é a altura acima do nível geral do terreno,
- p é um expoente específico para cada categoria de rugosidade.

Dessa forma, conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 6123:2023, foram definidos os parâmetros meteorológicos necessários ao cálculo do fator S_2 . A edificação em estudo foi enquadrada na Classe B e na Categoria IV, cujos valores correspondentes encontram-se apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	Parâmetro	Classe
		B
IV	b_m	0,85

p 0125

Fonte: Autores, 2025.

Em sequência, conforme Tabela 2 da ABNT NBR 6123:2023, que apresenta os valores do fator de rajada (Fr) para diferentes classes de edificações. Para a Classe B, tem-se $Fr = 0,98$, conforme exposto na Tabela 7.

Tabela 7 - Fator de rajada

Fr	Classe
	B
	0,98

Fonte: Autores, 2025.

Com os valores obtidos nas tabelas e os parâmetros devidamente identificados, procede-se ao cálculo do fator S_2 para o ponto de análise.

Para $Z_t = 11,39 \text{ m}$:

$$S_2 = b_m \cdot Fr \cdot \left(\frac{Z}{10}\right)^p = 0,85 \cdot 0,98 \cdot \left(\frac{11,39}{10}\right)^{0,125} = 0,85$$

- O fator estatístico S_3 : Conforme apresentado na Tabela 4 do item 5.4 da ABNT NBR 6123:2023, são estabelecidos os valores mínimos do fator estatístico S_3 . A partir da análise dessa tabela, foi verificado que, para o ginásio poliesportivo em estudo — cuja classe de ocupação corresponde a ambientes com capacidade de aglomeração superior a 300 pessoas, conforme estipulado no edital —, deve ser adotado o Grupo 2, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores mínimos do fator estatístico S_3

Grupo	S_3
2	1,06

Fonte: Autores, 2025.

Dessa forma, retomando o cálculo da velocidade característica do vento (V_k), com base nos valores determinados, temos:

Para $Z_t = 11,39 \text{ m}$:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 38 \text{ m/s} \cdot 1 \cdot 0,8466 \cdot 1,06 = 34,10 \text{ m/s}$$

b) Com a velocidade característica V_k determinada, a pressão dinâmica será calculada conforme estabelecido no tópico 4.2 da ABNT NBR 6123:2023, utilizando a seguinte fórmula:

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

Onde:

- q é a pressão dinâmica, expressa em Newton por metro quadrado (N/m^2);
- V_k é a velocidade característica do vento, em metros por segundo (m/s).

Dessa forma, procede-se ao cálculo da pressão dinâmica (q):

Para $Z_t = 11,3859 \text{ m}$:

$$q = 0,613 \cdot (V_k)^2 = 0,613 \cdot \left(34,10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 712,89 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,71289 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

c) Coeficientes de pressão externo e interno

Nesse contexto, para dar continuidade ao cálculo das pressões externas, foi feito a análise do coeficiente de pressão externa para o telhado de duas águas, considerando que o ginásio poliesportivo possui planta retangular. Essa configuração corresponde à Tabela 7, do tópico 6.1.1 da ABNT NBR 6123:2023. Cabe destacar que as sucções elevadas não ocorrem simultaneamente em todas as zonas indicadas nas tabelas, sendo os valores apresentados correspondentes aos coeficientes médios de pressão externa ($c_{pe,médio}$) para as áreas críticas

Dessa forma, para determinar os valores referentes à edificação do galpão do presente projeto, foi necessário identificar em qual linha da tabela as relações, relativas à coluna da altura relativa, o galpão foi enquadrado. Para tanto, foi iniciado o cálculo da relação entre a altura das paredes laterais (h) e a largura (b), a menor dimensão da edificação em planta.

$$\frac{h}{b} = \frac{7,5 \text{ m}}{25 \text{ m}} = 0,3$$

$$\frac{h}{b} = 0,3 \leq \frac{1}{2}$$

Por conseguinte, da relação entre o comprimento (a), que representa a maior dimensão do galpão em planta, e a largura (b).

$$\frac{a}{b} = \frac{40 \text{ m}}{25 \text{ m}} = 1,6$$

$$1 < \frac{a}{b} < 2$$

Dispondo das relações mencionadas e do ângulo de inclinação do telhado, que no presente projeto é de 13°, é obtido, com base na Tabela 9, que utiliza a Tabela 7 do tópico 6.1.1 da ABNT NBR 6123:2023, os valores dos coeficientes de pressão externa para o telhado nas direções de 0° e 90°, bem como os coeficientes médios aplicáveis à cobertura mediante interpolação linear, uma vez que a tabela não apresenta os valores diretamente para essa angulação.

Tabela 9 - Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular a × b, sendo b a menor dimensão

$a \geq b$

$x = \frac{b}{3} \text{ ou } \frac{a}{4}$
(o maior dos dois valores, porém $\leq 2h$)

$y = h \text{ ou } 0,15b$
(o menor dos dois valores)

tomar o valor mais desfavorável

Altura Relativa	θ	Valores de C_e para				cpe médio			
		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$					
		EFI	GHJ	EG	FH				
<p>$\frac{h}{b} = \frac{1}{2}$ Det. I</p>	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4	-	-1,2
	13°	Interpolação linear							
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2	-	-1,2

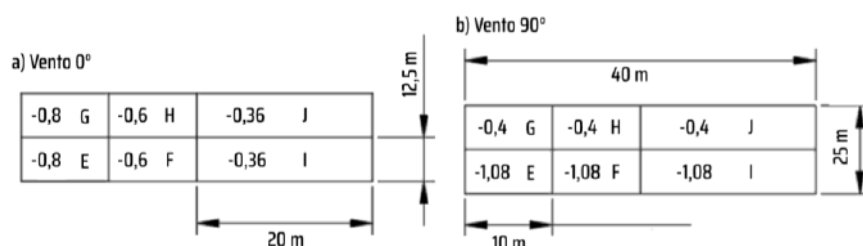
NOTA: Para vento a 0°, nas partes I e J, o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

- $a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H;
- $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$;
- Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b .

Fonte: Autores, 2025.

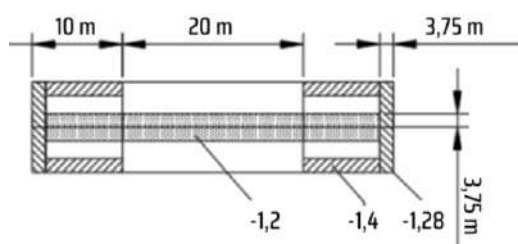
Dessa forma, os coeficientes de pressão externa para o telhado nas direções de 0° e 90°, bem como os coeficientes médios aplicáveis à cobertura, são apresentados nas Figura 20 e Figura 21, respectivamente, sendo que o procedimento de cálculo utilizado para a obtenção desses valores é descrito posteriormente

Figura 20 - Coeficiente de pressão externa para telhados de duas águas



Fonte: Autores, 2025.

Figura 21 - Coeficiente de pressão externa média para telhados de duas águas



Fonte: Autores, 2025.

Inicialmente, a análise é executada com a determinação das dimensões dos trechos em que esses coeficientes atuam, conforme apresentado na **Tabela 9**. A cobertura é dividida pela cumeeira, sendo que uma das dimensões corresponde à metade da largura do galpão (12,5 m).

As outras dimensões, que abrangem as áreas de transição entre os diferentes coeficientes, são calculadas posteriormente.

Primeiramente, ao considerar o vento na direção de 0° , iniciam-se os cálculos para determinar os coeficientes de pressão externa e as dimensões dos trechos correspondentes.

- Trechos G e E:

Para o trecho G e E, o coeficiente de pressão externa é fixado em $-0,8$, uma vez que o valor deste coeficiente se mantém constante, tanto para o intervalo anterior quanto para o posterior. No que se refere às dimensões de G e E, estas correspondem ao valor maior entre $b/3$ e $a/4$, com a condição de que o resultado seja menor ou igual a $2h$, conforme indicado na Tabela 9.

$$\frac{a}{4} = \frac{40}{4} = 10 \text{ m}$$

$$\frac{b}{3} = \frac{25}{3} = 8,333 \text{ m}$$

$$\frac{a}{4} = 10 \text{ m} > 8,333 \text{ m} = \frac{b}{3}$$

$$2h = 2 * 7,5 = 15 \text{ m}$$

$$2h = 15 \text{ m} > 10 \text{ m} = \frac{a}{4} \quad \text{ok!}$$

$$\text{Dimensão de G e E} = 10 \text{ m}$$

- Trechos H e F:

Assim como o trecho G e E, o coeficiente de pressão externa é fixado em $-0,6$. A dimensão de H e F será calculada pela diferença entre a metade do comprimento (a maior dimensão do ginásio) e a dimensão do trecho E.

$$\frac{a}{2} - E = \frac{40}{2} - 10 = 10 \text{ m}$$

- Trechos I e J:

Por conseguinte, para os trechos I e J, é necessário realizar a interpolação linear, conforme os cálculos abaixo, para determinar o coeficiente de pressão externa correspondente.

$$\frac{2 - a/b}{2 - 1} = \frac{-0,2 - x}{-0,2 - (F)}$$

$$\frac{2 - 1,6}{2 - 1} = \frac{-0,2 - x}{-0,2 - (-0,6)}$$

$$x = -0,36$$

A dimensão de I e J é a metade do comprimento.

$$\frac{a}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ m}$$

Por conseguinte, agora é calculado o coeficiente de pressão externa para o vento na direção de 90°. No que se refere às dimensões, é adotado o mesmo valor calculado para o vento na direção de 0°. Dessa forma, o cálculo é realizado apenas para os valores dos coeficientes de pressão externa.

- Trechos G, H e J:

Assim como tópicos anteriores, o coeficiente de pressão externa é fixado em -0,4.

- Trechos E, F e I:

Por conseguinte, para os trechos E, F e I, é necessário realizar a interpolação linear, conforme os cálculos abaixo, para determinar o coeficiente de pressão externa correspondente.

$$\frac{15^\circ - 13^\circ}{15^\circ - 10^\circ} = \frac{-1 - x}{-1 - (-1,2)}$$

$$x = -1,08$$

Ademais, outro ponto a ser analisado é que, para cada uma das duas incidências do vento (0° ou 90°), o coeficiente de pressão médio externo ($c_{pe,médio}$) para telhados é aplicado em uma área delimitada por uma distância, denominada de “y”, equivalente a 0,15b ou h, na qual é adotado o menor valor entre essas duas dimensões. Tal disposição é evidenciada na **Tabela 9**.

$$0,15 * b = 0,15 * 25 = 3,75 \text{ m}$$

ou

$$h = 7,5 \text{ m}$$

$$h = 7,5 \text{ m} > 3,75 \text{ m} = 0,15 * b$$

$$y = 3,75 \text{ m}$$

No que se refere ao valor de "x", apresentado na Tabela 9, este é determinado pelo mesmo procedimento de cálculo aplicado às dimensões dos trechos G e E, sendo adotado, dessa forma, o valor de 10 m

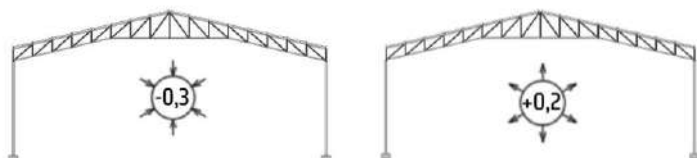
Por conseguinte, uma vez calculados os valores das dimensões em que os coeficientes de pressão média ($c_{pe,médio}$) atuam, é executado o cálculo dos valores dos coeficientes. Primeiramente, calcula-se o coeficiente de pressão externa médio que atua na região da cumeeira, que assume o valor de -1,2, permanecendo constante tanto para o intervalo anterior quanto para o posterior. De forma análoga, o coeficiente de pressão externa médio ao longo da largura do galpão assume o valor de -1,4. Ademais, no que se refere ao coeficiente de pressão externa médio que atua ao longo do comprimento do galpão, será necessário realizar a interpolação linear.

$$\frac{15^\circ - 13^\circ}{15^\circ - 10^\circ} = \frac{-1,2 - x}{-1,2 - (-1,4)}$$
$$x = -1,28$$

No contexto da análise de pressões internas para fins de dimensionamento estrutural, conforme estabelecido no tópico 6.3 da ABNT NBR 6123:2023, a pressão interna pode ser considerada uniforme. Nesse sentido, para o presente caso, e conforme estipulado no edital do 7º concurso para estudantes de engenharia (CBCA, 2025), são adotados os valores a seguir para o coeficiente de pressão interna, conforme representado na Figura 12.

- $c_{pi} = + 0,2$;
- $c_{pi} = - 0,3$.

Figura 22 - Coeficientes de pressão interna



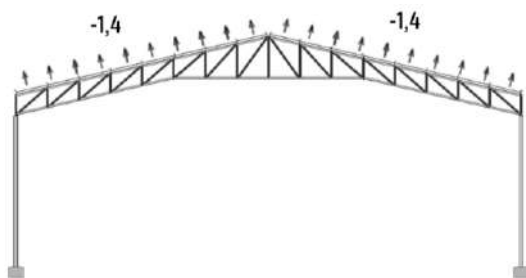
Fonte: Autores, 2025.

d) Combinações das cargas do vento

- Carga na terça

A carga utilizada no dimensionamento das terças está representada na Figura 23.

Figura 23 - Combinações para verificação nas terças



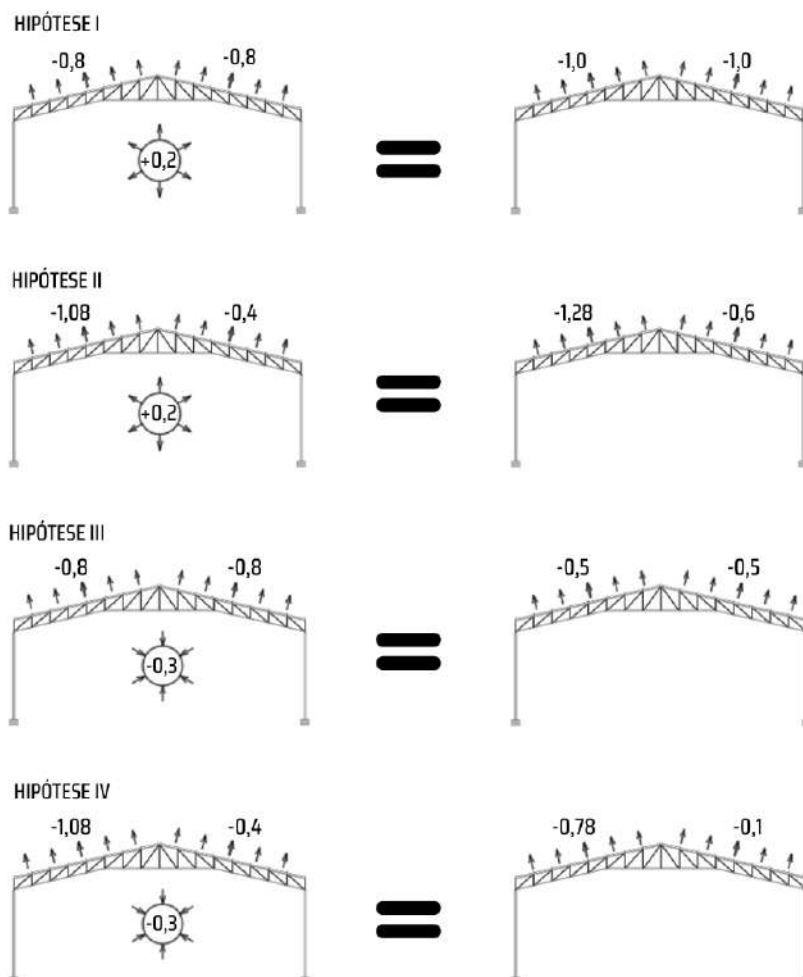
Fonte: Autores, 2025.

A carga na terça é obtida por meio da seleção da seção que apresenta o pior caso do coeficiente de pressão externa (C_{pe}) médio, sendo importante destacar que, para essa análise, o coeficiente de pressão interna não é considerado, conforme recomendado pelo Instituto Aço Brasil (2010).

- Combinações para a treliça

São utilizadas as seções com os maiores coeficientes de pressão externa, considerando também o coeficiente de pressão interna, de modo que seja possível analisar a resultante gerada pela interação conjunta de ambos os coeficientes. Conforme ilustrado na Figura 14, a primeira coluna apresenta a seção selecionada, com os valores dos coeficientes de pressão externa e interna, enquanto a segunda coluna exibe a resultante que é empregada nos cálculos de dimensionamento.

Figura 24 - Combinações para dimensionamento da treliça (C_{pe} - C_{pi})



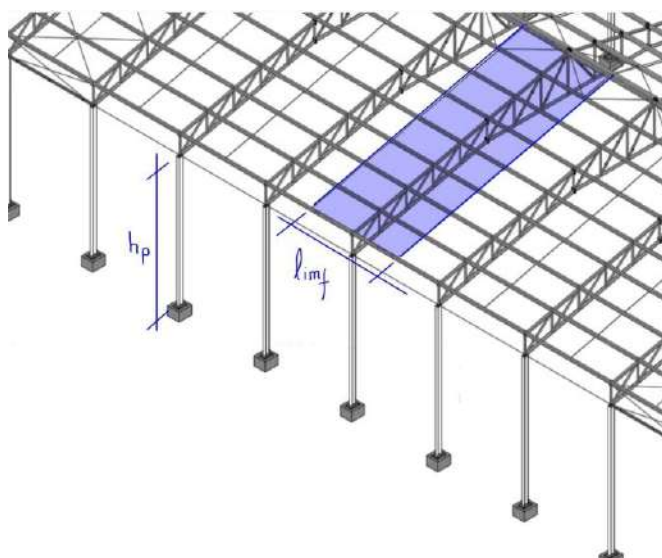
Fonte: Autores, 2025.

Diante dos cálculos realizados, é retomado a equação da força devido ao vento que age sobre um elemento plano da cobertura, conforme expressa o tópico 4.3.2 da ABNT NBR 6123:2023:

$$F = q * A * (C_e - C_i)$$

Adequando esta equação ao contexto do presente projeto, para o dimensionamento da treliça e determinação da carga distribuída atuante, considera-se que a área de influência — delimitada pela l_{inf} e ilustrada na Figura 15 — é obtida pelo produto entre a altura do pórtico e o comprimento da base da área de influência do carregamento atuante sobre o pórtico, ou seja

Figura 25 - Área de influência



Fonte: Autores, 2025.

$$\begin{aligned}\therefore \frac{F}{h_p} &= q * \frac{A}{h_p} * (C_{pe} - C_{pi}) \\ \therefore q_{vento} &= q * \frac{l_{inf} * h_p}{h_p} * (C_{pe} - C_{pi}) \\ \therefore q_{vento} &= q * l_{inf} * (C_{pe} - C_{pi})\end{aligned}$$

Dessa forma, é calculado o carregamento do vento atuante sobre a treliça, conforme as hipóteses apresentadas na *Figura*.

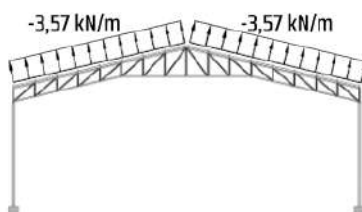
- Hipótese I

$$q_{vento,esq} = q * l_{inf} * (C_e - C_i) = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-1) = -3,57 kN/m$$

$$q_{vento,dir} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-1) = -3,57 kN/m$$

O esquema correspondente encontra-se representado a seguir, de modo a ilustrar graficamente.

Figura 26 – Hipótese I



Fonte: Autores, 2025.

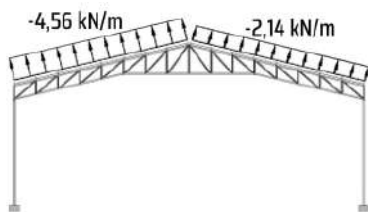
- Hipótese II

$$q_{vento,esq} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-1,28) = -4,56 kN/m$$

$$q_{vento,dir} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-0,6) = -2,14 kN/m$$

O esquema correspondente encontra-se representado a seguir, de modo a ilustrar graficamente.

Figura 27 – Hipótese II



Fonte: Autores, 2025.

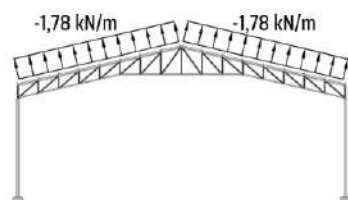
- Hipótese III

$$q_{vento,esq} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-0,5) = -1,78 kN/m$$

$$q_{vento,dir} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-0,5) = -1,78 kN/m$$

O esquema correspondente encontra-se representado a seguir, de modo a ilustrar graficamente.

Figura 28 – Hipótese III



Fonte: Autores, 2025.

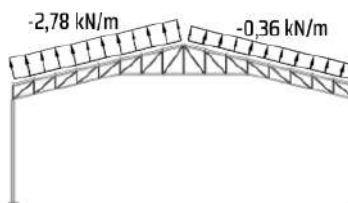
- Hipótese IV

$$q_{vento,esq} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-0,78) = -2,78 kN/m$$

$$q_{vento,dir} = 0,71289 \frac{kN}{m^2} * 5 m * (-0,1) = -0,36 kN/m$$

O esquema correspondente encontra-se representado a seguir, de modo a ilustrar graficamente.

Figura 29 – Hipótese IV



Fonte: Autores, 2025.

4.2. COMBINAÇÕES DAS AÇÕES

4.2.1. Combinação para Estado Limite Último (ELU)

As combinações últimas normais são definidas conforme o uso previsto para a edificação. Devem ser avaliadas tantas combinações de ações quanto forem necessárias para garantir a segurança da estrutura frente a todos os estados-limite últimos aplicáveis, desde que apresentem probabilidade relevante de ocorrência simultânea ao longo da vida útil da construção.

Em cada combinação, devem constar as ações permanentes e a ação variável principal, ambas com seus valores característicos, além das demais ações variáveis, classificadas como secundárias, consideradas com seus valores reduzidos de combinação. Para o cálculo, conforme especificado na norma ABNT NBR 8800:2024 no item 4.8.7.2.1, será utilizada a equação apresentada a seguir, em conjunto com os valores dos coeficientes de ponderação e combinação fornecidos na

$$F_D = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,K}) + \gamma_{q1} \times F_{Q1,K} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qi} \times F_{Qi,K} \times \Psi_{0j})$$

A primeira combinação, $F_{D,1}$ é dada pelo maior valor encontrado, considerando primeiramente a carga acidental como ação variável principal e a carga de utilização como ação variável secundária (F_{au}) ou carga de utilização como ação variável principal e carga acidental como ação variável secundária (F_{ua}):

$$F_{au} = \gamma_{gi} \times F_{Gi,K} + \gamma_{q1} \times F_{Q1,K} + \gamma_{qi} \times F_{Qi,K} \times \Psi_{0j}$$

$$F_{au} = 1,25 \times 2,4375 + 1,5 \times 1,25 + 1,5 \times 0,75 \times 0,8$$

$$F_{au} = 5,82 \text{ kN/m}$$

$$F_{ua} = \gamma_{gi} \times F_{Gi,K} + \gamma_{q1} \times F_{Q1,K} + \gamma_{qi} \times F_{Qi,K} \times \Psi_{0j}$$

$$F_{ua} = 1,25 \times 2,4375 + 1,5 \times 0,75 + 1,5 \times 1,25 \times 0,8$$

$$F_{ua} = 5,67 \text{ kN/m}$$

Será adotado o pior caso, com $F_{D,1} = F_{au} = 5,82 \text{ kN/m}$

4.3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

4.3.1. Diagonal e Montante

Para determinação dos esforços solicitantes que atuam sobre a treliça, foram considerados 4 hipóteses para carga de vento, onde seriam 2 hipóteses com simetrias entre as águas e 2 assimétricas, sendo necessária a verificação dos esforços internos das barras derivados dessas hipóteses para ambos os lados da tesoura. Essa verificação se deve ao fato da existência de apoios assimétricos para a treliça, sendo eles de primeiro e segundo gênero, o que alteraria os esforços atuantes na estrutura.

4.3.1.1 Análise Estrutural

Dessa forma, para a análise dos esforços internos dos elementos estruturais foram analisadas as 6 hipóteses de carregamento do vento na treliça utilizando o software comercial *Ftool*. A partir dessa análise foi verificado que a 2ª hipótese de carregamento, com apoio do primeiro gênero a esquerda e de segundo gênero a direita, seria a situação em que além de possuir o maior deslocamento na estrutura, gerava também os maiores esforços internos máximos nos perfis metálicos L e WT, sendo seu dimensionamento norteado por essa hipótese.

O esquema da treliça e suas cargas nos nós podem ser vistas na Figura x

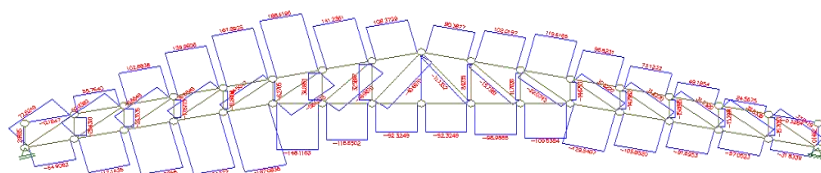
Figura xx - Esquema de carregamentos no pórtico para a 2ª hipótese.



Fonte: Autores, 2025.

O dimensionamento de banzos, diagonais e montantes foi então feito a partir dos maiores esforços internos gerados pela análise. Essa escolha se deu devido ao fato de se preferir utilizar apenas um perfil WT para ambos os banzos, e um perfil L para todas as montantes e diagonais da estrutura. Os esforços internos dos elementos podem ser visualizados na Figura XX que segue.

Figura xx - Esforços internos axiais para a 2ª hipótese.



Fonte: Autores, 2025.

Nessas figuras podem ser vistos as diagonais e montantes presentes na estrutura, com o seu quantitativo podendo ser visto no Quadro xx que segue

Quadro xx - Quadro resumo diagonais e montantes.

Montantes	Quantidade
Cantoneira 1m	12
Cantoneira 1,36m	2
Cantoneira 1,72m	2
Cantoneira 2,08m	1
Diagonais	Quantidade
Cantoneira 2,07m	12
Cantoneira 2,32m	2
Cantoneira 2,6m	2

Fonte: Autores, 2025.

A partir dos esforços encontrados nos perfis e levando em consideração o seu comprimento, pode-se encontrar o caso mais crítico para o dimensionamento da cantoneira. O caso pode ser visto no Quadro xx que segue.

Quadro xx - Situação crítica para dimensionamento de cantoneira

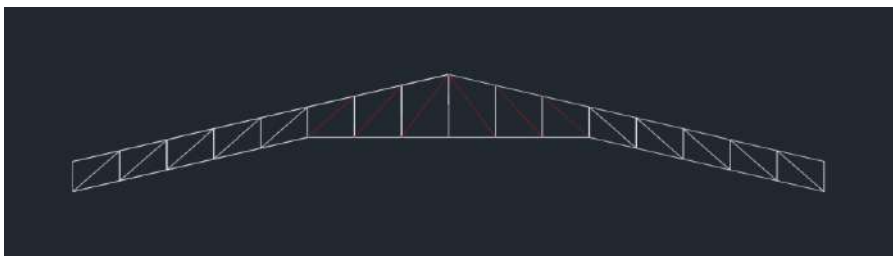
Perfis mais críticos: Hipótese 2 invertida	Tração	Compressão
Cantoneira 2,07m	72,89	58,11

Fonte: Autores, 2025.

4.3.1.2 Resistência à tração

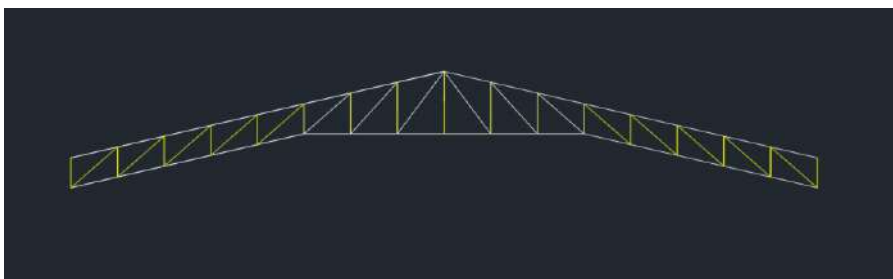
Para fins de cálculo dos montantes e diagonais do projeto a solução escolhida foi de cantoneiras duplas agindo de forma individual na treliça e agindo como perfil composto apenas nas diagonais da área central da treliça.

FIGURA XX – Perfis compostos na treliça



Fonte: Autores, 2025.

FIGURA XX – Perfis individuais na treliça



Fonte: Autores, 2025.

Essa escolha deve-se ao fato de se diminuir o tamanho do perfil escolhido para projeto, garantindo assim economia e facilidade de execução para a estrutura.

Como as cantoneiras vão agir em um conjunto, o esforço de tração de 72,89 kN será dividido por 2, resultando em 36,41 kN para cada cantoneira de forma individual.

A ligação escolhida para as diagonais será uma ligação soldada que abrangerá uma aba da cantoneira de forma transversal, essa escolha e o fato de uma ligação que dispensa a utilização de furos possibilitará uma rápida montagem e resistência adequada.

De acordo com o item 5.2.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pelas equações:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g * f_y}{\delta_1}$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e * f_u}{\delta_2}$$

47

Essas duas equações consideram os estados-limite últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, sendo a força resistente ao esforço de tração o menor valor entre as duas equações.

Para o escoamento da seção bruta, o valor pode ser calculado como sendo

$$N_{t,Rd} = \frac{4,58 \cdot 34,5}{1,1} = 143,65 \text{ kN}$$

Já para a ruptura da seção líquida, é preciso se calcular a área líquida efetiva da seção, que pode ser encontrado a partir da equação

$$A_e = C_t \cdot A_n$$

Onde o C_t é o coeficiente de redução da área líquida e o A_n é a própria área líquida.

No caso de ligações soldadas, onde não ocorrem a existência de furos no perfil analisado, a área líquida será igual a área bruta.

$$A_n = A_g$$

Já o coeficiente de redução C_t , pode ser obtido a partir do tipo de ligação utilizado no perfil. No caso da tesoura metálica, onde as cantoneiras possuirão soldas longitudinais, o C_t pode ser encontrado a partir da fórmula a seguir

$$C_t = 1 - \frac{ec}{lc} = 0,6$$

Nesse caso, a área líquida efetiva será de

$$A_e = 0,6 \cdot 4,58 = 2,75$$

Então, a força resistente para a ruptura da seção líquida será

$$N_{r,Rd} = \frac{2,75 \cdot 45}{1,35} = 91,67 \text{ kN}$$

Em ambos os casos, a força solicitante de cálculo de 36,41 kN será consideravelmente menor que a força resistente de cálculo, sendo a força de tração não determinante para o dimensionamento dos perfis dos montantes e diagonais.

$$N_{t,Rd} \geq N_{t,Sd}$$

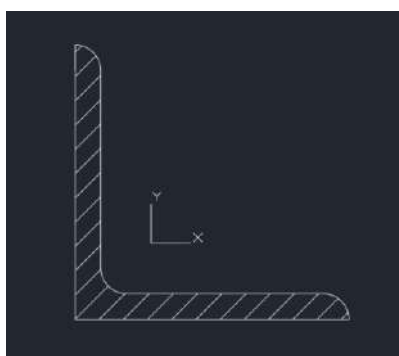
É necessário destacar que existe um limite de esbeltez de 300 que um elemento tracionado pode assumir, porém devido à natureza mutável das cargas oriundas do vento foi adotado o limite de 200 para peças comprimidas, isso se deve ao fato que ele é menor que o limite para tração, atendendo ambos os casos.

A força resistente a tração será a mesma caso o perfil seja composto ou sendo uma dupla de perfis individuais, para o caso do presente projeto.

4.3.1.3 Resistência à compressão caso perfis separados

Como as cantoneiras vão agir em um conjunto, o esforço de compressão de 29,43 kN será dividido por 2, resultando em 14,72 kN para cada cantoneira de forma individual.

FIGURA XX – Perfil individual cantoneira



Fonte: Autores, 2025.

De acordo com o item 5.3.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pela equação

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * A_{ef} * f_y}{\gamma_1}$$

Onde o parâmetro χ pode ser calculado a partir do índice λ_0 , que pode ser calculado a partir da equação

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

Em que N_e , para o caso do perfil L pode ser encontrado por meio de: $N_e = \frac{\pi^2 * E * I_x}{L_{eq}^2}$

Nessa equação, o comprimento L_{eq} é dado pela equação

$$L_{eq} = 72 * i_x + 0,75 * L$$

Já que $L = 100$ cm, e $i_x = 1,58$ cm. e $L/i_x = 63,29 < 80$. Sendo essa verificação imposta pela norma para definir o parâmetro de cálculo do comprimento equivalente L_{eq} .

Dessa forma

$$Leq = 72 * 1,58 + 0,75 * 100 = 188,76 \text{ cm}$$

$$Nex = \frac{\pi^2 * 20000 * 11,7}{188,76^2} = 64,82 \text{ kN}$$

Com a força axial de flambagem definida, o cálculo do índice de esbeltez reduzido λ_0 seguiu da seguinte forma.

$$\lambda_0 = \frac{4,58 * 34,5}{64,82} = 1,56$$

Como $\lambda_0 > 1,5$. A equação do fator de redução χ se dá por:

$$\chi = 0,877^{\lambda_0^2} = 0,36$$

Para o cálculo da área efetiva A_{ef} , é necessário o cálculo da esbeltez da mesa e da alma do perfil, em que:

$$\frac{b}{t} = \frac{5,08}{0,476} = 10,67$$

Para esses valores de esbeltez, devemos verificar se eles estarão dentro dos limites impostos pela norma, sendo estes de:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 12,7279$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, flexo-torção} = 0,71 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 20,08$$

Para se comparar a esbeltez com a esbeltez limite com a esbeltez dos elementos do perfil analisado, deve-se ainda dividir a esbeltez limite pela raiz do índice de redução χ .

$$\frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} = 21,21$$

Como:

$$\frac{b}{t} \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$$

A largura do elemento é igual à largura efetiva, o que implica que a área bruta da seção será igual a área efetiva.

$$A_g = A_{ef} = 4,58 \text{ cm}^2$$

Logo:

$$N_{crd} = \frac{0,36 * 4,58 * 34,5}{1,1} = 51,71 \text{ kN}$$

A NBR 8800/24 também impõe um limite para o índice de esbeltez máximo que um elemento comprimido pode assumir, que nesse caso seria considerado como a maior relação entre o comprimento destravado associado à flexão e o raio de giração correspondente, não supere 200.

$$\lambda = \frac{310,56}{1,58} = 196,56$$

Há ainda o caso de cantoneiras maiores que a especificada no cálculo, porém elas não são determinantes para o dimensionamento do perfil. A seguir segue os resultados do cálculo desses perfis.

QUADRO XX – Demais casos para compressão em perfil individual

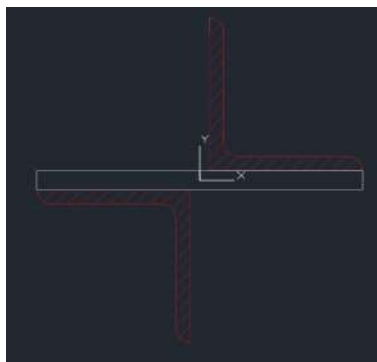
Diagonais	Esforço solicitante (kN)	Esforço resistente (kN)
Cantoneira 2,07m	12,83	19,21

Fonte: Autores, 2025.

4.3.1.4 Resistência à compressão caso perfil composto em cruz

Como as cantoneiras vão agir em um perfil composto, o esforço de compressão de 58,11 kN irá integralmente para o perfil.

FIGURA XX – Perfil composto cantoneira



Fonte: Autores, 2025.

De acordo com o item 5.3.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pela equação

$$N_{c,Rd} = \frac{X * A_{ef} * f_y}{\delta_1}$$

Onde o parâmetro X pode ser calculado a partir do índice λ_0 , que pode ser calculado a partir da equação

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

Em que N_e , para o caso do perfil L pode ser encontrado por meio de:

$$N_{ex} = N_{ey} = \frac{\pi^2 * E * I_x}{L^2}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} * \left(\frac{\pi^2 * E * C_w}{L^2} + GJ \right)$$

Nessa equação, o comprimento L é de 207 cm

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * 20000 * 51,08}{207^2} = 235,31 \text{ Kn}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{11,0817} * \left(\frac{\pi^2 * 20000 * 0}{42849} + 7700 * 0,7 \right) = 486,39 \text{ kN}$$

Ne para barras compostas precisa ser calculado de forma diferente, como

$$\frac{l}{r_{min}} > 40$$

$$69 > 40$$

Ne precisa ser multiplicado por um fator de redução

$$\frac{\left(\frac{L}{r}\right)^2}{\left(\frac{L}{r}\right)^2 + \left(Ki * \frac{l}{r_{min}}\right)^2} = 0,6871$$

$$\frac{\left(\frac{207}{2,3539}\right)^2}{\left(\frac{207}{2,3539}\right)^2 + \left(0,86 * \frac{69}{1}\right)^2} = 0,6871$$

$$N_e * 0,6871 = 161,691 \text{ kN}$$

Com a força axial de flambagem definida, o cálculo do índice de esbeltez reduzido λ_0 seguiu da seguinte forma.

$$\lambda_0 = \frac{(9,16 * 34,5)}{161,691} = 1,40$$

Como $\lambda_0 < 1,5$. A equação do fator de redução χ se dá por:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,44$$

Para o cálculo da área efetiva A_{ef} , é necessário o cálculo da esbeltez da aba do perfil, em que:

$$\frac{b}{t} = \frac{5,08}{0,476} = 10,6723$$

Para esses valores de esbeltez, devemos verificar se eles estarão dentro dos limites impostos pela norma, sendo estes de:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,45 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 12,73$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, flexão-torção} = 0,71 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 20,08$$

Para se comparar a esbeltez com a esbeltez limite com a esbeltez dos elementos do perfil analisado, deve-se ainda dividir a esbeltez limite pela raiz do índice de redução χ .

$$\frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} = 28,93$$

Como:

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

A largura do elemento é igual a largura efetiva, o que implica que a área bruta da seção será igual a área efetiva

$$A_g = A_{ef} = 9,16 \text{ cm}^2$$

Logo:

$$N_{crd} = \frac{0,44 * 9,16 * 34,5}{1,1} = 126,41 \text{ kN}$$

A NBR 8800/24 também impõe um limite para o índice de esbeltez máximo que um elemento comprimido pode assumir, que nesse caso seria considerado como a maior relação entre o comprimento destravado associado à flexão e o raio de giração correspondente, não supere 200.

$$\lambda_0 = \frac{207}{2,3539} = 87,94$$

$$\lambda = \frac{207}{2,3539} = 87,9392$$

Há ainda o caso de cantoneiras maiores que a especificada no cálculo, porém elas não são determinantes para o dimensionamento do perfil. A seguir segue os resultados do cálculo desses perfis.

FIGURA XX – Demais casos para compressão em perfil composto

Diagonais	Esforço solicitante (kN)	Esforço resistente (kN)
Cantoneira 2,32m	46,99	99,29
Cantoneira 2,6m	40,67	92,73

Fonte: Autores, 2025.

Dessa forma, mesmo para o maior comprimento entre os sistemas de travamento, de 2,6 m, o perfil ainda atende aos critérios de esbeltez impostos pela norma.

$$\lambda = \frac{260}{2,3539} = 110,455$$

Pode-se observar dessa forma que todas as montantes e diagonais serão feitos utilizando o perfil L50,8*50,8*4,8. Utilizando o perfil composto de duas cantoneiras com chapas nas diagonais da parte central da treliça.

4.3.1.5 Espaçamento entre chapas

Para verificação do espaçamento entre chapas, o item 5.3.6.3 da NBR 8800/24 faz o uso da seguinte inequação

$$\left(\frac{l}{r_{min}} \right) \leq 0,75 \cdot \left(\frac{L}{r} \right)_0$$

Onde l é o espaçamento entre as chapas, valor que é recomendado de 1/3 do vão da barra, no pior cenário seria 86,67cm. rmin seria o raio de giração no eixo z da cantoneira de forma individual e r seria o menor raio de giração do perfil composto

$$86,67 \geq 0,75 \cdot \left(\frac{260}{2,3539} \right)$$

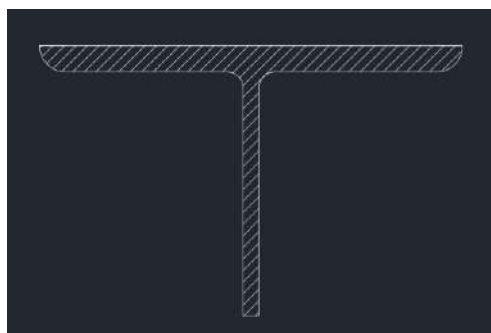
$$86,67 \geq 82,84$$

Para a diagonal de maior comprimento seriam necessárias 3 chapas espaçadoras equidistantes, enquanto as menores precisam de 2 chapas espaçadoras equidistantes, já que a verificação de espaçamento concluiria que a divisão mínima determinada pela norma seria suficiente para atender ao critério de estabilidade da NBR 8800/24.

4.3.2. Banzos

Como comentado na parte da escolha da geometria da tesoura e concepção estrutural, a ideia do presente projeto será de utilizar um perfil com apoio a cada dois nós, resultando em um comprimento entre 3,12 e 3,2m, devido a parte central enrijecida da treliça.

FIGURA XX – Perfil WT



Fonte: Autores, 2025.

A partir dos esforços encontrados nos perfis e levando em consideração o seu comprimento, pode-se encontrar o caso mais crítico para o dimensionamento do Perfil WT. O caso pode ser visto no Quadro xx que segue.

Quadro xx - Quadro resumo banzos.

Banzos	Quantidade
WT 3,2m	12
WT 3,16m (ligação no meio)	2
WT 3,12m	2

Fonte: Autores, 2025.

Quadro xx - Situação crítica para dimensionamento dos banzos

Perfis mais críticos: Hipótese 2 invertida	Tração	Compressão
WT 3,12 e 3,16m (ligação no meio)	186,42	197,08

Fonte: Autores, 2025.

4.3.2.1 Resistência à tração

De acordo com o item 5.2.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pelas equações:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g * f_y}{\delta_1}$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e * f_u}{\delta_2}$$

Essas duas equações consideram os estados-limite últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, sendo a força resistente ao esforço de tração o menor valor entre as duas equações.

Para o escoamento da seção bruta, o valor pode ser calculado como sendo

$$N_{t,Rd} = \frac{22,85 * 25}{1,1} = 716,66 \text{ kN}$$

Já para a ruptura da seção líquida, é preciso se calcular a área líquida efetiva da seção, que pode ser encontrado a partir da equação

$$A_e = C_t * A_n$$

Onde o C_t é o coeficiente de redução da área líquida e o A_n é a própria área líquida.

No caso de ligações soldadas, onde não ocorrem a existência de furos no perfil analisado, a área líquida será igual a área bruta.

$$A_n = A_g$$

Já o coeficiente de redução C_t , pode ser obtido a partir do tipo de ligação utilizado no perfil. No caso da tesoura metálica, onde todos os elementos do perfil WT serão soldados na chapa que faz a ligação entre as partes da tesoura, o C_t pode ser considerado igual a 1, fazendo com que

$$A_e = A_g$$

Nesse caso, a força resistente para a ruptura da seção líquida será

$$N_{t,Rd} = \frac{22,85 * 45}{1,35} = 750 \text{ kN}$$

Porém, no caso dos cantos da treliça, onde haverá ligação com o pilar, o C_t pode ser considerado

$$Ct = Ac \cdot Ag$$

Pois se fará uma ligação onde ocorrerá a presença de uma solda transversal, que conectará apenas as mesas do perfil, sendo A_c a área desses elementos

$$A_c = 16,5 \cdot 1,02 = 16,83 \text{ cm}^2$$

$$Ct = \frac{16,83}{22,85} = 0,7365$$

Nesse caso, a área líquida efetiva será de

$$A_e = 0,7365 \cdot 22,85 = 16,8290 \text{ cm}^2$$

Então, a força resistente para a ruptura da seção líquida será

$$N_{t,Rd} = \frac{16,829 \cdot 45}{1,35} = 560,97 \text{ kN}$$

Em todos os casos, a força solicitante de cálculo de 186,42 kN será consideravelmente menor que a força resistente de cálculo, sendo a força de tração não determinante para o dimensionamento dos perfis dos banzos.

$$N_{t,Rd} \geq N_{t,Sd}$$

É necessário destacar que existe um limite de esbeltez que um elemento tracionado pode assumir, porém devido a natureza mutável das cargas oriundas do vento foi adotado o limite de peças comprimidas, isso se deve ao fato que ele é menor que o limite para tração, atendendo ambos os casos.

4.3.2.2 Resistência à compressão

De acordo com o item 5.3.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pela equação

$$N_{c,Rd} = \frac{X \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\delta_1}$$

Onde o parâmetro X pode ser calculado a partir do índice λ_0 , que pode ser calculado a partir da equação

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

Em que N_e , para o caso do perfil WT pode ser encontrado por meio do menor valor entre:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * E * I_x}{L^2}$$

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 * \left(1 - \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2\right)} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 * N_{ey} * N_{ez} * \left(1 - \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2\right)}{(N_{ey} + N_{ez})^2}}\right)$$

Para o perfil WT escolhido, a força axial de flambagem N_{ex} encontrada foi de 287,78 kN, e a força N_{eyz} foi 729,68 kN. Escolheu-se então a mais crítica, N_{ex} , para o cálculo do índice de esbeltez reduzido λ_0 .

$$\lambda_0 = \frac{(22,43 * 25)}{287,78} = 1,64$$

Como $\lambda_0 < 1,5$. A equação do fator de redução χ se dá por:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = 0,33$$

Para o cálculo da área efetiva A_{ef} , é necessário o cálculo da esbeltez da mesa e da alma do perfil, em que:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{mesa} = \frac{8,25}{1,02} = 8,0882$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{alma} = \frac{9,48}{0,62} = 14,5645$$

Para esses valores de esbeltez, devemos verificar se eles estarão dentro dos limites impostos pela norma, sendo estes de:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim,mesa} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,8392$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim,alma} = 0,75 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 21,2132$$

Para se comparar a esbeltez com a esbeltez limite com a esbeltez dos elementos do perfil analisado, deve-se ainda dividir a esbeltez limite pela raiz do índice de redução χ .

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, mesa} = 27,57$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, alma} = 36,92$$

Como:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{mesa} \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, mesa}}{\sqrt{\chi}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{alma} \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, mesa}}{\sqrt{\chi}}$$

A largura do elemento é igual a largura efetiva, o que implica que a área bruta da seção será igual a área efetiva

$$A_g = A_{ef} = 22,85 \text{ cm}^2$$

Logo:

$$N_{crd} = \frac{0,33 * 22,85 * 34,5}{1,1} = 236,50 \text{ kN}$$

A NBR 8800/24 também impõe um limite para o índice de esbeltez máximo que um elemento comprimido pode assumir, que nesse caso seria considerado como a maior relação entre o comprimento destravado associado à flexão e o raio de giração correspondente, não supere 200.

$$\lambda_0 = \frac{320}{2,5477} = 125,6039$$

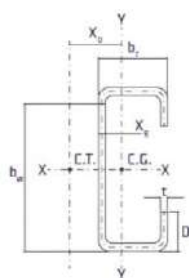
Dessa forma, mesmo para o maior comprimento entre os sistemas de travamento, de 3,2 m, o perfil ainda atende aos critérios de esbeltez impostos pela norma.

4.3.3. Terça

Para as terças do presente projeto, o perfil analisado será formado a frio do tipo U enrijecido, após análises do perfil mais econômico adotou-se o U200x75x25x2,65x7,75kg/m,

cujas propriedades geométricas podem ser consultadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 10 - Perfil U de chapa dobrada enrijecida - adotado

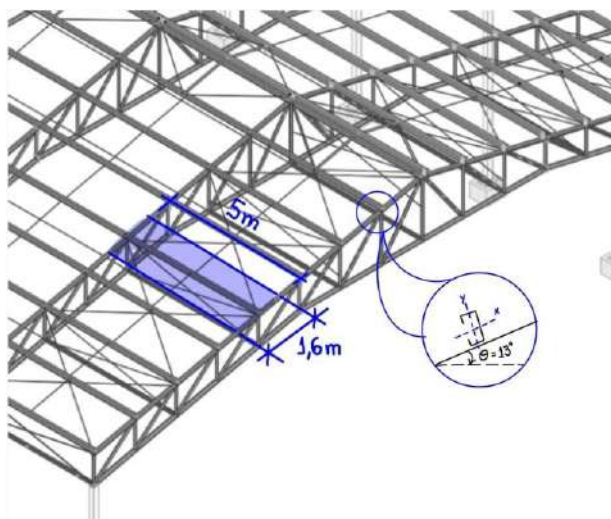


Perfil $b_w \times b_f \times D \times t$	A cm^2	m kg/m	Eixo X - X					Eixo Y-Y					C_w cm^6	r_0 cm
			I_x cm^4	W_x cm^3	r_x cm	x_g cm	x_0 cm	I_y cm^4	W_y cm^3	r_y cm	I_t cm^4			
200x75x25x2,65	7,87	7,75	605	60,57	7,83	2,20	5,34	71,7	13,54	2,70	0,231	5.890	9,86	

Fonte: Autores, 2025.

Por conseguinte, quanto ao seu dimensionamento, a área de influência de uma terça é definida por duas dimensões principais, conforme esquematizado na Figura X. A primeira corresponde à distância fixa de 5 metros, que representa o intervalo entre os pilares do trecho considerado. A segunda dimensão equivale à metade da distância entre terças consecutivas em ambos os lados (esquerdo e direito), resultando, assim, em um valor total equivalente à distância integral entre duas terças.

Figura 30 - Área de influência da terça



Fonte: Autores, 2025.

Conforme indicado no projeto da treliça, a distância inclinada entre terças consecutivas é de 1,6 m. Dessa forma, a outra dimensão a ser considerada para a área de influência é de 1,6 m. Essas medidas são fundamentais para determinar a área efetiva que cada terça suporta, permitindo o correto dimensionamento e a análise estrutural adequada do sistema de cobertura.

Por conseguinte, procede-se à análise das cargas atuantes na cobertura, considerando as diversas forças que podem influenciar a estrutura, como o peso próprio das telhas, as cargas de vento e outras cargas variáveis.

- *Peso próprio (terças + tirantes + telhas + painéis):*

$$P_{pp} = (0,1 + 0,1 + 0,0375) * 1,6 = 0,38 \frac{kN}{m}$$

- *Sobrecarga + Utilidades :*

$$P_{sc} = (0,25 + 0,15) * 1,6 = 0,64 \frac{kN}{m}$$

- *Vento:*

$$P_v = 0,7129 * 1,6 * (-1,4) = 1,60 \frac{kN}{m}$$

De posse das cargas que incidem sobre a terça, prossegue-se com a realização das combinações de cargas, conforme os critérios estabelecidos pelas normas vigentes, garantindo que os esforços atuantes sejam devidamente analisados em condições críticas de carregamento. Para o cálculo, será utilizada a equação prescrita no tópico 4.7.7 na norma ABNT NBR 8800:2024.

$$F_D = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,K}) + \gamma_{q1} \times F_{Q1,K} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qi} \times F_{Gi,K} \times \Psi_{0j})$$

a) Considerando peso próprio e sobrecarga:

O peso próprio, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 8800:2024, apresenta um coeficiente de ponderação $\gamma_{gi} = 1,25$, enquanto a sobrecarga possui um coeficiente de ponderação $\gamma_{q1} = 1,5$.

$$\therefore F_{D,1} = 1,25 * 0,38 + 1,5 * 0,64$$

$$\therefore F_{D,1} = 1,44 \text{ kN/m}$$

Por conseguinte, considerando o eixo da terça, coordenadas locais, é possível determinar os esforços atuantes e as reações de apoio que incidem sobre o elemento em cada eixo, conforme exposto na Figura X.

• $F_{D,1} - \text{Eixo "y"}:$

$$F_{D,1,"y"} = 1,44 * \cos(13^\circ)$$

$$\therefore F_{D,1,"y"} = 1,40 \text{ kN/m}$$

• $F_{D,1} - \text{Eixo "x"}:$

$$F_{D,1,"x"} = 1,44 * \sin(13^\circ)$$

$$\therefore F_{D,1,"x"} = 0,32 \text{ kN/m}$$

b) Considerando peso próprio e vento:

O peso próprio, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 8800:2008, por atuar em sentido oposto ao do vento, apresenta um coeficiente de ponderação $\gamma_{gi} = 1,0$. Já o vento, sendo uma ação variável significativa, possui um coeficiente de ponderação $\gamma_{q1} = 1,4$.

Inferese, considerando o eixo da terça, coordenadas locais, é possível determinar os esforços atuantes e as reações de apoio que incidem sobre o elemento.

$$\therefore F_{D,2,y} = 1,0 * 0,38 * \cos(13^\circ) + 1,4 * (-1,60)$$

$$\therefore F_{D,2,y} = -1,87 \frac{kN}{m}$$

$$\therefore F_{D,2,x} = 1,4 * (-1,60) * \sin(13^\circ)$$

$$\therefore F_{D,2,x} = -0,09 \text{ kN/m}$$

c) De acordo com o item 6.4 da ABNT NBR 6120:2019, é necessário verificar a resistência das terças considerando o peso próprio somado a uma carga concentrada de 1 kN aplicada no ponto mais desfavorável do elemento. No caso das terças, esse ponto corresponde ao centro do vão, onde ocorre o momento máximo e, conseqüentemente, a solicitação mais crítica.

O peso próprio, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 8800:2024, apresenta um coeficiente de ponderação $\gamma_{gi} = 1,25$.

$$\therefore F_{D,3} = (1,25 * 0,38) \frac{kN}{m} + 1 \text{ kN aplicado no centro do vão da terça}$$

$$\therefore F_{D,3} = 0,48 \frac{kN}{m} + 1 \text{ kN aplicado no centro do vão da terça}$$

Por conseguinte, considerando o eixo da terça, coordenadas locais, é possível determinar os esforços atuantes e as reações de apoio que incidem sobre o elemento.

- $F_{D,3} - \text{Eixo "y"}:$

$$F_{D,3,"y"} = 0,48 \frac{kN}{m} * \cos(13^\circ) + 1 \text{ kN} * \cos(13^\circ)$$

$$F_{D,3,"y"} = 0,47 \frac{kN}{m} + 0,97 \text{ kN aplicado no centro do vão da terça}$$

- $F_{D,3} - \text{Eixo "x"}:$

$$F_{D,3,"x"} = 0,48 \frac{kN}{m} * \text{sen}(13^\circ) + 1 \text{ kN} * \text{sen}(13^\circ)$$

$$F_{D,3,"x"} = 0,11 \frac{kN}{m} + 0,23 \text{ aplicado no centro do vão da terça}$$

Por conseguinte, é apresentado a Tabela X, com um resumo dos esforços obtidos para dimensionamento. Ademais, visando reduzir os momentos fletores e melhorar as condições de estabilidade do perfil das terças, são projetadas linhas de correntes, que podem ser rígidas ou flexíveis, dispostas nos sentidos de menor inércia dos perfis.

Tabela 11 - Tabela resumo dos esforços na terça

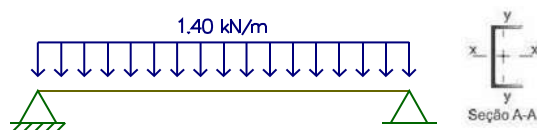
Combinação	$F_{D,"x"}$	$F_{D,"y"}$
1	0,32 kN/m	1,40 kN/m
2	- 0,09 kN/m	-1,87 $\frac{kN}{m}$
3	0,11 $\frac{kN}{m}$ + 0,23 aplicado no centro do vão da terça	0,47 $\frac{kN}{m}$ + 0,97 kN aplicado no centro d o vão da terça

Fonte: Autores, 2025.

a) $F_{D,1}$ – Eixo y:

Para a 1ª combinação de carregamentos no eixo “x”, a terça se apresenta com a seguinte configuração na Figura 42:

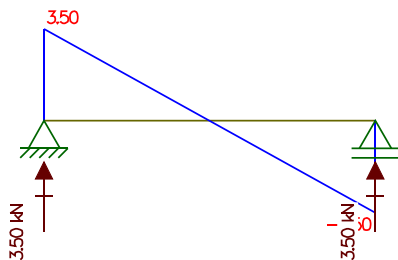
Figura 31 - Esquema de carregamentos na terça para a 1ª combinação eixo “y”



Fonte: Autores, 2025.

O diagrama de esforços cortantes, associado à primeira combinação no eixo “y” de carregamentos, são apresentados a seguir na Figura 43:

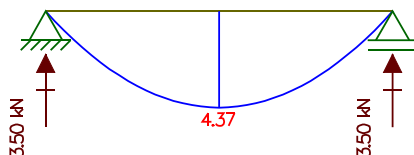
Figura 32 – Diagrama de esforço cortante na terça para a 1ª combinação eixo “y”



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes à primeira combinação no eixo “y” de carregamentos são evidenciadas na Figura 44:

Figura 33 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 1ª combinação eixo “y”.

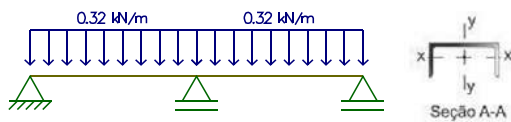


Fonte: Autores, 2025.

b) $F_{D,1}$ – Eixo “x”:

Para a 1ª combinação de carregamentos no eixo “x”, a terça se apresenta com a seguinte configuração na Figura 45:

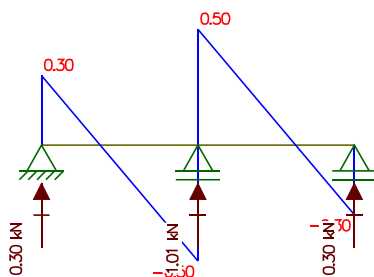
Figura 34 - Esquema de carregamentos na terça para a 1ª combinação eixo “x”



Fonte: Autores, 2025.

Os esforços cortantes, associados à primeira combinação de carregamentos no eixo “x”, são apresentados a seguir na Figura 46:

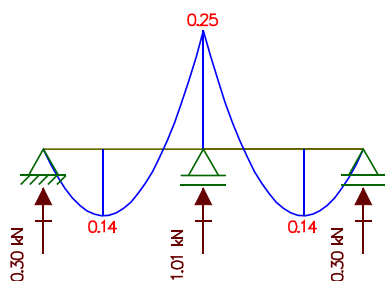
Figura 35 – Esforços cortantes na terça para a 1ª combinação no eixo “x”.



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes à primeira combinação no eixo “y” de carregamentos são evidenciadas na figura 47:

Figura 36 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 1ª combinação no eixo “y”.

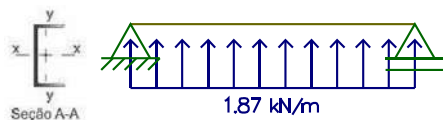


Fonte: Autores, 2025.

c) $F_{D,2}$ – Eixo “y”:

Para a 2ª combinação de carregamentos no eixo “y”, a terça se apresenta com a seguinte configuração na figura 48:

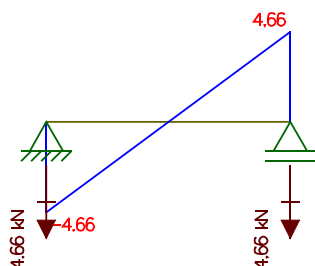
Figura 37 - Esquema de carregamentos na terça para a 2ª combinação no eixo “y”



Fonte: Autores, 2025.

Os esforços cortantes, associados à terceira combinação de carregamentos no eixo “y”, são apresentados a seguir na figura 49:

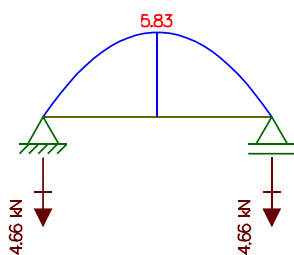
Figura 38 – Esforços cortantes na terça para a 2ª combinação no eixo “y”



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes à segunda combinação de carregamentos no eixo “x” são evidenciadas na figura 50:

Figura 39 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 2ª combinação no eixo “y”

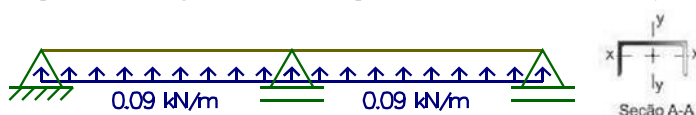


Fonte: Autores, 2025.

d) $F_{D,2}$ – Eixo "y":

Para a 2ª combinação de carregamentos no eixo "y", a terça se apresenta com a seguinte configuração na figura 51:

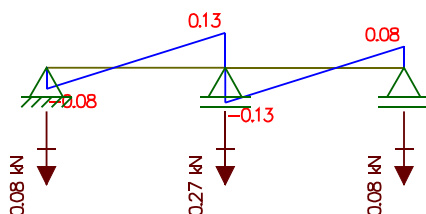
Figura 40 - Esquema de carregamentos na terça para a 2ª combinação no eixo "y"



Fonte: Autores, 2025.

Os esforços cortantes, associados à segunda combinação de carregamentos no eixo "y", são apresentados a seguir na figura 52:

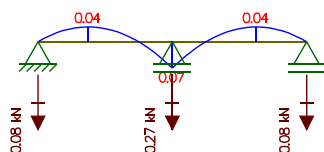
Figura 41 – Esforços cortantes na terça para a 2ª combinação no eixo "y"



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes a segunda combinação de carregamentos são evidenciadas na figura 53:

Figura 42 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 2ª combinação no eixo "y"

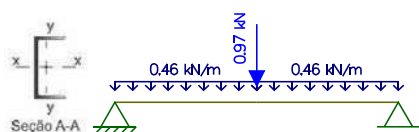


Fonte: Autores, 2025.

e) $F_{D,3}$ – Eixo "x":

Para a 3ª combinação de carregamentos no eixo "x", a terça se apresenta com a seguinte configuração na figura 54:

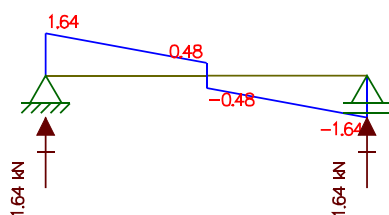
Figura 43 - Esquema de carregamentos na terça para a 3ª combinação no eixo "x"



Fonte: Autores, 2025.

Os esforços cortantes, associados à terceira combinação de carregamentos no eixo "x", são apresentados a seguir na figura 55:

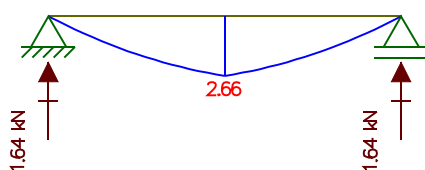
Figura 44 – Esforços cortantes na terça para a 3ª combinação no eixo "x"



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes à terceira combinação de carregamentos no eixo "x" são evidenciadas na figura 56:

Figura 45 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 3ª combinação eixo "x"

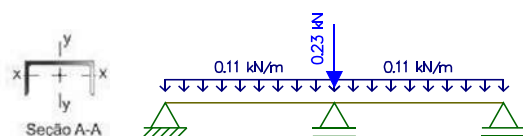


Fonte: Autores, 2025.

f) $F_{D,3}$ – Eixo "y":

Para a 3ª combinação de carregamentos no eixo "y", a terça se apresenta com a seguinte configuração na figura 57:

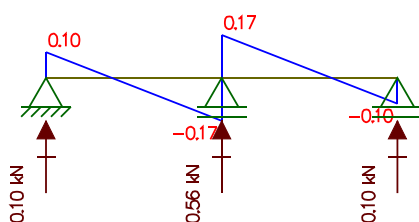
Figura 46 - Esquema de carregamentos na terça para a 3ª combinação no eixo "y".



Fonte: Autores, 2025.

Os esforços cortantes, associados à terceira combinação de carregamentos no eixo "y", são apresentados a seguir na figura 58:

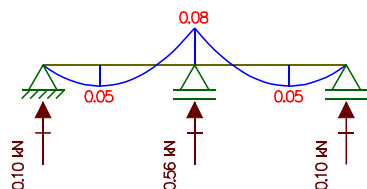
Figura 47 – Esforços axiais na terça para a 3ª combinação no eixo "y".



Fonte: Autores, 2025.

Os momentos fletores na terça, correspondentes à terceira combinação de carregamentos no eixo "y" são evidenciadas na figura 59:

Figura 48 – Momentos fletores (kNm) na terça para a 3ª combinação no eixo "y".



Fonte: Autores, 2025.

Dessa forma, com base nos diagramas apresentados, os dados são organizados a seguir apenas com os valores máximo encontrados dos momentos fletores e forças cortantes atuantes em cada eixo.

Tabela 12 – Resumo dos momentos e cortantes encontrados nas terças

	F_{D1}	F_{D2}	F_{D3}
$M_{Sd,x} (kN.m)$	4,40	5,80	2,70
$V_{Sd,x} (kN)$	3,50	4,70	1,70
$M_{Sd,y} (kN.m)$	0,30	0,10	0,10
$V_{Sd,y} (kN)$	0,50	0,10	0,20

Fonte: Autores, 2025.

$$M_{Sd,x,máx} = 5,80 \text{ kN.m}$$

$$M_{Sd,y,máx} = 0,30 \text{ kN.m}$$

$$V_{Sd,x,máx} = 4,70 \text{ kN}$$

$$V_{Sd,y,máx} = 0,50 \text{ kN}$$

- 4.3.3.1. Dimensionamento dos perfis
- 4.3.3.2. Verificação de flexão nas terças

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível visualizar o resumo das verificações realizadas para flexão nas terças. Todas as verificações foram satisfatórias, com $M_{R,d} > M_{S,d}$.

Tabela 13 - Resumo das verificações para flexão nas terças

Verificação	$M_{R,d}$ (kN.m)	$M_{S,d}$ (kN.m)
Início de escoamento da seção efetiva para o eixo X	13,77	5,80

Flambagem lateral com torção para o eixo X	10,62	5,80
Flambagem distorcional para o eixo X	13,77	5,80
Início de escoamento da seção efetiva para o eixo Y	3,08	0,30
Flambagem lateral com torção para o eixo Y	7,41	0,30

Fonte: Autores, 2025.

O cálculo segue diretamente para as verificações relacionadas à flexão, sendo necessário:

$$M_{R,d} > M_{S,d}$$

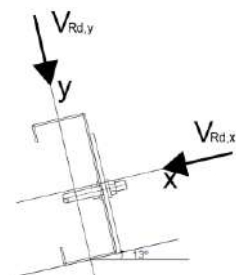
Sabendo que,

$M_{S,d}$ é o momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{R,d}$ refere – se ao momento fletor resistente de cálculo que deve ser tomado como o menor valor calculado em 4.4.5.2.1, 4.4.5.2.2 e 4.4.5.2.3 para o eixo X; 4.4.5.2.4 e 4.4.5.2.5 para o eixo Y.

- 4.3.3.2.1. Verificação do estado limite para o início de escoamento da seção efetiva para o eixo X ($M_{Rd,ex}$)
- 4.3.3.2.2. Verificação do estado limite para flambagem lateral com torção para o eixo X (M_{Rd,FLT_x})
- 4.3.3.2.3. Verificação do estado limite para flambagem distorcional para o eixo X (M_{Rd,FLT_x})
- 4.3.3.2.4. Verificação do estado limite para o início de escoamento da seção efetiva para o eixo Y ($M_{Rd,ey}$)
- 4.3.3.2.5. Verificação do estado limite para flambagem lateral com torção para o eixo Y (M_{Rd,FLT_y})
- 4.3.3.3. Verificação de cisalhamento nas terças

Figura 56 - Imagem para análise do cisalhamento no eixo X e no eixo Y



Fonte: Autores, 2025.

Na Tabela 14 é possível visualizar o resumo das verificações realizadas para cisalhamento nas terças. Todas as verificações foram satisfatórias, com $V_{R,d} > V_{S,d}$.

Tabela 14 - Resumo das verificações para cisalhamento nas terças

Verificação	$V_{R,d}$ (kN)	$V_{S,d}$ (kN)
Força cortante resistente de cálculo no eixo X	46,54	4,70
Força cortante resistente de cálculo no eixo Y	65,61	0,50

Fonte: Autores, 2025.

O cálculo segue diretamente para as verificações relacionadas ao cisalhamento, sendo necessário:

$$V_{R,d} > V_{S,d}$$

Sabendo que,

$V_{S,d}$ é o cortante solicitante de cálculo;

$V_{R,d}$ é o cortante resistente de cálculo.

4.3.3.3.1. Verificação da força cortante resistente de cálculo no eixo Y

($V_{R,dy}$)

4.3.3.3.2. Verificação da força cortante resistente de cálculo no eixo X

($V_{R,dx}$)

4.3.3.4. Verificação de compressão nas terças

4.3.3.4.1. Verificação da força axial de compressão resistente de cálculo para flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção ($N_{c,Rd,FT}$)

$$N_{c,Rd,FT} = \frac{\chi \times A_{ef} \times f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,20)$$

Sendo,

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, calculado conforme indicado a seguir:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$ $\chi = 0,658 \lambda_0^2$

Para $\lambda_0 > 1,5$ $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$

λ_0 é índice de esbelteza reduzido associado à flambagem global, dado por:

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

A é a área bruta da seção transversal da barra.

N_e é a força axial de flambagem global elástica, trata-se do menor valor entre N_{ey} e N_{exz}

- N_{ex} e N_{ey} são as forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x e eixo y, respectivamente, já calculadas no item 4.4.5.2.2. e 4.4.5.2.5.:

$$N_{ey} = 226,45 \text{ kN}$$

$$N_{ex} = 477,69 \text{ kN}$$

- N_{exz} é a força axial de flambagem global elástica por flexo-torção:

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

$$N_{exz} = \frac{477,69 + 226,45}{2 \times \left(1 - \left(\frac{9,86}{5,34} \right)^2 \right)} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 477,69 \times 226,45 \times \left(1 - \left(\frac{9,86}{5,34} \right)^2 \right)}{(477,69 + 226,45)^2}} \right)$$

$$N_{exz} = 64,51 \text{ kN}$$

Logo, $N_e = N_{exz} = 64,51 \text{ kN}$.

$$\lambda_0 = \left(\frac{A \times f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{9,87 \times 25}{64,51} \right)^{0,5} = 1,96$$

Para $\lambda_0 > 1,5$ $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{1,96^2} = 0,2293$$

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$A_{ef} = A \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,776;$$

$$A_{ef} = A \times \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \times \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_p > 0,776.$$

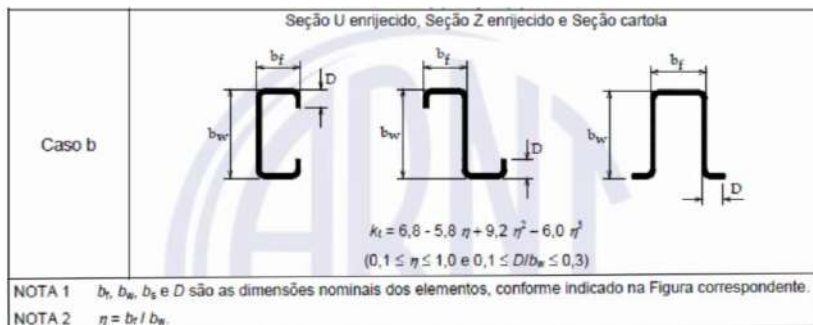
$$\lambda_p = \left(\frac{\chi \times A \times f_y}{N_l} \right)^{0,5}$$

N_l é a força axial de flambagem local elástica:

$$N_l = k_l \times \frac{\pi^2 \times E}{12 \times (1 - \nu^2) \times (b_w/t)^2} \times A$$

k_l é o coeficiente de flambagem local para a seção completa, obtido por meio das expressões da Figura 58.

Figura 58 - Coeficiente de flambagem local k_l para a seção completa em barras sob compressão centrada



Fonte: ABNT NBR 14762:2010

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{75}{200} = 0,375 \quad \frac{D}{b_w} = \frac{25}{200} = 0,125$$

$$k_l = 6,8 - 5,8 \times \eta + 9,2 \times \eta^2 - 6 \times \eta^3 = 5,60$$

$$N_l = 5,60 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12 \times (1 - 0,3^2) \times (200/2,65)^2} \times 9,87 = 175,48 \text{ kN}$$

Assim,

$$\lambda_p = \left(\frac{0,2293 \times 9,87 \times 25}{175,48} \right)^{0,5} = 0,5678$$

Para $A_{ef} = A$ para $\lambda_p \leq 0,776$;

Portanto,

$$N_{c,Rd,FT} = \frac{0,2293 \times 9,87 \times 25}{1,2} = 47,15 \text{ kN}$$

4.3.3.4.2. Verificação da força axial de compressão resistente de cálculo para flambagem distorcional ($N_{c,Rd,dist}$)

$$N_{c,Rd,dist} = \frac{\chi_{dist} \times A \times f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,20)$$

Figura 59 - Forças normais e momentos fletores críticos

Ue	N_{ℓ} (kN)	N_{dist} (kN)	$M_{\ell,x}$ (kNm)	$M_{dist,x}$ (kNm)	$M_{\ell,y}$ (kNm)
200 x 75 x 25 x 2,65	187,37	331,35	59,08	42,75	6,92

Fonte: Pierin; Silva e La Rovere, 2013.

Desse modo, $N_{dist} = 331,35 \text{ kN}$

Calculando o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional (λ_{dist}):

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{A \times f_y}{N_{dist}} \right)^{0,5} = \left(\frac{9,87 \times 25}{331,35} \right)^{0,5} = 0,8629$$

Como critério,

$$\chi_{dist} = 1 \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \times \frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,561$$

Assim,

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,25}{0,8629^{1,2}} \right) \times \frac{1}{0,8629^{1,2}} = 0,8374$$

Logo,

$$N_{c,Rd,dist} = \frac{\chi_{dist} \times A \times f_y}{\gamma} = \frac{0,8374 \times 9,87 \times 25}{1,2} = 172,19 \text{ kN}$$

4.3.3.4.3. Verificação de barras submetidas à flexão composta

A força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer a expressão de interação indicada a seguir:

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

$$\frac{17,51}{47,15} + \frac{0,25}{3,08} + \frac{5,80}{10,62} = 1$$

O que torna o perfil escolhido U 200x75x25x2,65x7,75kg/m adequado para a utilização no projeto, ainda mais ele passando em todas as verificações apesar da consideração conservadora em relação ao comprimento de flambagem de 5 metros.

4.3.3.5. Verificação da dispensa de enrijecedor nas terças

4.3.3.6. Verificação do deslocamento máximo vertical nas terças

Na Tabela 17 é possível visualizar o resumo das verificações realizadas para deslocamento vertical nas terças.

Tabela 17 - Resumo de deslocamentos máximos nas terças

$\delta_{v,m\acute{a}x}$	$\delta_{v,m\acute{a}x}$ (cm)	$\delta_{v,calculado}$ (cm)
L/180	2,78	0,21
L/120	4,17	0,63

Fonte: Autores, 2025.

De acordo com a Figura 60, a ABNT NBR 14762:2010 impõe os seguintes limites para os deslocamentos máximos em terças.

Figura 60 - Deslocamentos Máximos nas terças

Descrição	δ^a
Terças de cobertura ^g	L / 180 [*]
	L / 120 ^f
[*] Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente. ^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico. ^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.	

Fonte: ABNT NBR 14762:2010

- $\Delta = \frac{L}{180}$, considerando combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.

Primeiramente, calculando a combinação rara de serviço por:

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

Onde,

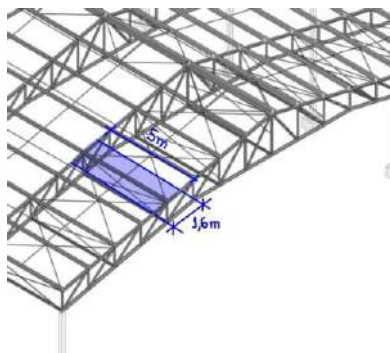
$F_{Gi,k}$ é a ação permanente, referente às terças, tirantes, telhas e painéis, totalizando 0,2375 kN/m².

$F_{Qi,k}$ é a ação variável. No caso, a sobrecarga acidental de 0,25 kN/m² e a de utilização 0,15 kN/m².

ψ_1 é um fator de redução para as ações variáveis, conforme Tabela 2 da ABNT NBR 8800:2024, $\psi_1=0,7$ para ações variáveis causadas pelo uso e ocupação, em coberturas.

Para transformá-las em uma carga distribuída sobre a terça, multiplicamos pelo comprimento de influência da terça, igual a 1,60 metros, ficando:

Figura 61 - Espaçamento entre as terças e as treliças



Fonte: Autores, 2025.

$$F_{Gi,k} = 0,2375 \times 1,6 = 0,38 \text{ kN/m}$$

$$F_{Q1,k} = 0,25 \times 1,6 = 0,40 \text{ kN/m}$$

$$F_{Q2,k} = 0,15 \times 1,6 = 0,24 \text{ kN/m}$$

Assim,

Para a carga de utilização como principal e sobrecarga accidental como secundária, temos(F_{ser1}):

$$F_{ser2} = ((0,38 \times \cos(\theta)) + 0,24 + (0,4 \times 0,7)) \times \cos(\theta) = 0,87 \text{ kN/m}$$

Para a sobrecarga accidental como principal e carga de utilização como secundária, temos(F_{ser2}):

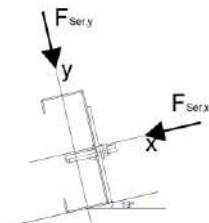
$$F_{ser2} = ((0,38 \times \cos(\theta)) + 0,4 + (0,24 \times 0,7)) \times \cos(\theta) = 0,91 \text{ kN/m}$$

Logo, escolhe-se o caso mais crítico $F_{ser} = F_{ser2}$.

$$F_{ser,x} = F_{ser} \times \sin(\theta) = 0,2057 \text{ kN/m}$$

$$F_{ser,y} = F_{ser} \times \cos(\theta) = 0,8908 \text{ kN/m}$$

Figura 62 - Indicação do sentido de atuação de $F_{ser,x}$ e $F_{ser,y}$



Fonte: Autores, 2025.

O cálculo do deslocamento é dado por,

$$\Delta = \frac{5 \times F_{ser} \times L^4}{384 \times E \times I_{ef}}$$

Calculando a inércia efetiva da seção, de acordo com o item 9.8.5 na NBR ABNT 14762/2010, para o método da seção efetiva (MSE),

$$I_{ef} = I_g \quad \text{para } \lambda_{pd} \leq 0,673$$

$$I_{ef} = I_g \times \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{pd}}\right) \times \frac{1}{\lambda_{pd}} \quad \text{para } \lambda_{pd} > 0,673$$

Onde,

$$\lambda_{pd} = \left(\frac{M_n}{M_l}\right)^{0,5}$$

M_n é momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço; com $L_x = 5\text{m}$ e $L_y = 2,5\text{m}$.

FIGURA MOSTRANDO LX E LY

$$M_{n,x} = \frac{F_{ser,y} \times 5^2}{8} = 2,79 \text{ kN.m}$$

$$M_{n,y} = \frac{F_{ser,x} \times 2,5^2}{8} = 0,16 \text{ kN.m}$$

M_l é o momento fletor de flambagem local elástica, já calculado;

$$M_{l,x} = 51,92 \text{ kN.m}$$

$$M_{l,y} = 27,94 \text{ kN.m}$$

I_g é o momento de inércia da seção bruta.

Calculando λ_{pd} ,

$$\lambda_{pd,x} = \left(\frac{M_{n,x}}{M_{l,x}} \right)^{0,5} = 0,2315$$

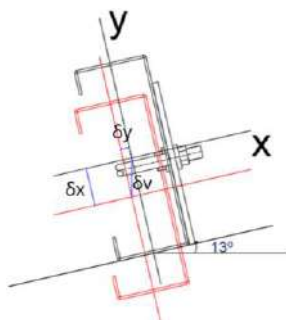
$$\lambda_{pd,y} = \left(\frac{M_{n,y}}{M_{l,y}} \right)^{0,5} = 0,0758$$

Em ambos os casos,

$$I_{ef} = I_g \quad \text{para } \lambda_{pd} \leq 0,673$$

Desse modo,

Figura 63 - Indicação do sentido dos deslocamentos



Fonte: Autores, 2025.

$$\delta x = \frac{5 \times F_{ser,y} \times L_x^4}{384 \times E \times I_x}$$

$$\delta x = 0,5991 \text{ cm}$$

$$\delta y = \frac{5 \times F_{ser,x} \times L_y^4}{384 \times E \times I_y}$$

$$\delta y = 0,0729 \text{ cm}$$

O deslocamento vertical ($\delta_{v,calculado}$) será o deslocamento resultante de Δx e Δy , com $\theta = 13^\circ$.

$$\delta_{v,calculado} = 0,5991 \times \sin(\theta) + 0,0729 \times \cos(\theta)$$

$$\delta_{v,calculado} = 0,21 \text{ cm} < 2,78 \text{ cm} = \delta_{v,m\acute{a}x}$$

- $\Delta = \frac{L}{120}$, considerando apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico e conservadoramente que o trecho L_x é biapoado, tem-se:

$$\delta y = \frac{5 \times F_{D2,x} \times L_y^4}{384 \times E \times I_y}$$

$$\delta y = -0,6317 \text{ cm}$$

$$\delta x = \frac{5 \times F_{D2,y} \times L_x^4}{384 \times E \times I_x}$$

$$\delta x = 0,0575 \text{ cm}$$

O deslocamento vertical ($\delta_{v,calculado}$) será o deslocamento resultante de Δx e Δy , com $\theta = 13^\circ$.

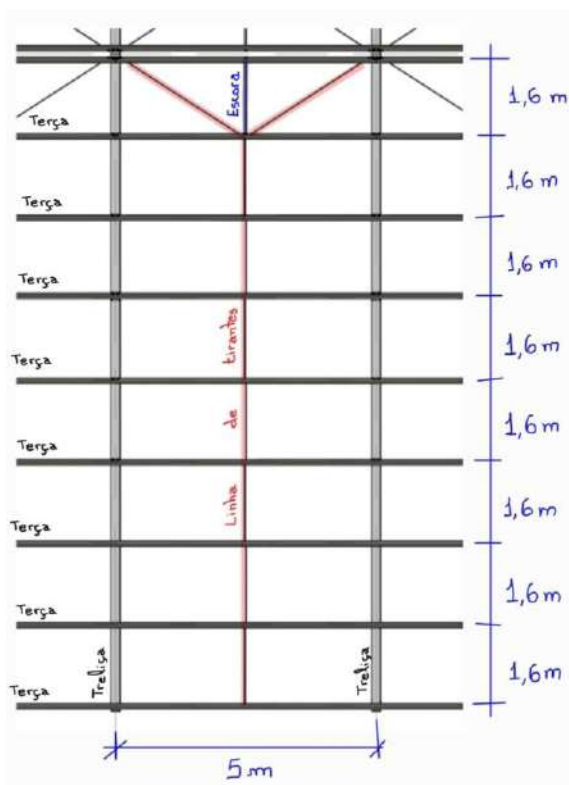
$$\delta_{v,calculado} = 0,0575 \times \sin(\theta) - 0,6317 \times \cos(\theta)$$

$$\delta_{v,calculado} = -0,63 \text{ cm} < 4,17 \text{ cm} = \delta_{v,m\acute{a}x}$$

4.3.4. Linha de corrente

A linha de corrente da cobertura representa o percurso de transmissão dos esforços entre os elementos que compõem o sistema estrutural. Conforme explicitado no edital do 7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia (CBCA, 2025), os tirantes das terças devem ser dimensionados considerando a atuação de uma única linha de corrente. Dessa forma, conforme ilustrado na Figura 40, o sistema do presente projeto é constituído pelo tirante flexível e pela escora. Por conseguinte, a Tabela X sintetiza os perfis adotados, sendo que o procedimento de cálculo é descrito posteriormente.

Figura 64 - Linha de corrente da cobertura



Fonte: Autores, 2025.

Tabela 18 - Perfis e esforços atuantes na linha de corrente da cobertura

Elemento	Perfil	Esforço solicitante de cálculo	Esforço resistente de cálculo
Tirante flexível	Barra de aço Ø 12,5 mm – rosqueada nas extremidades	7,56 kN 7,03 kN	30,68 kN
Escora	Cantoneira de abas iguais L 44,45mm x 3,17 mm	0,50 kN	14,21 kN

Fonte: Autores, 2025.

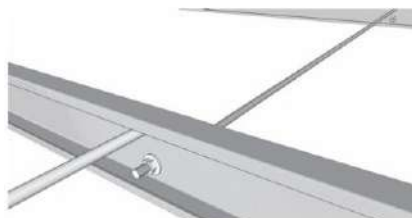
Formatado: Fonte: (Padrão) +Corpo (Aptos), Itálico

Formatado: Fonte: (Padrão) +Corpo (Aptos), Não Itálico

4.3.4.1. Tirante flexível

O dimensionamento dos tirantes da cobertura tem como objetivo primordial assegurar a segurança e a estabilidade estrutural da edificação, considerando as cargas envolvidas e as especificidades do projeto em questão. Para tanto, são empregados tirantes de barras redondas com extremidades rosqueadas, conforme ilustrado na **Figura 65**. Estes elementos terão a função de resistir às forças de tração aplicadas à cobertura, sendo cruciais para o desempenho estrutural.

Figura 65 - Sistema de tirantes flexíveis nas terças



Fonte: Instituto Aço Brasil (2010).

Considerando-se a adoção de barras de 12,5 mm, o primeiro passo é calcular a área bruta (A_b) da barra. Em seguida, determina-se a área efetiva (A_e), a qual, conforme estabelecido no item 6.3.2.2 da ABNT NBR 8800/2024, deve ser considerada como 75% da área bruta da barra.

- Cálculo da área bruta da barra:

$$A_b = 0,25 * \pi * d_b^2 = 0,25 * \pi * (1,25)^2 = 122,72 \text{ mm}^2$$

- Cálculo da área efetiva (A_e):

$$A_e = 0,75 * A_b = 0,75 * 122,72 \text{ mm}^2 = 92,04 \text{ mm}^2$$

Diante disso, calcula-se a resistência à tração pelo escoamento da seção maciça da barra utilizando a seguinte fórmula:

$$N_{t,rd} = \frac{A_b * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{122,72 \text{ mm}^2 * 0,345 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 38,49 \text{ kN}$$

Por conseguinte, calcula-se a resistência à tração pela ruptura da seção na rosca:

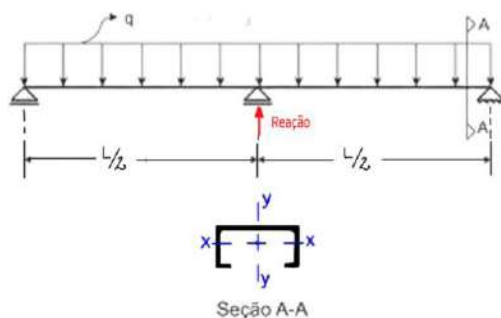
$$N_{t,rd} = \frac{A_e * f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{92,04 \text{ mm}^2 * 0,450 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{1,35} = 30,68 \text{ kN}$$

Dessa forma, a capacidade resistente da barra é definida pela resistência à tração pela ruptura da seção na rosca, uma vez que este valor é inferior à resistência à tração pelo escoamento da seção maciça da barra.

$$\therefore N_{t,rd} = 50,2655 \text{ kN}$$

Para a análise da carga solicitante, considera-se a carga atuante nos tirantes da cobertura, a qual corresponde à reação no apoio localizado no centro da terço, quando analisado o eixo y, conforme ilustrado na **Figura 66**.

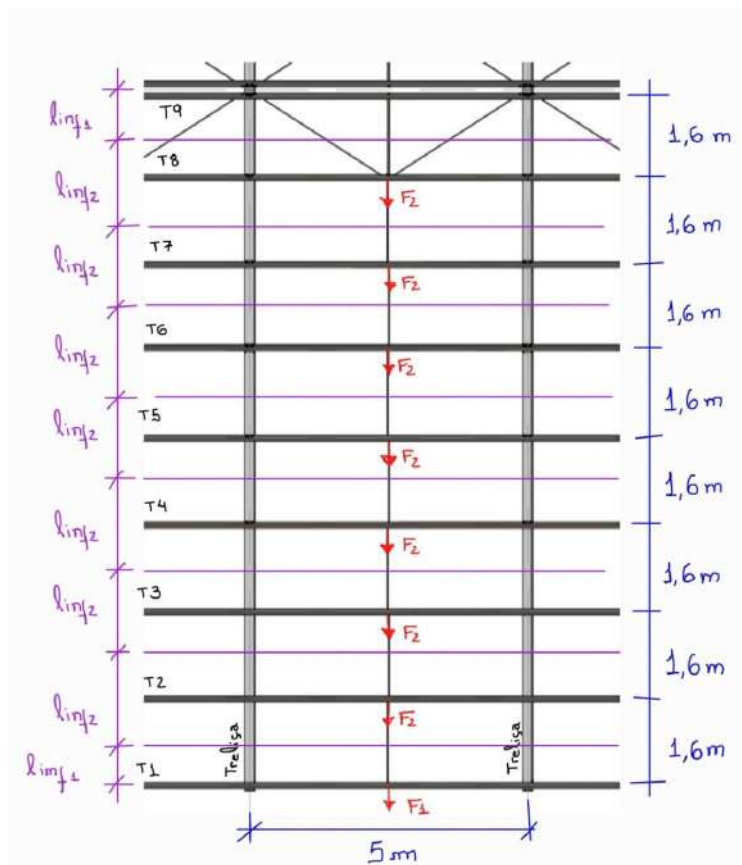
Figura 66 - Carga atuante nos tirantes da cobertura ao longo do eixo



Fonte: Autores, 2025.

Para determinar as forças atuantes nos tirantes, é necessário analisar cada terço considerando os carregamentos que atuam sobre ela. Conforme ilustrado na **Figura**, a terço T1 possui uma linha de influência de 0,8 m, enquanto as terços T2 a T8 apresentam linhas de influência de 1,6 m. As reações correspondentes às terços com linha de influência de 1,6 m já foram obtidas no dimensionamento das terços realizado anteriormente neste memorial, sendo o valor máximo de reação representado na Figura 16 igual a 1,01 kN.

Figura 67 - Áreas de influência de cada terço



Fonte: Autores, 2025.

No caso da terça T1, com linha de influência de 0,8 m, adota-se como pior cenário o mesmo da linha de influência de 1,6 m, ajustando-se apenas a carga proporcionalmente ao comprimento da linha de influência. Os resultados dessa análise estão esquematizados na Figura X, na qual a força de reação assume o valor de 0,50 kN.

- *Peso próprio (terças + tirantes + telhas + painéis):*

$$P_{pp} = \left(0,1 \frac{kN}{m^2} + 0,1 \frac{kN}{m^2} + 0,0375 \frac{kN}{m^2} \right) * 0,8 m = 0,19 \frac{kN}{m}$$

- *Peso variável (Sobrecarga + Utilidades):*

$$P_{sc} = \left(0,25 \frac{kN}{m^2} + 0,15 \frac{kN}{m^2} \right) * 0,8 m = 0,32 \frac{kN}{m}$$

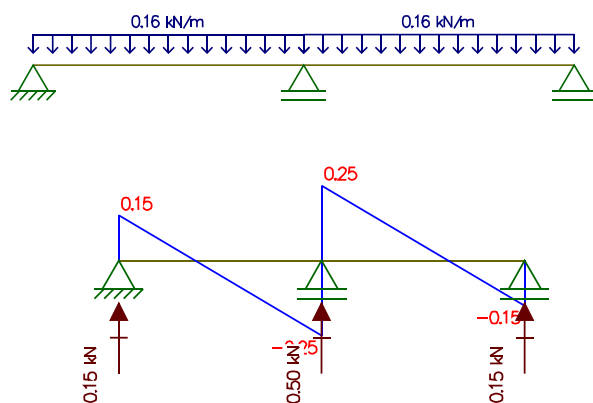
- *Combinação do carregamento:*

$$F_D = \gamma_{gi} * F_{Gi,K} + \gamma_{q1} * F_{Q1,K} = 1,25 * 0,19 \frac{kN}{m} + 1,5 * 0,32 \frac{kN}{m} = 0,72 \frac{kN}{m}$$

- *Decomposição para o eixo de análise:*

$$F_{D,y} = 0,72 \frac{kN}{m} * \text{seno}(13^\circ) = 0,16 \frac{kN}{m}$$

Figura 68 - Representação da terça T1 obtida pelo FTOOL



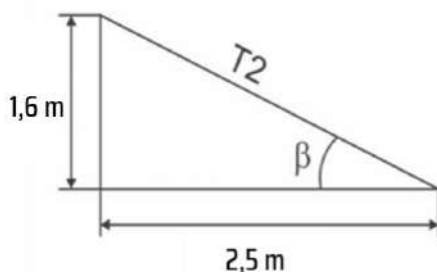
Fonte: Autores, 2025.

Dessa forma, calcula-se o esforço solicitante atuante no tirante entre as terças T8 e T9, que está disposto de forma diagonal, para fins de dimensionamento, o qual corresponde a:

$$F_{sd} = F_1 + 6,5 * F_2 = 0,50 kN + 6,5 * 1,01 kN = 7,58 kN$$

Para a análise do tirante primeiramente é necessário determinar seu comprimento e o ângulo β , conforme representado na figura 64.

Figura 69 - Disposição do tirante T2



Fonte: Autores, 2025.

$$T2 = \sqrt{1,6^2 + 2,5^2} = 2,97 \text{ m}$$

$$\arctg\left(\frac{1,6}{2,5}\right) = \beta = 32,62^\circ$$

- Carga atuante:

$$F_{t,sd} = \frac{F_{sd}}{\sin(32,62^\circ) * 2} = 7,03 \text{ kN}$$

- Análise:

$$F_{t,sd} = 7,03 \text{ kN} < 30,68 \text{ kN} = N_{t,rd}$$

4.3.4.2. Escora

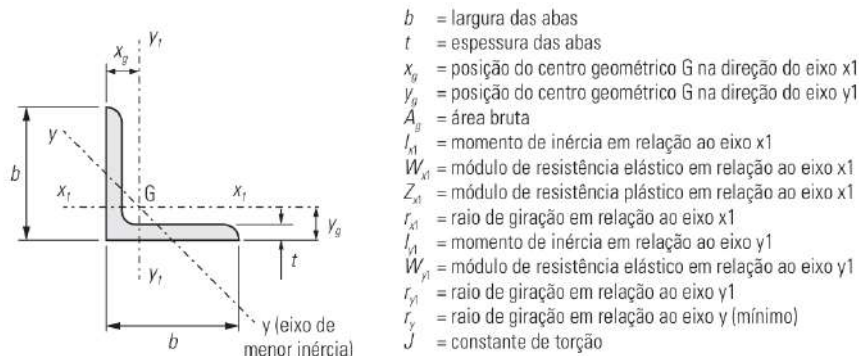
O dimensionamento da escora, localizado entre as terças T8 e T9 seguinte, é realizado para garantir a estabilidade do sistema de cobertura e a adequada transmissão das cargas. Este elemento atua como contraventamento, restringindo deslocamentos horizontais das terças de cumeeira e assegurando que mantenham sua posição relativa sob a ação de cargas permanentes, acidentais e forças do vento.

Para o dimensionamento, considera-se o pior caso da reação no meio do vão, obtida no eixo y, conforme **Figura 35** do item 4.3.4 do presente memorial, a partir do cálculo das terças realizado anteriormente. Dessa forma, ~~adota-se~~ adota-se como esforço solicitante de compressão o valor da reação de 1,01 kN.

Dando continuidade ao dimensionamento, é executado o cálculo do esforço resistente da escora. Nessa perspectiva, foi definido como ponto de partida o perfil metálico do tipo

cantoneira L 44,45 × 3,17 mm, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela X, adotado como estimativa para a verificação da capacidade resistente, conforme NBR 8800 (2024).

Tabela 19 - Cantoneira de abas iguais L 44,45 mm × 3,17 mm



Designação (mm x mm)	b	t	Xg = Yg	Ag	Massa	Ix1	Wx1	Zx1	rx1	ry	J
	mm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm	cm ⁴
L 44,45 × 3,17	44,45	3,17	12,2	2,71	2,14	5,41	1,64	2,92	1,40	0,89	0,091

Fonte: Autores, 2025.

Primeiramente, calcula-se o comprimento destravado ($L_{x,eq}$), conforme o item 5.3.5.4 da ABNT NBR 8800:2024, que estabelece os critérios para determinação do comprimento efetivo de flambagem dos elementos comprimidos.

$$\frac{L_{x,1}}{r_{x,1}} = \frac{160 \text{ cm}}{1,4 \text{ cm}} = 114,29 > 80$$

$$L_{x,eq} = 32 * r_{x,1} + 1,25 * L_{x,1} = 32 * (1,4 \text{ cm}) + 1,25 * (1,6 \text{ m}) = 244,8 \text{ cm}$$

$$\frac{L_{x,eq}}{r_{x,1}} = \frac{244,8 \text{ cm}}{1,4 \text{ cm}} = 174,86 < 200 \rightarrow \text{Atende}$$

Por conseguinte, é calculado a força axial crítica de flambagem, que representa a capacidade de flambagem da seção considerada e é o parâmetro inicial para a verificação da estabilidade da escora.

$$N_e = \frac{\pi^2 * E * I_{x1,L}}{(L_{x,eq})^2} = \frac{\pi^2 * 200 \text{ GPa} * 5,41 \text{ cm}^4}{(244,8 \text{ cm})^2} = 17,82 \text{ kN}$$

Por conseguinte, procede-se ao cálculo do índice de esbeltez reduzida, conforme estabelecido no item 5.3.3.2 da ABNT NBR 8800:2024.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g * f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{2,71 \text{ cm}^2 * 34,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{17,82 \text{ kN}}} = 2,29$$

De acordo com o item 5.3.3.1 da ABNT NBR 8800:2024, procede-se ao cálculo do fator de redução. Considerando que o valor de $\lambda_0 > 1,5$, aplica-se a expressão correspondente prevista na norma para a determinação do coeficiente redutor da resistência à compressão.

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{2,29^2} = 0,17$$

Ademais, procede-se à verificação da flambagem local, conforme estabelecido no item 5.3.4.2 da ABNT NBR 8800:2024.

$$\lambda_{FLM} = \frac{b}{t} = \frac{44,45 \text{ mm}}{3,17 \text{ mm}} = 14,02 < 200 \rightarrow ok$$

Para esses valores de esbeltez, devemos verificar se eles estarão dentro dos limites impostos pela norma, sendo estes de:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{limite} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,45 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 10,84$$

Dessa forma, prossegue-se com a comparação da esbeltez limite com a esbeltez do perfil analisado.

$$\frac{b}{t} < \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{limite}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow 14,02 < \frac{10,84}{0,17} \rightarrow 14,02 < 26,50 \rightarrow \text{não ocorre FLM}$$

A análise demonstra que, para o perfil em estudo, não ocorre flambagem local, de modo que a seção mantém sua capacidade resistente integralmente preservada.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * A_g * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,17 * 2,71 * 34,5}{1,1} = 14,21 \text{ kN}$$

Após a determinação do esforço resistente e a comparação com o esforço solicitante, verifica-se que o valor resistente é superior ao solicitante. Dessa forma, conclui-se que o perfil adotado atende plenamente às exigências de resistência, garantindo o adequado funcionamento estrutural da escora.

$$N_{sd} = 1,01 \text{ kN} < 14,21 \text{ kN} = N_{c,Rd}$$

- Pressão de contato

Por conseguinte, é realizada uma análise complementar do tirante, conforme esquematizado na **Figura**. Conforme prescrito no tópico 6.6 da norma 8800:2024, a força resistente de cálculo à pressão de contato depende das condições de superfície, sendo no caso de superfícies usinadas expressa por:

$$F_{c,RD} = \frac{1,8 * A * f_y}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

- A é a área de contato (ou área projetada no caso dos pinos), a qual será considerada como a área do tirante;
- f_y é a menor resistência ao escoamento das partes em contato;
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação, usualmente adotado igual a 1,35.

Figura 70 - Esquema de análise da pressão de contato



Fonte: Autores, 2025

Dessa forma, assegura-se que a tensão solicitante de contato não exceda a resistência de cálculo ao esmagamento, garantindo a segurança do elemento estrutural. Diante disso, procede-se ao cálculo considerando a força atuante no meio da terça, ponto de aplicação do tirante. Na análise do pior cenário, tem-se:

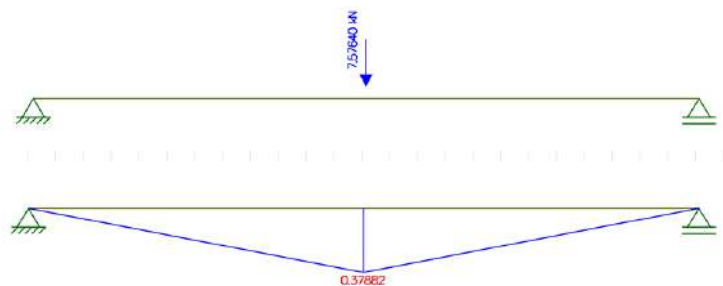
$$F_{t,sd} = 7,03 \text{ kN}$$

$$F_{c,RD} = \frac{1,8 * Ag * f_y}{\gamma_{a2}} = \frac{1,8 * 2,71 * 34,5}{1,35} = 124,66 \text{ kN}$$

$$F_{t,sd} = 7,03 \text{ kN} < F_{c,RD} = 124,66 \text{ kN}$$

Outra análise importante consiste em verificar se a tensão de flexão gerada por esse esforço no perfil da terça, na metade da alma, permanece abaixo da tensão de escoamento. Para isso, procede-se à análise do perfil, de acordo com suas propriedades mencionadas no item 4.3.4 do presente memorial, de modo simplificado, conforme ilustrado na figura abaixo, no qual a alma (20 cm) se apoia nas duas mesas. Esse procedimento garante que a seção transversal seja adequada para resistir às solicitações atuantes sem ultrapassar a capacidade resistente do material.

Figura 71 – Análise no ftool do perfil da terça



Fonte: Autores, 2025.

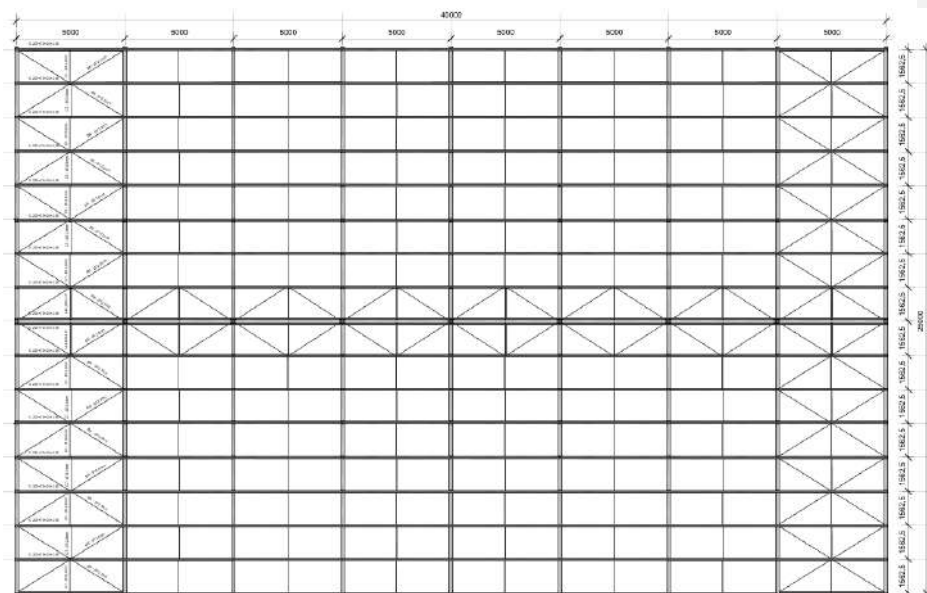
$$\sigma = \frac{y * M_{\max}}{I_y} = \frac{(2,20 \text{ cm}) * (0,38 \text{ kNm})}{71,7 \text{ cm}^4} = 11,62 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 11,62 \text{ MPa} < f_y = 345 \text{ MPa}$$

4.3.5. Tirantes de contraventamento da cobertura

No presente projeto, os tirantes de contraventamento foram estrategicamente posicionados nos vãos extremos da cobertura, em relação à sua maior dimensão (40 m). Ademais, a disposição dos tirantes segue um espaçamento a cada duas terças, conforme ilustrado na **Figura 72**. Sob essa perspectiva, a bitola dos tirantes foi definida em 12,5 mm, conforme os cálculos estruturais, cujo procedimento é detalhado posteriormente.

Figura 72 - Esquema de contraventamento



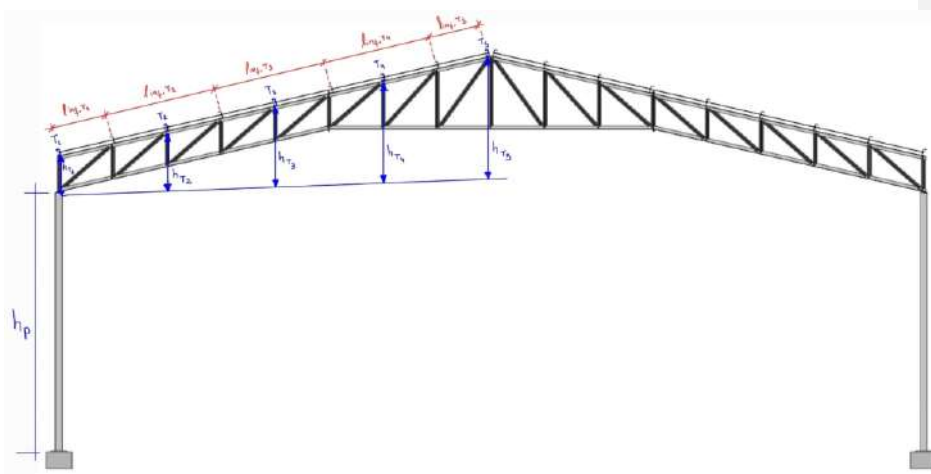
Fonte: Autores, 2025.

A rigidez do plano de contraventamento foi obtida por meio de diagonais dispostas em formato de "X". Nessa configuração, quando há solicitação de contraventamento, uma diagonal atua em tração enquanto a outra permanece comprimida. Para simplificação no dimensionamento, foi desconsiderada a atuação das diagonais comprimidas, considerando apenas as diagonais tracionadas. Essa abordagem resulta em um sistema treliçado isostático com menor consumo de aço.

É importante observar as recomendações do item 5.2.8.1 da ABNT NBR 8800 (2024), que estabelece que o índice de esbeltez (L/r) das barras tracionadas não deve exceder 300, exceto no caso de tirantes formados por barras redondas pré-tensionadas, solução adotada neste projeto. Dessa forma, a adoção das hipóteses apresentadas possibilita a obtenção de um modelo de cálculo simplificado e eficiente, proporcionando uma solução estrutural econômica que representa adequadamente o comportamento dos contraventamentos.

Para o cálculo do contraventamento, foi adotada uma metodologia que aproxima o comportamento do sistema por meio de uma análise baseada em treliça, conforme será esquematizado a seguir. Nesse contexto, é necessário determinar as alturas de cada ponto das terças que recebem o contraventamento, conforme exemplificado na Figura 73. O cálculo é realizado em apenas um dos lados da cumeeira, uma vez que ambos os lados apresentam geometria e comportamento simétricos, o que permite a aplicação de soluções idênticas em ambos os lados da estrutura.

Figura 73 - Vista frontal para análise do sistema de contraventamento da cobertura



Fonte: Autores, 2025.

$$h_{T1} = 1 \text{ m}$$

$$l_{inf,T1} = 1,6 \text{ m}$$

$$h_{T2} = 1,72 \text{ m}$$

$$l_{inf,T2} = 3,2 \text{ m}$$

$$h_{T3} = 2,44 \text{ m}$$

$$l_{inf,T3} = 3,2 \text{ m}$$

$$h_{T4} = 3,16 \text{ m}$$

$$l_{inf,T4} = 3,2 \text{ m}$$

$$h_{T5} = 3,89 \text{ m}$$

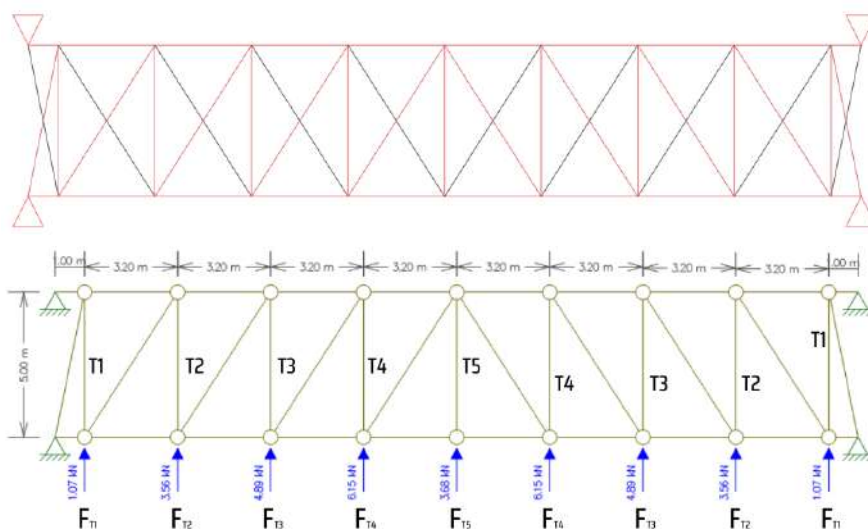
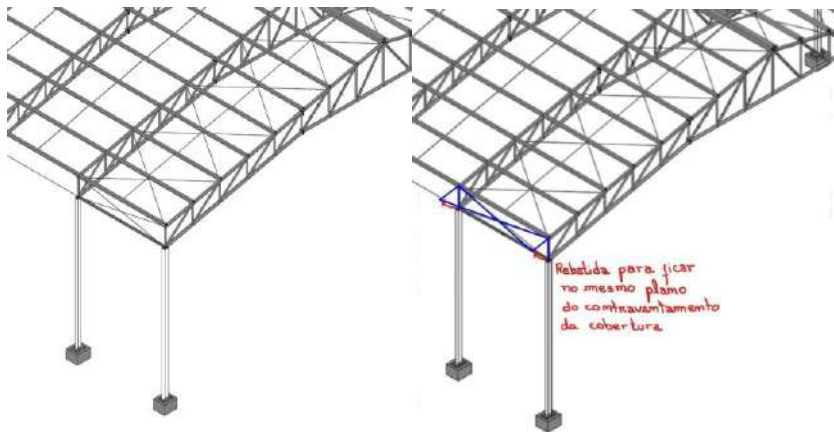
$$l_{inf,T5} = 1,6 \text{ m}$$

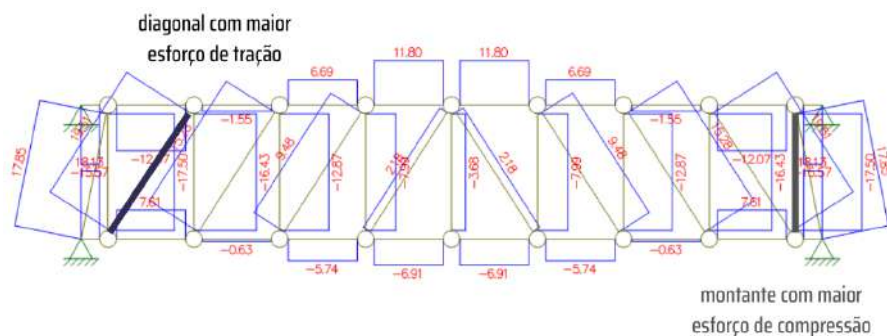
Por conseguinte, para as terças localizadas nos extremos, assim como para a terça da cumeeira — que foram designadas como T1 e T5, respectivamente — o comprimento de influência é de 1,6 m. Já para as terças intermediárias, nomeadas como T2, T3 e T4, esse comprimento de influência é o dobro, ou seja, 3,2 m. Dessa forma, procede-se com o cálculo da força solicitante em cada terça.

$$\begin{aligned} F_{T1} &= \left(q_{vento} * h_{T1} * \left(\frac{h_{T1}}{2} + h_p \right) \right) * \frac{l_{inf,T1}}{h_{T1} + h_p} \\ &= \left(712,89 \frac{N}{m^2} * 1 \text{ m} * \left(\frac{1 \text{ m}}{2} + 7,5 \text{ m} \right) \right) * \frac{1,6 \text{ m}}{1 \text{ m} + 7,5 \text{ m}} = 1,07 \text{ kN} \\ F_{T2} &= \left(712,89 \frac{N}{m^2} * 1,72 \text{ m} * \left(\frac{1,72 \text{ m}}{2} + 7,5 \text{ m} \right) \right) * \frac{3,2 \text{ m}}{1,72 \text{ m} + 7,5 \text{ m}} = 3,56 \text{ kN} \\ F_{T3} &= \left(712,89 \frac{N}{m^2} * 2,44 \text{ m} * \left(\frac{2,44 \text{ m}}{2} + 7,5 \text{ m} \right) \right) * \frac{3,2 \text{ m}}{2,44 \text{ m} + 7,5 \text{ m}} = 4,89 \text{ kN} \\ F_{T4} &= \left(712,89 \frac{N}{m^2} * 3,16 \text{ m} * \left(\frac{3,16 \text{ m}}{2} + 7,5 \text{ m} \right) \right) * \frac{3,2 \text{ m}}{3,16 \text{ m} + 7,5 \text{ m}} = 6,15 \text{ kN} \\ F_{T5} &= \left(712,89 \frac{N}{m^2} * 3,89 \text{ m} * \left(\frac{3,89 \text{ m}}{2} + 7,5 \text{ m} \right) \right) * \frac{1,6 \text{ m}}{3,89 \text{ m} + 7,5 \text{ m}} = 3,68 \text{ kN} \end{aligned}$$

Diante disso, é possível inserir os dados no ftool para o cálculo dos esforços, visando o dimensionamento do contraventamento. A análise será adaptada para o modelo de treliça, conforme esquematizado na Figura 74.

Figura 74 - Análise do contraventamento





Fonte: Autores, 2025.

Diante do resultado obtido no ftool, é selecionado o valor do maior esforço de tração atuante nas diagonais da treliça de 19,51 kN, utilizado para o dimensionamento do contraventamento. Além disso, também é coletado o maior esforço de compressão atuante no montante da treliça, que corresponde ao valor atuante na terça, totalizando 17,50 kN.

Adota-se, para o dimensionamento, uma barra rosqueada com diâmetro de 12,5 mm. Primeiramente, foi calculado a área bruta da barra, conforme a fórmula a seguir:

$$A_b = 0,25 * \pi * d_b^2 = 0,25 * \pi * (1,25 \text{ cm})^2 = 1,23 \text{ cm}^2$$

Em seguida, procede-se ao cálculo da área efetiva (A_e), que, conforme estabelecido no item 6.3.2.2 da ABNT NBR 8800 (2024), deve ser considerada como 75% da área bruta (A_b) da barra. A relação é dada pela expressão:

$$A_e = 0,75 * A_b = 0,75 * 1,23 \text{ cm}^2 = 0,92 \text{ cm}^2$$

Diante disso, calcula-se a resistência à tração pelo escoamento da seção maciça da barra utilizando a seguinte fórmula:

$$N_{t,rd} = \frac{A_b * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1,23 \text{ cm}^2 * 34,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 38,49 \text{ kN}$$

Por conseguinte, calcula-se a resistência à tração pela ruptura da seção na rosca:

$$N_{t,rd} = \frac{A_e * f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{0,92 \text{ cm}^2 * 45 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,35} = 30,68 \text{ kN}$$

Dessa forma, a capacidade resistente da barra é definida pela resistência à tração pela ruptura da seção na rosca, uma vez que este valor é inferior à resistência à tração pelo escoamento da seção maciça da barra. Com isso, verifica-se que a capacidade resistente da barra é superior à solicitação aplicada, com uma margem de segurança significativa.

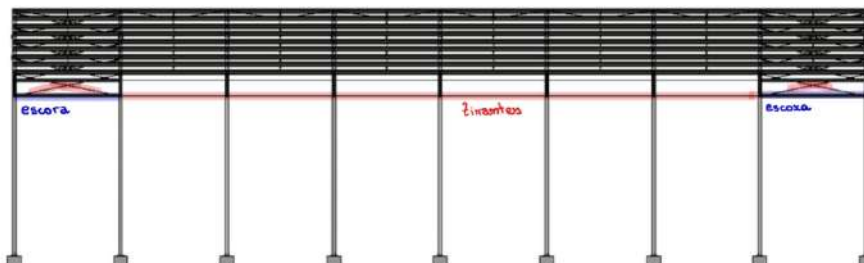
$$\therefore N_{t,rd} = 30,68 \text{ kN} > 19,51 \text{ kN} = N_{t,sd}$$

Ademais, não é realizado a avaliação da limitação do índice de esbeltez, desde que as barras rosqueadas sejam instaladas com a devida pré-tensão, em conformidade com as diretrizes normativas aplicáveis.

4.3.6. Sistema de travamento lateral do banzo inferior

Conforme ilustrado na Figura 40, o sistema de travamento lateral do banzo inferior do presente projeto é constituído por tirantes e escora. Por conseguinte, a Tabela X sintetiza os perfis adotados, sendo que o procedimento de cálculo é descrito posteriormente.

Figura 75 - Sistema de travamento lateral do banzo inferior



Fonte: Autores, 2025.

Tabela 20 - Perfis e esforços atuantes no travamento lateral

Elemento	Perfil	Esforço solicitante de cálculo	Esforço resistente de cálculo
Tirante flexível	Barra de aço Ø 12,5 mm – rosqueada nas extremidades	11,83 kN	30,68 kN
Escora	Cantoneira de abas iguais L 63,5mm x 4,76 mm	1,97 kN	23,72 kN

Fonte: Autores, 2025.

Formatado: Fonte: 12 pt

Para aumentar a eficiência do travamento lateral, é adotado a configuração em “X”, composta por tirantes dispostos diagonalmente entre os nós do banzo inferior e superior de treliças consecutivas. Este arranjo será instalado, conforme exposto na **Figura 75**, apenas entre a primeira e a segunda treliça e entre a última e a penúltima treliça, proporcionando maior resistência contra deslocamentos laterais e torção do banzo, distribuindo os esforços de flambagem entre múltiplos elementos e garantindo maior rigidez global do conjunto.

Além disso, para complementar a estabilidade entre as treliças que possuem o travamento em “X”, será instalada uma escora, conforme exposto na **Figura 75**, ligando os banzos inferiores de ambas as treliças. Nos vãos em que não há travamento em “X”, serão utilizados tirantes de mesma bitola do contraventamento, dimensionados apenas para ligar os banzos inferiores das treliças, assegurando a continuidade do travamento lateral e a estabilidade global da estrutura.

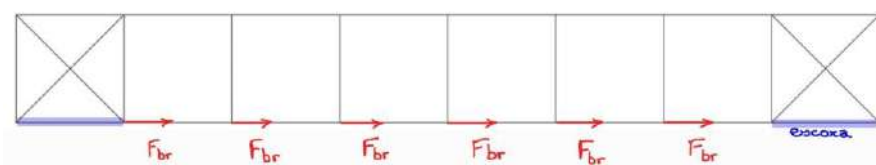
O dimensionamento do travamento lateral “X” do banzo inferior da treliça baseia-se no princípio de limitar os deslocamentos laterais da seção sob esforços de compressão, garantindo a estabilidade do elemento estrutural, conforme tópico 4.12.2 da NBR8800:2024. Para isso, utiliza-se o maior esforço compressão axial de cálculo que atua no banzo inferior, $N_{t,sd} = 197,08$ kN, obtido a partir da análise estrutural da treliça, como referência para o dimensionamento das contenções.

De acordo com as equações normativas, a força resistente de cálculo do travamento lateral F_{br} é definida como uma fração do esforço axial solicitado, segundo a expressão:

$$F_{br} = 0,01 * N_{t,sd} = 0,01 * 197,08 \text{ kN} = 1,97 \text{ kN}$$

Dessa forma, para o dimensionamento do contraventamento, considera-se como esforço solicitante a carga máxima que o elemento irá receber, correspondente à soma das solicitações provenientes dos seis vãos, os quais não possuem o contraventamento em “X”, exposto na **Figura**. Esse valor será utilizado como base para garantir que o elemento seja capaz de resistir adequadamente às solicitações atuantes.

Figura 76 - Vista lateral do sistema de travamento lateral



Fonte: Autores, 2025.

$$N_{sd} = 6 * F_{br} = 6 * 1,97 \text{ kN} = 11,82 \text{ kN}$$

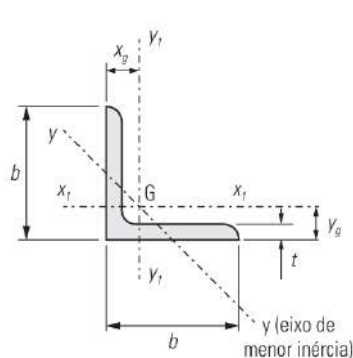
Adota-se, para o dimensionamento, uma barra rosqueada com diâmetro de 12,5 mm. Tal procedimento foi realizado no item 4.3.5.1 do presente memorial. Com isso, verifica-se que a capacidade resistente da barra é superior à solicitação aplicada, com uma margem de segurança significativa.

$$\therefore N_{t,rd} = 30,68 \text{ kN} > 11,82 \text{ kN} = N_{sd}$$

Ademais, a recomendação de limitar o índice de esbeltez não precisa ser avaliada, desde que as barras rosqueadas sejam instaladas com a devida pré-tensão, em conformidade com as diretrizes normativas aplicáveis.

- Escora

Tabela 21 - Cantoneira de abas iguais L 63,50 mm × 4,76 mm



b = largura das abas
 t = espessura das abas
 x_g = posição do centro geométrico G na direção do eixo x_1
 y_g = posição do centro geométrico G na direção do eixo y_1
 A_g = área bruta
 I_{x1} = momento de inércia em relação ao eixo x_1
 W_{x1} = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x_1
 Z_{x1} = módulo de resistência plástico em relação ao eixo x_1
 r_{x1} = raio de giração em relação ao eixo x_1
 I_{y1} = momento de inércia em relação ao eixo y_1
 W_{y1} = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y_1
 r_{y1} = raio de giração em relação ao eixo y_1
 r_y = raio de giração em relação ao eixo y (mínimo)
 J = constante de torção

Designação (mm x mm)	b	t	Xg Yg	Ag	Massa	Ix1 Iy1	Wx1 Wy1	Zx1 Zy1	rx1 ry1	ry	J
L 63,50 x 4,76	76,20	4,76	20,8	7,03	5,52	40	7,21	13,01	2,39	1,5	0,53

Fonte: Autores, 2025.

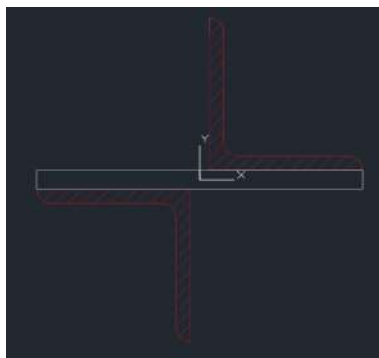
Por conseguinte, prossegue-se com o dimensionamento da escora, elemento estrutural responsável por transmitir os esforços provenientes da cobertura para os apoios principais. A escora desempenha papel fundamental na estabilidade do sistema, funcionando como componente de sustentação e garantindo a correta redistribuição dos esforços atuantes, sejam eles oriundos de cargas permanentes, variáveis ou das ações do vento.

Para o dimensionamento da escora, considera-se como esforço solicitante o valor de F_{br} obtido no dimensionamento anterior, garantindo que o elemento adotado seja capaz de resistir adequadamente às solicitações previstas.

$$F_{br} = 1,9708 \text{ kN}$$

Como as cantoneiras vão agir em um perfil composto, o esforço de compressão irá integralmente para o perfil.

FIGURA XX – Perfil composto cantoneira



REGIÕES	
Área:	11.6372
Perímetro:	50.8000
Caixa delimitadora:	X: -5.2651 -- 5.2651 Y: -4.4901 -- 4.4901
Centroide:	X: 0.0000 Y: 0.0000
Momentos de inércia:	X: 72.5644 Y: 118.4723
Produto de inércia:	XY: 0.0000
Raios de giro:	X: 2.4971 Y: 3.1907
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:	
I:	72.5644 em [1.0000 0.0000]
J:	118.4723 em [0.0000 1.0000]

$$\begin{aligned}
 A_g &:= 2 \cdot A_{g,L} = 11,6 \text{ cm}^2 & e &:= \sqrt{2 \cdot \left(1,4 \text{ cm} + \frac{0,62 \text{ cm}}{2}\right)^2} = 0,0242 \text{ m} \\
 I_x &:= 2 \cdot I_{x,L} = 74,1638 \text{ cm}^4 \\
 I_y &:= 2 \cdot \left(I_{y,L} + A_{g,L} \cdot e^2\right) = 85,6753 \text{ cm}^4 & J &:= 2 \cdot J_L = 0,88 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

Comprimento destravado equivalente

y e x são simétricos

$$L_{x1} := 5 \text{ m}$$

$$r_{menor} := 2,4971 \text{ cm}$$

$$r_{maior} := 3,1907 \text{ cm}$$

$$r_x := 2,865 \text{ cm}$$

$$r_y := 2,865 \text{ cm}$$

$$\frac{L_{x1}}{r_{menor}} = 200,2323 < 200$$

arredondar para 2,5

$$G := 7700 \text{ MPa}$$

$$r_0 := \sqrt{r_{menor}^2 + r_{maior}^2} = 4,0517 \text{ cm}$$

Fonte: Autores, 2025.

De acordo com o item 5.3.2 da NBR 8800/24 a força axial resistente de cálculo pode ser dada pela equação

$$N_{c,Rd} = \frac{X \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\delta_1}$$

Onde o parâmetro X pode ser calculado a partir do índice λ_0 , que pode ser calculado a partir da equação

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

Em que N_e , para o caso do perfil L pode ser encontrado por meio de:

$$N_{ex} = N_{ey} = \frac{\pi^2 * E * I_x}{L^2}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} * \left(\frac{\pi^2 * E * C_w}{L^2} + GJ \right)$$

Nessa equação, o comprimento L é de 500 cm

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * 20000 * 74,16}{500^2} = 58,56 \text{ kN}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * 20000 * 85,68}{500^2} = 67,65 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{7700 * 0,88}{4,05} = 41,28 \text{ kN}$$

N_e para barras compostas precisa ser calculado de forma diferente, como

$$\frac{l}{r_{min}} > 40$$

$$\frac{500/3}{1,24} > 40$$

$$134,41 > 40$$

N_e precisa ser multiplicado por um fator de redução

$$\frac{\left(\frac{L}{r}\right)^2}{\left(\frac{L}{r}\right)^2 + \left(Ki * \frac{l}{r_{min}}\right)^2} = \frac{\left(\frac{500}{2,4971}\right)^2}{\left(\frac{500}{2,4971}\right)^2 + (0,86 * 134,41)^2} = 0,7207$$

$$N_e * 0,7207 = 29,75 \text{ kN}$$

Com a força axial de flambagem definida, o cálculo do índice de esbeltez reduzido λ_0 seguiu da seguinte forma.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{(Ag * fy)}{Ne}} = 3,67$$

Como $\lambda_0 > 1,5$. A equação do fator de redução χ se dá por:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = 0,0652$$

Para o cálculo da área efetiva A_{ef} , é necessário o cálculo da esbeltez da aba do perfil, em que:

$$\frac{b}{t} = 13,34$$

Para esses valores de esbeltez, devemos verificar se eles estarão dentro dos limites impostos pela norma, sendo estes de:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{fy}} = 10,83$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim, flexão-torção} = 0,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{fy}} = 17,09$$

Para se comparar a esbeltez com a esbeltez limite com a esbeltez dos elementos do perfil analisado, deve-se ainda dividir a esbeltez limite pela raiz do índice de redução χ .

$$\frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} = 66,95$$

Como:

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

A largura do elemento é igual a largura efetiva, o que implica que a área bruta da seção será igual a área efetiva

$$A_g = A_{ef} = 9,16 \text{ cm}^2$$

Logo:

$$N_{crd} = \frac{\chi * A_g * f_y}{1,1} = 23,72 \text{ kN}$$

Após a determinação do esforço resistente e a comparação com o esforço solicitante, verifica-se que o valor resistente é superior ao solicitante. Dessa forma, conclui-se que o perfil adotado atende plenamente às exigências de resistência, garantindo o adequado funcionamento estrutural do tirante rígido.

$$F_{sd} = 1,9708 \text{ kN} < 23,72 \text{ kN} = N_{c,Rd}$$

4.3.1.5 Espaçamento entre chapas

Para verificação do espaçamento entre chapas, o item 5.3.6.3 da NBR 8800/24 faz o uso da seguinte inequação

$$\left(\frac{l}{r_{min}}\right) \leq 0,75 \cdot \left(\frac{L}{r}\right)_0$$

Onde l é o espaçamento entre as chapas, valor que é recomendado de $\frac{1}{3}$ do vão da barra, no pior cenário seria 134,41 cm. O r_{min} seria o raio de giração no eixo z da cantoneira de forma individual e r seria o menor raio de giração do perfil composto

$$134,41 \geq 0,75 \cdot \left(\frac{500}{r_{menor}}\right)$$

$$134,41 \geq 150,17$$

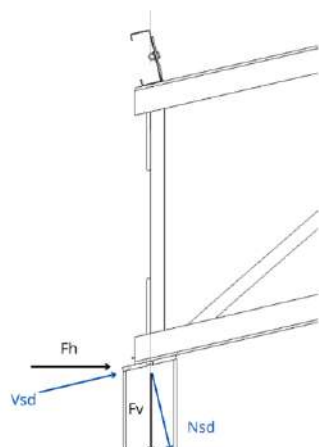
Será necessária 3 chapas espaçadoras equidistantes, já que a verificação de espaçamento concluiria que a divisão mínima determinada pela norma seria suficiente para atender ao critério de estabilidade da NBR 8800/24.

4.4. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

4.4.1. LIGAÇÃO ENTRE TRELIÇA E PILAR

Após uma análise das reações de apoio da treliça para as diferentes combinações no Estado Limite Último, escolheu-se as maiores forças solicitantes para o dimensionamento da ligação de ambos os apoios da treliça.

Figura 77 - Apoio da treliça



Fonte: Autores, 2025.

$F_h = 8,35 \text{ kN}$ (Força horizontal);

$F_v = 36,18 \text{ kN}$ (Força vertical de tração);

Convertendo para atuarem perpendicular ou paralelamente ao apoio com inclinação de 13° ,

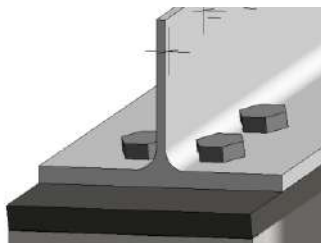
$V_{sd} = 8,35 \times \cos(\theta) - 36,18 \times \sin(\theta) = 0,02 \text{ N}$ (cortante)

$N_{sd} = 8,35 \times \sin(\theta) - 36,18 \times \cos(\theta) = 37,13 \text{ kN}$ (tração)

4.4.1.1. Apoio de segundo gênero

Será ligado o banzo da treliça diretamente no pilar, com uma chapa de topo, por meio de parafusos, como mostra a

Figura 78 - Ligação segundo gênero treliça-pilar



Fonte: Autores, 2025.

Será utilizado furo padrão, para impedir deslocamento, seguindo as indicações da ABNT NBR 8800:2024. Os parafusos serão de aço ASTM A325, com $f_y = 635 \text{ MPa}$ e $f_u = 830 \text{ MPa}$. O parafuso adotado tem $\varnothing 16 \text{ mm}$ – o menor diâmetro para o ASTM A325.

$d_b = 16 \text{ mm}$ (diâmetro do parafuso);

Tabela 22 - Dimensão máxima de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Tipo de furo	Condição de cálculo
Diâmetro do furo padrão (d_n)	$d_b + 3 \text{ mm}$

Fonte: Autores, 2025.

Acrescentando 0,5 mm de folga,

$d_n = d_b + 3 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm} = 16 + 3 + 0,5 = 19,5 \text{ mm}$ (diâmetro do furo).

4.4.1.1.1. Disposição construtiva

Distância mínima entre furo e borda: $d_{fb,min} = 1,25 \times d_b = 1,25 \times 16 = 20 \text{ mm}$

Distância máxima entre furo e borda: $d_{fb,máx} = \begin{cases} 1,25 \times d_w = 12 \times 10,2 = 122,4 \text{ mm} \\ 150 \text{ mm} \end{cases}$

Distâncias entre furo e borda adotadas: $\begin{cases} d_{fb1} = 30 \text{ mm} \\ d_{fb2} = 57,2 \text{ mm} \end{cases}$

Distância mínima entre furo e alma do WT para permitir o uso dos instrumentos de aperto: $d_{fa,min} = 1,35 \times d_b = 1,35 \times 16 = 21,6 \text{ mm}$

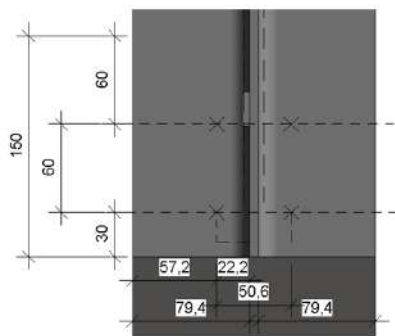
Distância entre furo e alma do WT adotada: 22,2 mm

Distância mínima entre furo e furo: $d_{ff,min} = 3 \times d_b = 3 \times 16 = 48 \text{ mm}$

Distância máxima entre furo e furo: $d_{ff,máx} = \begin{cases} 24 \times d_w = 24 \times 10,2 = 248,8 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \end{cases}$

Distâncias entre furo e furo adotadas: $\begin{cases} d_{ff1} = 60 \text{ mm} \\ d_{fb2} = 50,6 \text{ mm} \end{cases}$

Figura 79 - Disposição dos furos



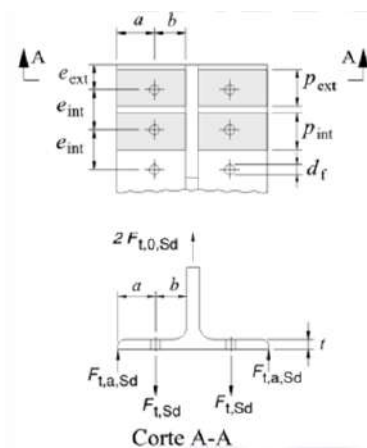
Fonte: Autores, 2025.

Verificando se a mesa do WT funciona como placa rígida,

$$t = \sqrt{\frac{4 \times (b - 0,5 \times d_b) \times N_{Sd} \times \gamma_{a1}}{p \times f_u}} \quad (\gamma_{a1} = 1,10)$$

As medidas de referência podem ser conferidas na Figura 80.

Figura 80 - Geometria para a verificação da placa rígida



Fonte: ABNT NBR 8800:2024

Assim,

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$f_u = 450 \text{ MPa}$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$a_{real} = 57,2 \text{ mm}, \text{ mas para efeito de cálculo } a_{m\acute{a}x} = 20 \text{ mm}.$$

$$a = 20 \text{ mm}$$

$$b = 22,2 \text{ mm}$$

$$e_{ext} = 60 \text{ mm}$$

$$e_{int} = 30 \text{ mm}$$

$$p = p_{ext} = \min(e_{ext}; 1,75 \times b) + \min(0,5 \times e_{int}; 1,75 \times b)$$

$$p = p_{ext} = \min(30 \text{ mm}; 38,85 \text{ mm}) + \min(30 \text{ mm}; 38,85 \text{ mm}) = 60 \text{ mm}$$

Então,

$$t = \sqrt{\frac{4 \times (22,2 - 0,5 \times 16) \times 37,13 \times 1,10}{60 \times 0,45}} = 9,27 \text{ mm}$$

A mesa do banzo tem espessura de 10,2 mm.

$$t_{mesa,WT} = 10,20 \text{ mm} > 9,27 \text{ mm} = t.$$

Logo, chapa funciona como rígida.

4.4.1.1.2. Dimensionamento de parafusos – Tração

$n = 4$ (quantidade de parafusos)

$$F_{t,sd} = \frac{N_{sd}}{n} = 9,28 \text{ kN}$$

$$a_{be} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,51 \text{ cm}^2 \text{ (considerando a rosca no plano de corte)}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{a_{be} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{1,51 \cdot 83}{1,35} = 92,71 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 92,71 \text{ kN} > 9,28 \text{ kN} = F_{t,sd} \quad \text{OK!}$$

4.4.1.1.3. Dimensionamento de parafusos – Cisalhamento

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b = \frac{\pi \cdot db^2}{4} = 2,01 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{0,45 \cdot 2,01 \cdot 83}{1,35} = 55,63$$

$$F_{v,Rd} = 55,63 > F_{v,Sd} = \frac{V_{Sd}}{4} = 0,005 \text{ N} \quad \text{OK!}$$

4.4.1.1.4. Dimensionamento de parafusos – Tração e cisalhamento combinado

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 = 0,01 < 1 \quad \text{OK!}$$

Limitação adicional do valor da força de tração solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada, de acordo com a Tabela 12 da ABNT NBR 8800.

$$\frac{f_u \cdot a_b}{\gamma_{a2}} - 1,9 \cdot F_{v,Sd} = 67,02 \text{ kN} > 9,28 \text{ kN} = F_{t,Sd} \quad \text{OK!}$$

4.4.1.1.5. Dimensionamento da pressão de contato em furos na mesa do perfil WT

$$F_{c,Rd} \leq \begin{cases} \frac{1,2 \times l_f \times t \times f_u}{\gamma_{a2}} \\ \frac{2,4 \times d_b \times t \times f_u}{\gamma_{a2}} \end{cases}$$

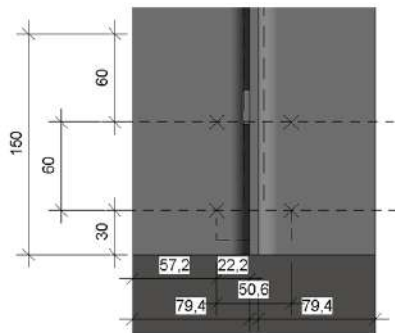
l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

Assim,

$$l_f \leq \begin{cases} d_{ff1} - d_n = 60 - 19,5 = 40,5 \text{ mm} \\ d_{fb1} - 0,5 \times d_n = 30 - 0,5 \times 19,5 = 20,25 \end{cases}$$

$$l_f = 20,25 \text{ mm}$$

Figura 81 - Disposição dos furos



Fonte: Autores, 2025.

$$F_{c,Rd} \leq \begin{cases} \frac{1,2 \times l_f \times t \times f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{1,2 \times 20,25 \times 102 \times 0,45}{1,35} = 82,62 \text{ kN} \\ \frac{2,4 \times d_b \times t \times f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{2,4 \times 16 \times 102 \times 0,45}{1,35} = 130,56 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{c,Rd} = 82,62 \text{ kN} > V_{sd} = 0,02 \text{ N}$$

4.4.1.2. Apoio de primeiro gênero

Tabela 23 - Dimensão máxima de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Tipo de furo	Condição de cálculo
Diâmetro do furo muito alongado (d_n)	$(d_b + 3 \text{ mm}) \times (2,5 \times d_b)$

Fonte: Autores, 2025.

4.4.2. Ligação entre montante, diagonal e banzos

O dimensionamento da referida ligação encontra-se detalhado no Apêndice A, onde são apresentadas as etapas de verificação e os respectivos resultados obtidos conforme os critérios normativos aplicáveis.

4.4.3. Ligação entre terça e banzo superior

O dimensionamento da referida ligação encontra-se detalhado no Apêndice A, onde são apresentadas as etapas de verificação e os respectivos resultados obtidos conforme os critérios normativos aplicáveis.

4.4.4. Entre segmentos da treliça

4.4.4.1. Esforços Solicitantes

Para a ligação entre segmentos da treliça, há esforço de compressão e cisalhamento

$$N_{sd} = 1,5 \cdot 192,03 = 288,05 \text{ kN (placa não rígida)}$$

$$Q_{sd} = 44,33 \text{ kN}$$

4.4.4.2. Disposições Construtivas

Apoio de primeiro gênero

Os parafusos escolhidos e furo-padrão são

$$db = 16 \text{ mm}$$

$$dn = 16 + 3,5 = 19,5 \text{ mm}$$

Distância mínima entre furo-borda e furo-perfil

$$1,25 \cdot db = 2 \text{ cm}$$

$$1,35 \cdot db = 2,16 \text{ cm}$$

$$d_{\min} = 2,2 \text{ cm}$$

A distância adotada foi de

$$e_{int} = e_{ext} = 3 \text{ cm}$$

A largura tributária do parafuso foi de

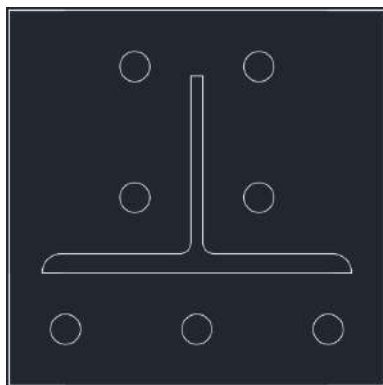
$$p = \min(e_{ext}; 1,75 \cdot b) + \min(0,5 \cdot e_{int}; 1,75 \cdot b) = 4,5 \text{ cm}$$

Há também a consideração do efeito de alavanca, pois

$$tr = \sqrt{\frac{4 \cdot (e_{int} - 0,5 \cdot db) \cdot N_{sd} \cdot \delta_1}{p \cdot f_u}} = 37,11 \text{ mm}$$

$$tr_{adot} = 20 \text{ mm}$$

FIGURA XX - Ligação entre as partes da Treliça



Fonte: Autores, 2025.

4.4.4.3. Parafusos a tração

$n = 7$ (quantidade de parafusos)

$$F t_{sd} = \frac{N_{sd}}{n} = 41,15 \text{ kN}$$

$$A_{be} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot db^2}{4} = 1,51 \text{ cm}^2$$

$$F t_{Rd} = \frac{A_{be} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 92,71 \text{ kN} > F t_{sd}$$

4.4.4.4. Parafusos ao cisalhamento

$$A_b = \frac{\pi \cdot db^2}{4} = 2,01 \text{ cm}^2$$

$$F v_{Rd} = \frac{0,45 \cdot A_b \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 55,63 > F v_{sd} = \frac{Q_{sd}}{7} = 6,33 \text{ kN}$$

4.4.4.5. Parafusos ao cisalhamento e tração

$$\left(\frac{F t_{sd}}{F t_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F v_{sd}}{F v_{Rd}} \right)^2 = 0,22 < 1$$

$$\frac{f_u \cdot A_b}{\gamma_{a2}} - 1,9 \cdot F v_{sd} = 50,18 \text{ kN} > F t_{sd} = 41,15 \text{ kN}$$

4.4.4.6. Pressão de contato em furos na chapa

$$l_f = e_{ext} - \frac{dn}{2} = 20,25mm$$

$$F_{c_{Rd1}} = \frac{1,2 \cdot l_f \cdot tr \cdot fu}{\gamma_{a2}} = 162kN$$

$$F_{c_{Rd2}} = \frac{2,4 \cdot db \cdot tr \cdot fu}{\gamma_{a2}} = 162kN$$

$$F_{c_{Rd}} = 162kN > Q_{sd} = 44,33kN$$

4.4.4.7. Rasgamento na chapa

$$l = 17,91 \text{ cm}$$

$$A_{gv} = tr \cdot (2 \cdot l) = 71,64cm^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} - (5 \cdot tr \cdot dn) = 52,14cm^2$$

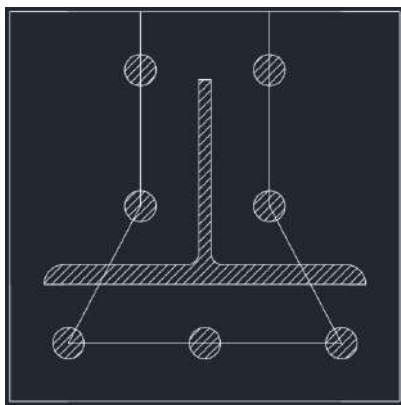
$$A_{nt} = tr \cdot (14 - 2 \cdot dn) = 20,2cm^2$$

$$F_{Rd1} = 1716,13kN$$

$$F_{Rd2} = 1771,81kN$$

$$F_{Rd} = 1716,13 \text{ kN} > F_{sd} = 44,33kN$$

Figura 82 -Rasgamento na chapa entre partes da treliça



Fonte: Autores, 2025.

4.4.4.8. Cisalhamento na chapa

$$Agv = \frac{71,64}{2} = 35,82$$

$$Anv = \frac{52,14}{2} = 26,07$$

$$F_{Rd1} = 674,07kN$$

$$F_{Rd2} = 524kN$$

$$F_{Rd} = 524kN > Q_{sd} = 44,33kN$$

4.4.4.9. Tração na chapa

$$Ag = 0,004m^2$$

$$An = 0,0034m^2$$

$$R_{d,ti} = \frac{An \cdot fu}{\delta 2} = 1120kN$$

$$R_{d,te} = \frac{Ag \cdot fy}{\delta 1} = 1254,55kN$$

$$R_{d,t} = 1120kN > N_{sd} = 192,03kN$$

4.4.4.10. Flexão na chapa

$$N_{sd} = \frac{288,05}{7} = 27,43kN$$

$$M_{sd} = 27,43 \cdot 0,03 = 0,82kN \cdot m$$

$$W = \frac{p \cdot tr^2}{6} = 3cm^3$$

$$M_{Rd} = \frac{W \cdot fy}{\delta 1} = 0,94kN \cdot m$$

$$M_{Rd} > M_{sd}$$

4.4.4.11. Solda dos perfis

$$fw = 48,5 \frac{kN}{cm^2}$$

$$Aw = 6 \cdot 531 = 0,0032m^2$$

$$F_{Rds} = \frac{0,6 \cdot Aw \cdot fw}{\delta 2} = 687kN > N_{sd} = 192,03kN$$

5. CONCLUSÃO TÉCNICA

Diante do exposto, conclui-se que o projeto de cobertura treliçada metálica apresentou plena viabilidade técnica e econômica, evidenciando o potencial do aço como material estrutural eficiente e sustentável. O dimensionamento foi conduzido de forma detalhada e em conformidade com as normas técnicas referenciadas no presente memorial, assegurando a precisão dos resultados e o desempenho adequado da estrutura. A proposta alcançou um equilíbrio entre resistência, estabilidade e economia de materiais, resultando em uma solução segura e racional. Além disso, a utilização exclusiva de softwares gratuitos ou com licenças estudantis reforça o compromisso com a democratização do conhecimento e com a acessibilidade das ferramentas de cálculo estrutural. Dessa forma, o projeto cumpre seus objetivos ao integrar eficiência técnica, responsabilidade acadêmica e sustentabilidade.

5.1. ESTIMATIVA DO CONSUMO TOTAL DE AÇO ESTRUTURAL PARA A ESTRUTURA DE COBERTURA E PLANILHA COM ÍNDICES DE CONSUMO DE AÇO (KG/M²)

Tabela 24 - Consumo total de aço

Elemento	Perfil	kg/m	Comprimento Total (m)	Massa(kg)
Banzo Inferior e banzo superior	WT 100x17,95	17,95	459,61	8250
Diagonais e montantes	L50,8x4,76	3,63	920,46	3341,27
Terça	U 200x75x25x2,65x7,75	7,75	720,17	5581,318
Contraventamento cobertura	Ø 12,5 mm	0,96	187,6	180,096
Contraventamento banzo	Ø 12,5 mm	0,96	464,03	445,4688
Tirantes terça	Ø 12,5 mm	0,96	272,13	261,2448
Escora terça	L44,45x3,17	2,14	24,08	51,5312
Escora banzo inferior	L 63,5x4,76	4,57	174,9	799,293
Total(kg)				18910,22
Total(t)				18,91
Total + 10%(t)				20,801

Fonte: Autores, 2025.

Tabela 25 - Índices de consumo de aço (kg/m²)

Cobertura						
Largura inclinada(m)	Comprimento(m)	Área total (m²)	Massa total (kg)	kg/m²	Massa total +10%(kg)	kg/m²
25,6	40	1024	18910,22	18,47	20801,242	20,31

Fonte: Autores, 2025.

5.2. COMENTÁRIOS SOBRE O COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM CASO DE INCÊNDIO

A ABNT NBR 14323 (2013) estabelece os requisitos para o projeto das estruturas de aço e das estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio de edificações cobertas pelas ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010), conforme os requisitos de resistência ao fogo prescritos pela ABNT NBR 14432 ou pela legislação brasileira vigente.

A aplicação da ABNT NBR 14432 (2021) ao projeto da estrutura de cobertura do ginásio é apreciada no item 10 – Elementos estruturais de cobertura, no qual se isentam os requisitos de resistência ao fogo de “tesouras, vigas de cobertura, terças etc.”. Essa isenção é válida para este projeto de cobertura, pois a estrutura não tem função de piso e não contribui para a estabilidade dos pilares, devido às condições de apoio rotulado das treliças sobre os mesmos.

Ademais, a alínea “c” do Anexo A da ABNT NBR 14432 (2021) isenta o projeto de cobertura do ginásio dos requisitos de resistência ao fogo, uma vez que a edificação se enquadra na divisão F-3 (centros esportivos, como ginásios), das classes P1 a P3, com altura da edificação até 23 m.

Portanto, fundamentado na ABNT NBR 14432 (2021), há isenção da elaboração e verificação do projeto da cobertura do ginásio para a situação de incêndio, dispensando-se a aplicação da ABNT NBR 14323 (2013).

5.3. COMENTÁRIOS SOBRE A MANUTENÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA

A solução estrutural adotada foi projetada para minimizar as demandas de manutenção ao longo da vida útil da cobertura, alinhando-se aos princípios da construção industrializada. A padronização dos elementos, escolha dos perfis e das ligações resultaram em componentes com acabamento uniforme e encaixes precisos, o que minimiza imperfeições e pontos de acúmulo de sujeira e umidade — fatores que, por sua vez, poderiam se tornar focos de corrosão.

A escolha de execução das soldas somente em ambiente fabril contribuiu para garantir a qualidade das juntas, protegendo-as contra falhas causadas por variações no campo de obra e, assim, reduzindo a necessidade de reparos futuros. As ligações parafusadas, aplicadas em toda a montagem, favorecem a desmontagem localizada e a substituição rápida e segura de elementos, sem comprometer a integridade estrutural ou exigir interrupções prolongadas no uso da edificação.

Além disso, a utilização de perfis padronizados para montantes, diagonais e banzos simplifica o controle de estoque, a reposição de componentes e uniformiza os procedimentos de inspeção. Juntas, essas medidas proporcionam uma estrutura metálica de fácil manutenção, com controle de qualidade rigoroso, acessibilidade operacional e durabilidade aprimorada, assegurando desempenho funcional e estético ao longo do tempo.

Um aspecto crucial nesse contexto é a elaboração do manual de uso, operação e manutenção da estrutura, que é responsabilidade do construtor, conforme previsto no Código de Defesa do Consumidor e nas normas técnicas ABNT NBR 5674 (2024) e NBR 14037 (2024). Essa exigência sublinha que a manutenção não se limita a uma prática recomendada, mas é um dever legal e técnico indispensável à garantia da segurança, funcionalidade e conservação do desempenho da estrutura metálica durante sua vida útil.

Compreender os mecanismos de deterioração e adotar práticas sistemáticas de manutenção preventiva e corretiva são fundamentais para prolongar a vida útil das estruturas, reduzir custos e evitar falhas. A corrosão atmosférica dos aços estruturais é um processo eletroquímico que ocorre na presença de um eletrólito, como uma película de água contendo oxigênio dissolvido e contaminantes. Esse processo é acelerado em condições de alta umidade, orvalho, chuva ou poluição atmosférica (Pannoni, 2017). Devido à exposição direta às intempéries, as trelças de cobertura são particularmente vulneráveis à corrosão superficial, especialmente em pontos críticos como nós de ligação, soldas e apoios, que retêm umidade e contaminantes.

A velocidade do processo corrosivo depende da agressividade do ambiente, classificada pela norma ISO 12944-2 (2017) em diferentes categorias. Essa classificação serve como parâmetro para o planejamento da manutenção e definição dos intervalos entre as inspeções. No caso do presente projeto, o ambiente foi classificado como C2 (Baixa), conforme indicado na tabela K.4 da NBR 8800 (2024), ilustrada na figura a seguir. Tal classificação permite um

programa de manutenção preventiva com inspeções periódicas menos frequentes, sem comprometer a eficiência operacional nem a durabilidade da estrutura.

Figura 83 - Categorias de corrosividade atmosférica e exemplos de ambientes

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície e perda de espessura (após um ano de exposição)				Exemplos de ambientes típicos	
	Aço		Zinco		Exterior	Interior
	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura µm	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura µm		
C2 (Baixa)	> 10 a 200	> 1,3 a 25	> 0,7 a 5	> 0,1 a 0,7	Regiões temperadas, ambientes atmosféricos com baixa poluição (SO ₂ < 5 mg/m ³), como áreas rurais e cidades pequenas. Atmosferas secas ou frias, com baixo umedecimento, como desertos e regiões subárticas.	Edificações com variação de temperatura e umidade relativa. Baixa frequência de condensação e baixa poluição, como depósitos, ginásios cobertos etc.

Fonte: Adaptado de NBR8800:2024, 2025.

A escolha do sistema de proteção anticorrosiva é uma etapa crítica para assegurar a durabilidade e integridade da estrutura. Considerando a categoria de agressividade atmosférica, a vida útil prevista, a estética e os custos envolvidos, a pintura foi selecionada como método de proteção, atendendo aos requisitos das normas ISO 12944-1 a ISO 12944-8 (2017). Para o ambiente classificado como C2, a recomendação é o uso de tinta de fundo epóxi, conforme ilustrado no Guia Prático de Sistemas de Pintura da Gerdau (2025), ilustrado na Figura 84, com espessura mínima de 125 µm, garantindo durabilidade de 5 a 15 anos, dependendo da agressividade ambiental. Quanto ao preparo superficial, deve-se adotar grau mínimo de abrasividade Sa 2 ½ para peças fabricadas em ambiente industrial e St 3 para aplicação em canteiro de obras.

Figura 84 - Sistema de pintura adequado da GERDAU

Estruturas visíveis							
Agressividade do ambiente	Sistema de pintura aplicada no	Preparo superficial mínimo (ISO 8501)	Tinta de fundo	Tinta intermediária	Tinta de acabamento	Espessura total seca (µm)	Durabilidade estimada (anos)
C2 baixa	Fabricante	Sa 2 1/2	Epóxi tolerante à superfície 125 µm	—	—	125	5 - 15
	Canalizador	SI 2		—	—		5 - 15

Fonte: Adaptado de Guia Prático de Sistemas de Pintura da Gerdau, 2025.

É fundamental projetar a estrutura para evitar o acúmulo de água em frestas, junções ou nós de ligação, visto que a velocidade de corrosão é diretamente influenciada pelo tempo de umedecimento da superfície. O armazenamento adequado dos componentes metálicos pintados — afastados do solo e protegidos da umidade excessiva — também é crucial para preservar a integridade do revestimento e o desempenho do sistema anticorrosivo. Pannoni (2017) destaca a importância de inspeções visuais regulares, com foco nas áreas mais expostas à agressividade ambiental. Regiões críticas, como nós de ligação das treliças, encontros com pilares e bases de fixação, devem ser monitoradas com prioridade.

Além das inspeções visuais, a manutenção preventiva deve incluir a avaliação periódica do sistema de proteção anticorrosiva. Caso haja danos no revestimento de pintura, a reaplicação das camadas de primer, tinta intermediária e acabamento deve ser feita imediatamente após a limpeza da superfície. Em situações de deterioração generalizada, a repintura integral das peças ou módulos pode ser necessária para manter a durabilidade e a integridade estrutural.

Em síntese, a manutenção da cobertura metálica com treliças planas deve ser encarada como uma estratégia contínua e integrada de prevenção, conservação e gestão da durabilidade. Isso inclui inspeções regulares (visuais e por ensaios não destrutivos), reparos imediatos, limpeza periódica e manutenção do sistema anticorrosivo, levando em consideração a corrosão e a classificação da agressividade ambiental. Tal abordagem assegura que a estrutura desempenhe sua função de forma segura e econômica ao longo de várias décadas, minimizando custos futuros e preservando o investimento inicial. As soluções adotadas foram projetadas para serem inspecionáveis, reparáveis e repetíveis, garantindo confiabilidade estrutural e sustentabilidade operacional.

5.4. VANTAGENS DO USO DO AÇO ESTRUTURAL NO PROJETO DESENVOLVIDO

O uso de aço estrutural em treliças de cobertura apresenta como principais vantagens:

119

1. Economia de material e eficiência, devido a sua alta resistência mecânica, permite vencer grandes vãos sem aumento significativo em sua massa própria, reduzindo esforços nas fundações e na estrutura secundária (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2015). A exemplo dessa característica, a presente treliça vence 25 metros de vão livre.

2. Sustentabilidade com a reciclabilidade, já que o aço é reaproveitável e para cada tonelada de aço reaproveitado, deixa-se de consumir aproximadamente 630 kg de carvão, 54 kg de calcário e 1,25 tonelada de minério de ferro (GERVÁSIO, 2008).

3. Ductibilidade, o que possibilita que o material redistribua tensões concentradas em determinadas regiões. Dessa forma, os elementos de aço podem apresentar deformações significativas antes da ruptura, funcionando como um indicativo da presença dessas tensões. Essa característica também torna o aço resistente a choques bruscos (ABNT NBR 8800/2024).

4. A pré-fabricação das estruturas de aço reflete em uma construção executada de forma mais rápida e com maior controle de qualidade quando comparado com a construção convencional de concreto moldado *in loco*. Os componentes da treliça são fabricados sob medida na indústria, garantindo a precisão de medidas e conformidade com o projeto e montados em obra, reduzindo o tempo de canteiro. Ademais, as ligações soldadas feitas em fábrica e apenas as parafusadas realizadas em obra garante um alto controle de qualidade na estrutura. Ainda, há flexibilidade para adaptações e reforços ao longo do tempo, o próprio reforço de elementos estruturais pode ser realizado por meio da inclusão de perfis adicionais, chapas ou soldas, prolongando a vida útil da construção e garantindo a segurança da estrutura (ABCEM; CBCA; ABECE, 2010).

5.5. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA APLICADA À COBERTURA METÁLICA COM TRELIÇAS PLANAS

O projeto da cobertura metálica foi desenvolvido com o propósito de incorporar os princípios da construção industrializada, priorizando a padronização dos elementos estruturais, a racionalização dos processos produtivos e a maximização da eficiência durante as etapas de fabricação, transporte e montagem. Conforme Sales *et al.* (2001) e Vieira (2009), a industrialização fundamenta-se na repetibilidade e na produção seriada de elementos estruturais, o que assegura controle de qualidade, previsibilidade e redução de desperdícios — diretrizes plenamente aplicadas na concepção desta estrutura.

Em consonância com esses princípios, adotou-se o mesmo perfil tipo cantoneira de abas iguais e configuração de perfis compostos em X para montantes e diagonais das treliças, solução que simplifica a fabricação, reduz a variedade de peças e otimiza o aproveitamento dos materiais durante as etapas de corte e montagem. De modo análogo, os banzos superior e inferior foram projetados com perfis tipo T idênticos, garantindo uniformidade geométrica, dispensando o uso de espaçadores e contribuindo para maior precisão e agilidade na montagem.

Os sistemas de contraventamento e travamento lateral foram compostos por barras redondas de mesma bitola, favorecendo a repetitividade, a uniformidade dimensional e a compatibilidade entre os módulos estruturais. Nessa perspectiva, no que se refere as ligações, todas as operações de soldagem deste projeto são executadas em ambiente fabril, possibilitando controle rigoroso de execução e qualidade. Em campo, as ligações são realizadas exclusivamente por meio de parafusos, eliminando a necessidade de soldagem e reduzindo significativamente o tempo de montagem e aumentando a segurança operacional.

Ademais, a treliça foi subdividida em três módulos estruturais, com comprimentos inferiores a 12 m, permitindo o transporte em veículos convencionais sem necessidade de transporte especial, o que reduz custos logísticos e facilita o manuseio das peças. Além disso, o uso de caminhão de pequeno porte permite maior facilidade de manobra, permitindo o transporte das peças a bairros de Guarulhos com ruas estreitas e/ou com grande fluxo de carros. Essas soluções resultaram em uma estrutura de cobertura caracterizada por elevado grau de padronização, repetibilidade e eficiência construtiva, resultando em um processo racionalizado, de montagem precisa e compatível com os princípios da construção industrializada aplicados a estruturas metálicas.

5.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O IÇAMENTO DA TRELIÇA NA ETAPA DE MONTAGEM

A posição para içamento da treliça completa durante a etapa de montagem da estrutura é mostrada na **Figura 85**.

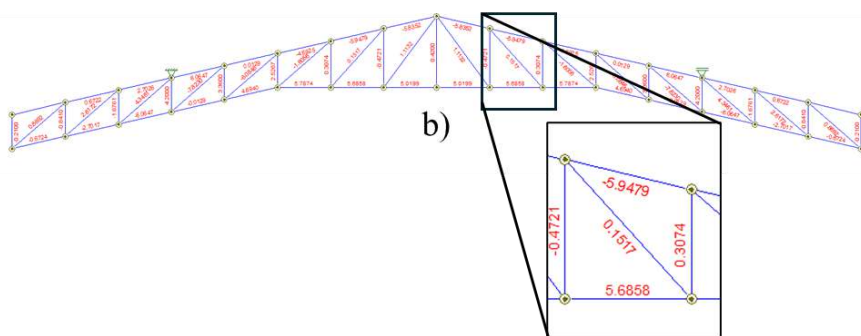
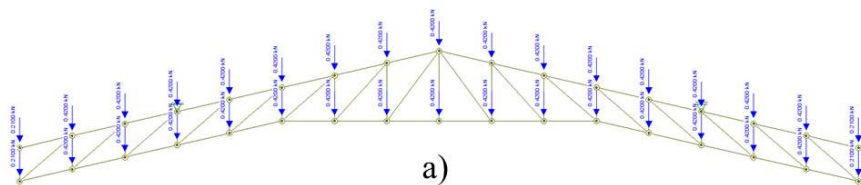
Figura 85 - Posição de içamento da treliça. Sem escala. Desenho ilustrativo



Fonte: Autores, 2025.

Apenas o modelo de cálculo da treliça completa, situação mais crítica devido ao vão, é apresentado na **Figura 86**. A treliça é biapoiada, com carregamento nos nós. O peso próprio da treliça é o único carregamento atuante, convertido em cargas pontuais de 0,42 e 0,21 kN. Aproximadamente 10m de comprimento do banzo superior está submetido a esforços de compressão, com valor máximo de 5,95kN. Como esta é uma etapa de montagem, o valor do coeficiente de majoração das ações de 1,30 é obtido para combinação de ações especiais ou de construção. Deste modo, o esforço máximo de compressão de cálculo é $1,30 \times 5,95 \text{ kN} = 7,74 \text{ kN}$. Utilizando-se o mesmo procedimento apresentado no Item 4.3.2 de dimensionamento à compressão do perfil WT 100x17,95, porém substituindo o comprimento do perfil para 10m, obtém-se a resistência à compressão de cálculo de 59,85kN. Neste caso, optou-se por verificar somente a resistência e desconsiderar a recomendação (não é mandatório) de esbeltez do item 5.3.7.1 da NBR 8800 (2024). Portanto, a posição de içamento escolhida é adequada para montagem.

Figura 86 - Treliça plana durante etapa de montagem - a) Modelo de cálculo no ftool e b) esforços normais de tração (positivo) e compressão (negativo). Unidades em kN.



Fonte: Autores, 2025.

REFERÊNCIAS

ABCEM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA; CBCA – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO; ABECE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **Execução de estruturas de aço: práticas recomendadas**. 1. ed. São Paulo: ABCEM, 2010.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Manual da Construção Industrializada: conceitos e etapas. Volume 1: estrutura e vedação**. Brasília: ABDI, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123:2023** – Ações do vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2024** – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **7º Concurso CBCA para Estudantes de Engenharia 2025: treliças planas de aço para coberturas**. Rio de Janeiro: CBCA, 2025. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/engenharia>. Acesso em: 28 set. 2025.

COLEN, C. **Adaptação da metodologia “fitness for service” à manutenção de estruturas metálicas industriais sujeitas a corrosão atmosférica**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2023. Disponível em: <https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/153382/3/646711.pdf>. Acesso em: 28 set. 2025.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro e; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

FIGUEROA, Mario; DIAS, Ricardo. **Tipologias projetuais para estruturas metálicas**. São Paulo: Gerdau, 2012. 72 p. (Série Coletânea do Uso do Aço, v. 1). ISBN 978-85-67188-00-3. GERVÁSIO, Helena M. **A Sustentabilidade do Aço e das Estruturas Metálicas**. ABCEM, 2008.

GERVÁSIO, Helena M. **A Sustentabilidade do Aço e das Estruturas Metálicas**. ABCEM, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Galpões para usos gerais*. Revisão de Zacarias M. Chamberlain Pravia; Gilnei Artur Drehmer; Enio Mesacasa Júnior. 4. ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010. 74 p. (Série Manual de Construção em Aço).

LANDUCCI, Ulysses. **Análise estrutural de coberturas com treliças metálicas de banzos paralelos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.

PANNONI, F. D. **Projeto e Durabilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2017. Disponível em: <https://www.jodi.com.br/wpcontent/uploads/2021/01/Manual-CBCA-Projeto-e-durabilidade.pdf>. Acesso em: 28 set. 2025.

PFEIL, W., PFEIL M. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático**. 8º ed. Rio de Janeiro, 2009.

PRAVIA Z. M. C., DREHMER G. A., JÚNIOR E. M. **Galpões para usos gerais** /Instituto Aço Brasil, - Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

REZENDE, J. P. V., Viana, H. F., Francklin, H. M., Izidoro, A. A. dos S., Camposilvan, J. C. de S., & Fraga, I. F. (2024). **Influence of roof pitch on the design and steel consumption of Pratt trusses in industrial sheds**. *Caderno Pedagógico*, 21(13), e11948.

RIBEIRO, A. B., Oliveira, L. S. de, Machado, R. G., Padua, L. H. de, Rezende, J. P. V., Fraga, I. F., Moraes, M. H. M. de, Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2025). Influence of the end vertical member length on the design of steel roof trusses. *Caderno Pedagógico*, 22(1), e13744.

RIBEIRO, Alessandro S. **A importância da estrutura metálica na construção civil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Pitágoras, Imperatriz, 2022.

RODRIGUES, R. G. S. **Análise do processo corrosivo e suas consequências em estrutura metálica em academia ao ar livre em pau do ferros - rn**. 2022. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros – RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/cbc83aa5-4d2c-47c9-8316-1ffcc993e632>. Acesso em: 28 set. 2025.

SALES, U. C.; SOUZA, H. A.; NEVES, F. A. M. **Mapeamento de problemas na construção industrializada em aço**. Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 4, p. 303-309, 2001.

SOUSA, Gabriel Cavalcante de. **Modelagem numérica, análise estrutural e proposta de otimização de cobertura metálica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2025.

SOUSA, Vinicius M. **A importância da estrutura metálica na construção civil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Pitágoras, Imperatriz, 2021.

TOMADON, Alyfer Gustavo. **Estruturas treliçadas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Norte do Paraná, Londrina, 2020.

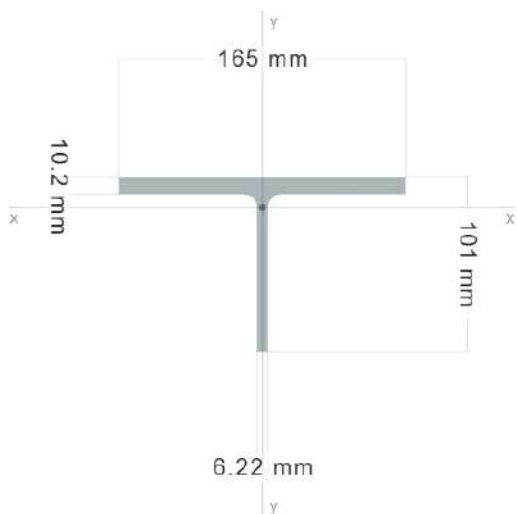
VALE, F. A. P. et al. **A prevenção de alterações em estruturas metálicas visando a sustentabilidade**. Brazilian Journals of Business, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34140/bjbv3n1-022>. Acesso em: 28 set. 2025.

VIEIRA, Rodrigo Cuberos. **Estudo comparativo entre terças de aço, convencionais em vigas, em treliças planas e em treliças multiplanares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

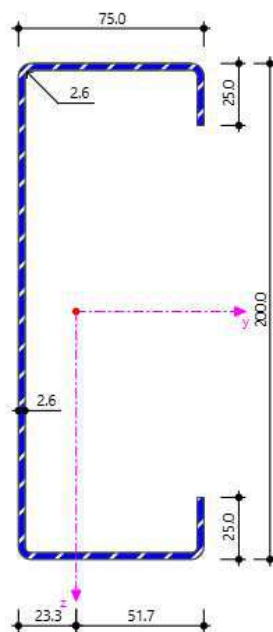
APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

LIGAÇÃO ENTRE BANZO SUPERIOR E TERÇA

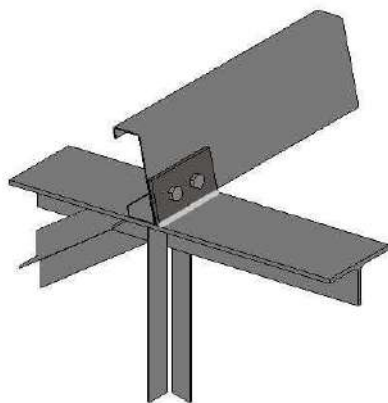
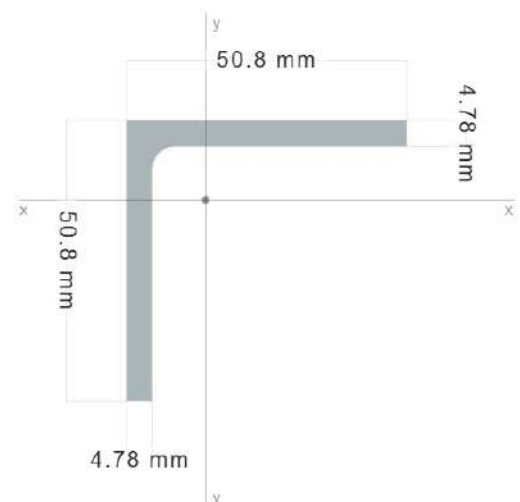
Banzo superior



Terça



Diagonais e Montante



$$\theta := 13^\circ$$

$$\tan(\theta) = 0,2309$$

$$\sin(\theta) = 0,225$$

$$\cos(\theta) = 0,9744$$

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

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

Parafuso: ASTM A307

$$f_{ub} := 415 \text{ MPa} \quad \frac{1}{2} \leq db \leq 4$$

Solda: Eletrodo E70

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

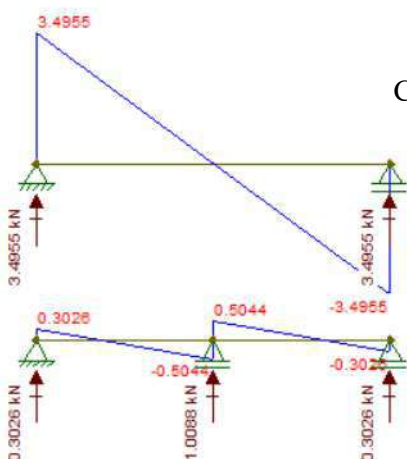
$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Reações dos apoios em x e y nesse ponto de análise

Considerando ponto em que chega duas terças

$$\text{Cortante } Q_{sd} := 2 \cdot 0,3026 \text{ kN} = 0,6052$$

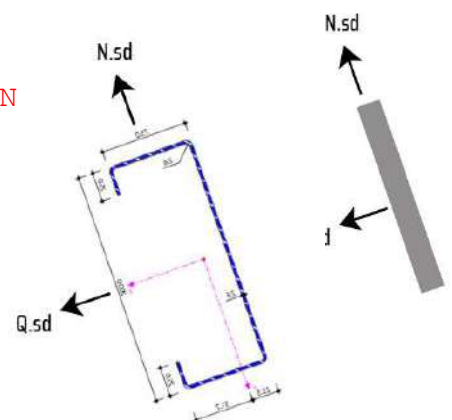
$$\text{Tração } N_{sd} := 2 \cdot 3,4955 \text{ kN} = 6,991 \text{ kN}$$



Furo padrão - Diâmetro do furo

$$d_b := 12,7 \text{ mm}$$

$$d_h := d_b + 3,5 \text{ mm} = 16,2 \text{ mm}$$



Distância entre furos

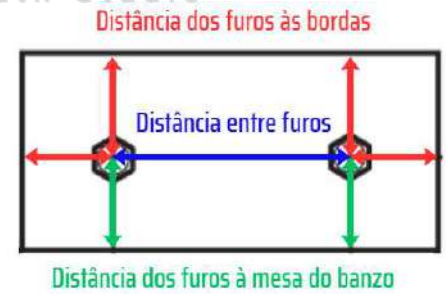
Mínimo $3 \cdot d_b = 38,1 \text{ mm}$

Distância dos furos às bordas

Mínimo $1,25 \cdot d_b = 15,875 \text{ mm}$

Distância dos furos à mesa do banzo

Mínimo $1,35 \cdot d_b = 17,145 \text{ mm}$



Disposição inicial

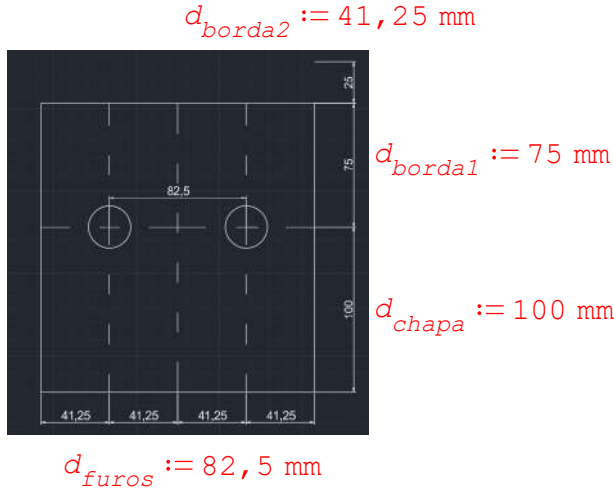


Tabela A.2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil a, b ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa	
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550	
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm				
	A500	Perfis	4	A	230	310	
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	B	290	400	
				42	290	415	
				50	345	450	
			1 e 2	55	380	485	
				60	415	520	
				65	450	550	
		Chapas e barras ^c	$t \leq 150$ mm	42	290	415	
			$t \leq 100$ mm	50	345	450	
			$t \leq 50$ mm	55	380	485	
			$t \leq 31,5$ mm	60	415	520	
		A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	65	450	550
					-	345 a 450	450

Placa Rígida

Efeito de alavanca nulo

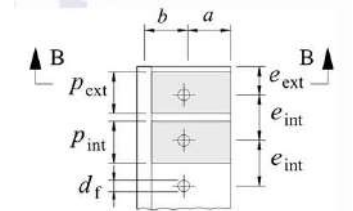
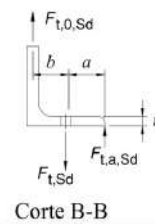
$a := 1,25 \cdot d_b = 0,0159 \text{ m}$

$p_{int} := \min \left(\left[0,5 \cdot d_{furos} \quad 3,5 \cdot d_{chapa} \right] \right) = 41,25 \text{ mm}$

$p_{ext} := \min \left(\left[d_{borda2} \quad 1,75 \cdot d_{chapa} \right] \right) + \min \left(\left[0,5 \cdot d_{furos} \quad 1,75 \cdot d_{chapa} \right] \right) = 82,5 \text{ mm}$

$t_r := \sqrt{\frac{4 \cdot (d_{chapa} - 0,5 \cdot d_b) \cdot Q_{sd} \cdot \gamma_{a1}}{p_{ext} \cdot f_u}} = 2,5918 \text{ mm}$

$t_{adot} := 6 \text{ mm}$



ESPESSURAS COMERCIAIS

6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm.

Distância entre furo

Mínimo $3 \cdot d_b = 38,1 \text{ mm}$

Distância mínima entre furos e chapa:

$1,35 \cdot d_b = 17,145 \text{ mm}$

Distância dos furos às bordas

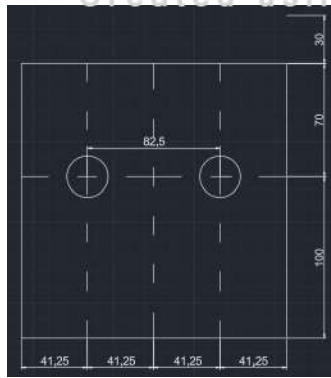
Mínimo $1,25 \cdot d_b = 15,875 \text{ mm}$

Máximo $\begin{cases} 24 \cdot t_{adot} \\ 300 \text{ mm} \end{cases} = \begin{cases} 144 \\ 300 \end{cases} \text{ mm}$

Máximo $\begin{cases} 12 \cdot t_{adot} \\ 150 \text{ mm} \end{cases} = \begin{cases} 72 \\ 150 \end{cases} \text{ mm}$

Disposição final

$d_{borda2} := 41,25 \text{ mm}$



$$d_{borda1} := 70 \text{ mm}$$

$$d_{chapa} := 100 \text{ mm}$$

$$d_{furos} := 82,5 \text{ mm}$$

Tração nos parafusos

Considerando 2 parafusos: $n_p := 2$ $F_{sd} := Q_{sd} = 0,6052 \text{ kN}$

$$F_{t,sd} := \frac{F_{sd}}{n_p} \leq F_{t,rd} := \frac{A_{be} \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad A_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,2668 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,sd} = 0,3026 \text{ kN} \leq F_{t,rd} := \frac{A_{be} \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad A_{be} := 0,75 \cdot A_b = 0,9501 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,sd} = 0,3026 \text{ kN} \leq F_{t,rd} = 29,2061 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Flexão na chapa

$$M_{sd} := F_{t,sd} \cdot d_{chapa} \leq M_{rd} := p_{ext} \cdot t_{adot}^2 \cdot \frac{f_y}{6 \cdot \gamma_{a1}}$$

$$M_{sd} = 3,026 \text{ kN cm} \leq M_{rd} := p_{ext} \cdot t_{adot}^2 \cdot \frac{f_y}{6 \cdot \gamma_{a1}}$$

$$M_{sd} = 3,026 \text{ kN cm} \leq M_{rd} = 15,525 \text{ kN cm} \quad \text{--> Atende!}$$

Tração na chapa

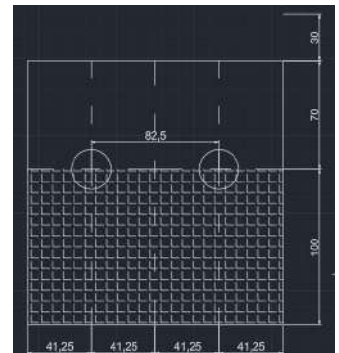
$$N_{t,sd} \leq N_{t,rd} \quad A_g := (4 \cdot 41,25 \text{ mm}) \cdot t_{adot} = 9,9 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,sd} := N_{sd} = 6,991 \text{ kN} \quad A_e := A_g - (2 \cdot d_h \cdot t_{adot}) = 7,956 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,rd} := \begin{cases} \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \\ \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 310,5 \\ 265,2 \end{cases} \text{ kN}$$

$$N_{t,rd} := 392,9545 \text{ kN}$$

$$N_{t,sd} = 6,991 \text{ kN} \leq N_{t,rd} = 392,9545 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$



Cisalhamento nos parafusos

Comprimento da ligação - Item 6.3.8:

$$L_{lig} := d_{furos} = 82,5 \text{ mm} < 950 \text{ mm} \quad \text{--> Atende!}$$

Comprimento de pega:

$$L_{pega} := t_{adot} + 2,6 \text{ mm} = 8,6 \text{ mm} < 5 \cdot d_b = 63,5 \text{ mm} \quad \text{--> Atende!}$$

$$F_{v,sd} := \frac{N_{t,sd}}{2 \cdot n_p} = 1,7478 \text{ kN}$$

$$F_{v,rd} := \frac{0,45 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{Y_{a2}} = 17,5236 \text{ kN}$$

$$F_{v,sd} = 1,7478 \text{ kN} \leq F_{v,rd} = 17,5236 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Pressão de contato na chapa

$$F_{c,sd} := \frac{N_{sd}}{2} = 3,4955 \text{ kN}$$

$$l_f := \min \left(\left[\left(d_{borda1} - \frac{d_h}{2} \right) \left(d_{borda2} - \frac{d_h}{2} \right) \left(d_{chapa} - \frac{d_h}{2} \right) \left(d_{furos} - 2 \cdot d_h \right) \right] \right) = 33,15 \text{ mm}$$

$$F_{c,rd} := \begin{cases} \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{adot} \cdot f_u}{Y_{a2}} \\ \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{adot} \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 79,56 \\ 60,96 \end{cases} \text{ kN}$$

$$F_{c,rd} := \min \left(\left[\left(\frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{adot} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \left(\frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{adot} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \right] \right) = 60,96 \text{ kN}$$

$$F_{c,sd} = 3,4955 \text{ kN} \leq F_{c,rd} = 60,96 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

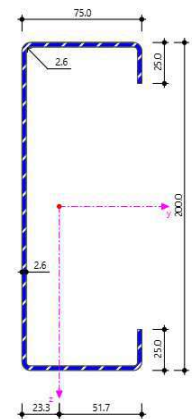
Pressão de contato na terça

$$F_{c,sd} := \frac{F_{sd}}{2 \cdot 2} = 0,1513 \text{ kN} \quad t_{terça} := 2,6 \text{ mm}$$

$$l_f := \begin{cases} d_{borda2} - \frac{d_h}{2} \\ 100 \text{ mm} - \frac{d_h}{2} \end{cases} = \begin{cases} 33,15 \\ 91,9 \end{cases} \text{ mm}$$

$$l_f := \min \left(\left[\left(d_{borda2} - \frac{d_h}{2} \right) \left(100 \text{ mm} - \frac{d_h}{2} \right) \right] \right) = 33,15 \text{ mm}$$

$$F_{c,rd} := \begin{cases} \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{terça} \cdot f_u}{Y_{a2}} \\ \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{terça} \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 34,476 \\ 26,416 \end{cases} \text{ kN}$$



$$F_{c,rd} := \min \left(\left(\frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{terça} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \right) \left(\frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{terça} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \right) \right) = 26,416 \text{ kN}$$

$$F_{c,sd} = 0,1513 \text{ kN} \leq F_{c,rd} = 26,416 \text{ kN} \quad \rightarrow \text{Atende!}$$

Cisalhamento na chapa

$$F_{cv,sd} := N_{sd} = 6991 \text{ N}$$

$$A_{gv} := (4 \cdot 41,25 \text{ mm}) \cdot t_{adot} = 9,9 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} - 2 \cdot d_h \cdot t_{adot} = 7,956 \text{ cm}^2$$

$$F_{cv,rd} := \begin{cases} \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \\ \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \end{cases} = \begin{cases} 159,12 \\ 186,3 \end{cases} \text{ kN}$$

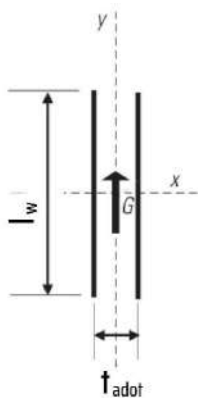
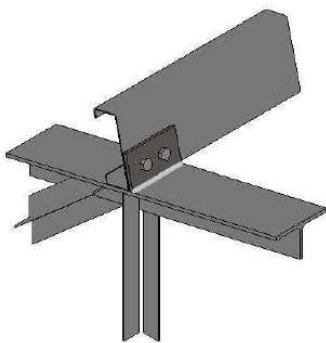
$$F_{cv,rd} := \min \left(\left(\frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \right) \left(\frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right) \right) = 159,12 \text{ kN}$$

$$F_{cv,sd} = 6,991 \text{ kN} \leq F_{cv,rd} = 159,12 \text{ kN} \quad \rightarrow \text{Atende}$$

Tração e cisalhamento combinados nos parafusos

$$\left(\frac{F_{t,sd}}{F_{t,rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{cv,sd}}{F_{cv,rd}} \right)^2 = 0,002 < 1 \quad \rightarrow \text{Atende}$$

Chapa - soldada no banzo



Dimensão mínima da perna do filete

$$t_{adot} = 6 \text{ mm} < 12,5 \text{ mm}$$

$$d_{w,mín} := 3 \text{ mm}$$

Dimensão máxima da perna do filete

$$d_{w,máx} := t_{adot} - 1,5 \text{ mm} = 4,5 \text{ mm}$$

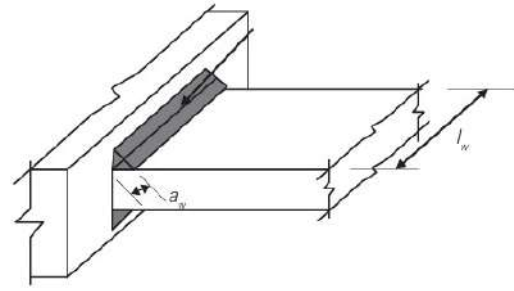
$$d_{w,adot} := 4 \text{ mm}$$

$$a_w := 0,707 \cdot d_{w,adot} = 2,828 \text{ mm}$$

Comprimento de solda

Mínimo

$$4 \cdot d_{w,adot} = 16 \text{ mm} < l_{w,adot} := 160 \text{ mm}$$



Solda da chapa

Tensão solicitante na solda

$$\tau_{w,sd} := \sqrt{\tau_{w,x,sd}^2 + \tau_{w,y,sd}^2}$$

$$\tau_{w,x,sd} := \frac{F_{x,sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z,sd} \cdot y}{I_z}$$

$$F_{x,sd} := Q_{sd} = 605,2 \text{ N}$$

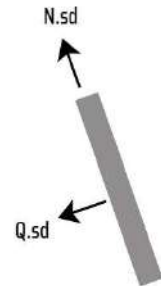
$$A_{ew} := 2 \cdot l_{w,adot} \cdot a_w = 9,0496 \text{ cm}^2$$

$$F_{x,sd} := Q_{sd} = 605,2 \text{ N}$$

$$\tau_{w,x,sd} := \frac{F_{x,sd}}{A_{ew}} = 0,0669 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{w,sd} := \sqrt{\tau_{w,x,sd}^2 + \tau_{w,y,sd}^2}$$

$$\tau_{w,sd} := \sqrt{\left(\frac{F_{x,sd}}{A_{ew}}\right)^2 + 0^2} = 0,0669 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$



Verificação da solda

$$\tau_{w,sd} = 0,0669 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \tau_{w,rd} := 0,6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{w2}} = 21,5556 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \text{--> Atende}$$

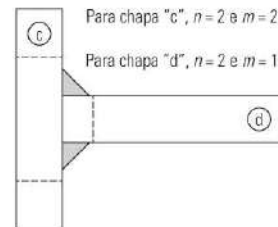
Verificação do metal da solda

$$t > \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} \quad n := 2$$

$$m := 1$$

$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2}$$

$$\sigma_{w,sd} := \frac{N_{sd}}{A_{ew}} = 0,7725 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

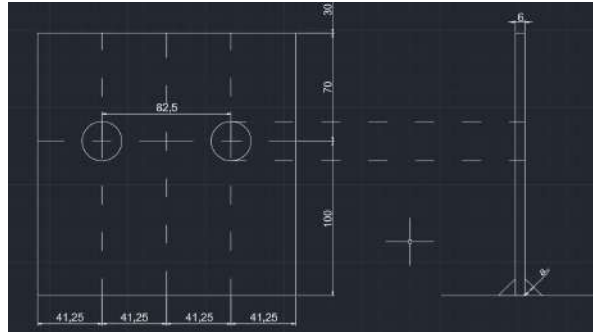


(b) Junta em T com solda de filete

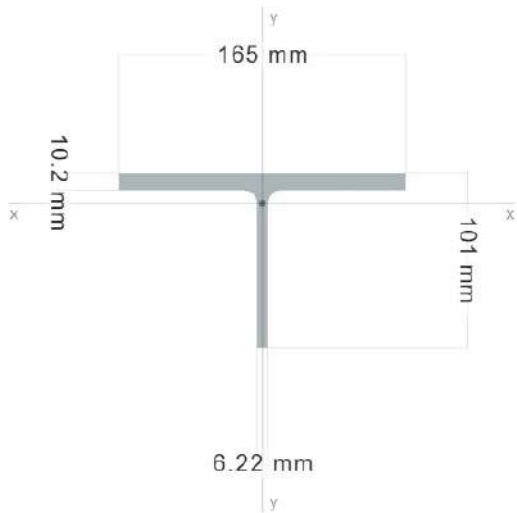
$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2} = 0,7754 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_{verif} := \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} = 0,2193 \text{ mm}$$

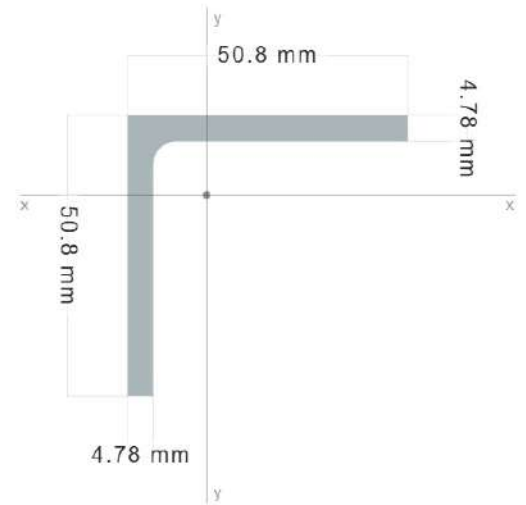
$$t_{adot} = 6 \text{ mm} > t_{verif} = 0,2193 \text{ mm} \quad \text{--> Atende}$$



Banzo superior e inferior



Diagonais e Montante



$$\theta := 13^\circ$$

$$\tan(\theta) = 0,2309$$

$$\sin(\theta) = 0,225$$

$$\cos(\theta) = 0,9744$$

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

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

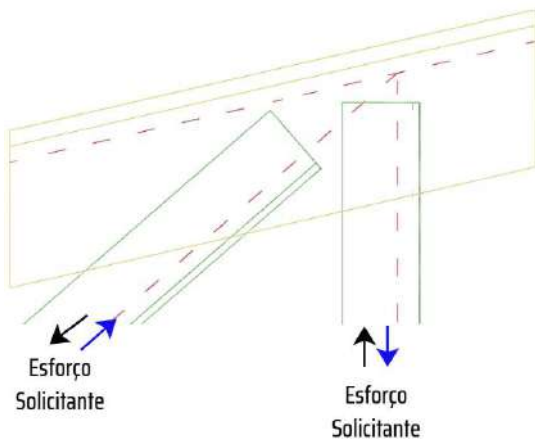
$$f_y := 345 \text{ MPa}$$

$$f_u := 450 \text{ MPa}$$

Solda: Eletrodo E70

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{w2} := 1,35$$



Disposição construtiva - solda

Dimensão mínima da perna do filete

$$t_{WT} := 6,22 \text{ mm} < 6,3 \text{ mm}$$

$$d_{w,min} := 3 \text{ mm}$$

$$d_{w,adot} := 4 \text{ mm}$$

$$a_w := 0,707 \cdot d_{w,adot} = 2,828 \text{ mm}$$

Comprimento de solda

$$\text{Mínimo} \quad 4 \cdot d_{w,adot} = 16 \text{ mm} < l_{w,diag} := 60 \text{ mm}$$

Dimensão máxima da perna do filete

$$d_{w,máx} := t_{WT} - 1,5 \text{ mm} = 4,72 \text{ mm}$$



transversal

$$2 \cdot d_{w,adot} = 8 \text{ mm}$$

$$l_{w,trans} := 10 \text{ mm}$$

Diagonal

Montante

$$l_{w,mont} := 55 \text{ mm}$$

Esforços solicitantes das cantoneiras (perfil composto)

Tração $F_{t,sd} := 69,91 \text{ kN}$

Esforços resistentes de cálculo

P/ dimensionamento $F_{t,sd} := \frac{F_{t,sd}}{2} = 34,955 \text{ kN}$

$$F_{t,rd} := 76,33 \text{ kN}$$

Compressão $F_{c, sd} := 54,25 \text{ kN}$

P/ dimensionamento $F_{c, sd} := \frac{F_{c, sd}}{2} = 27,125 \text{ kN}$

$$F_{c, rd} := 76,33 \text{ kN}$$

Esforços solicitantes de cálculo

Tração $F_{t, sd} = 34,955 \text{ kN} \geq \left\{ \frac{F_{t, rd}}{2} = \begin{cases} 45 \\ 38,165 \end{cases} \text{ kN} \right.$

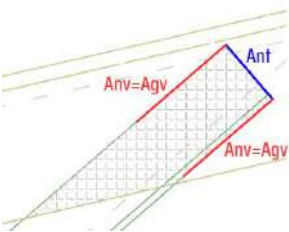
$$F_{t, sd} := \max \left(\left(F_{t, sd} \right) (45 \text{ kN}) \left(\frac{F_{t, rd}}{2} \right) \right) = 45 \text{ kN}$$

Compressão $F_{c, sd} = 27,125 \text{ kN} \geq \left\{ \frac{F_{c, rd}}{2} = \begin{cases} 45 \\ 38,165 \end{cases} \text{ kN} \right.$

$$F_{c, sd} := \max \left(\left(F_{c, sd} \right) (45 \text{ kN}) \left(\frac{F_{c, rd}}{2} \right) \right) = 45 \text{ kN}$$

Colapso por rasgamento do banzo

Hipótese 1 - Diagonal tracionada $F_{r, sd} := 2 \cdot F_{t, sd} = 90 \text{ kN}$



$$A_{gv} := 2 \cdot l_{w, diag} \cdot t_{WT} = 7,464 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} = 7,464 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} := 50,8 \text{ mm} \cdot t_{WT} = 3,1598 \text{ cm}^2$$

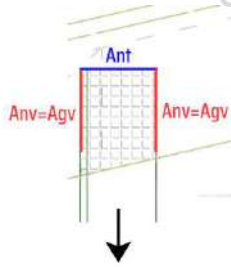
$$C_{ts} := 1$$

$$F_{r, rd} := \begin{cases} \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \\ \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 254,6053 \\ 219,7733 \end{cases} \text{ kN}$$

$$F_{r, rd} := \min \left(\left(\frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \left(\frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \right) = 219,7733 \text{ kN}$$

$$F_{r, sd} = 90 \text{ kN} \leq F_{r, rd} = 219,7733 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Hipótese 2 - Montante tracionada $F_{r, sd} := 2 \cdot F_{t, sd} = 90 \text{ kN}$



$$A_{gv} := 2 \cdot l_{w, mont} \cdot t_{WT} = 6,842 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} = 6,842 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} := 50,8 \text{ mm} \cdot t_{WT} = 3,1598 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1$$

$$F_{r, rd} := \begin{cases} \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \\ \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 242,1653 \\ 210,236 \end{cases} \text{ kN}$$

$$F_{r, rd} := \min \left(\left[\left(\frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \left(\frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \right] \right) = 210,236 \text{ kN}$$

$$F_{r, sd} = 90 \text{ kN} \leq F_{r, rd} = 210,236 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Tração na alma no banzo

Hipótese 1 - Diagonal tracionada

$$N_{t, sd} := 2 \cdot F_{r, sd} = 90 \text{ kN}$$

Seção de Whitmore

$$A_g := (102,79 \text{ mm}) \cdot t_{WT} = 6,3935 \text{ cm}^2$$

$$A_e := A_g = 6,3935 \text{ cm}^2$$

$$N_{t, rd} := \begin{cases} \frac{A_g \cdot f_y}{Y_{a1}} \\ \frac{A_e \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 200,5246 \\ 213,1179 \end{cases} \text{ kN}$$

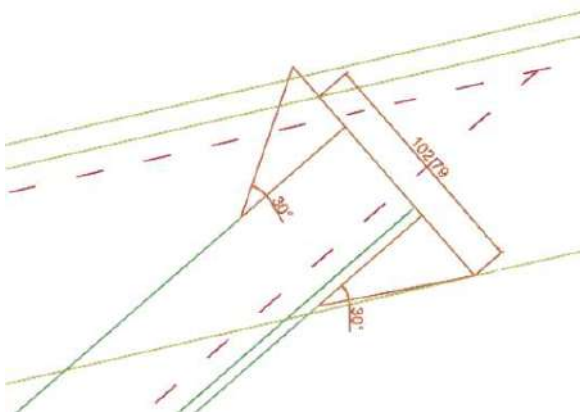
$$N_{t, rd} := \min \left(\left[\left(\frac{A_g \cdot f_y}{Y_{a1}} \right) \left(\frac{A_e \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \right] \right) = 200,5246 \text{ kN}$$

$$N_{t, sd} \leq N_{t, rd}$$

$$N_{t, sd} = 90 \text{ kN} \leq N_{t, rd} = 200,5246 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Hipótese 2 - Montante tracionada

$$N_{t, sd} := 2 \cdot F_{r, sd} = 90 \text{ kN}$$



Seção de Whitmore

$$A_g := (114,31 \text{ mm}) \cdot t_{WT} = 7,1101 \text{ cm}^2$$

$$A_e := A_g = 7,1101 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,rd} := \begin{cases} \frac{A_g \cdot f_y}{Y_{a1}} \\ \frac{A_e \cdot f_u}{Y_{a2}} \end{cases} = \begin{cases} 222,998 \\ 237,0027 \end{cases} \text{ kN}$$

$$N_{t,rd} := \min \left(\left(\frac{A_g \cdot f_y}{Y_{a1}} \right), \left(\frac{A_e \cdot f_u}{Y_{a2}} \right) \right) = 222,998 \text{ kN}$$

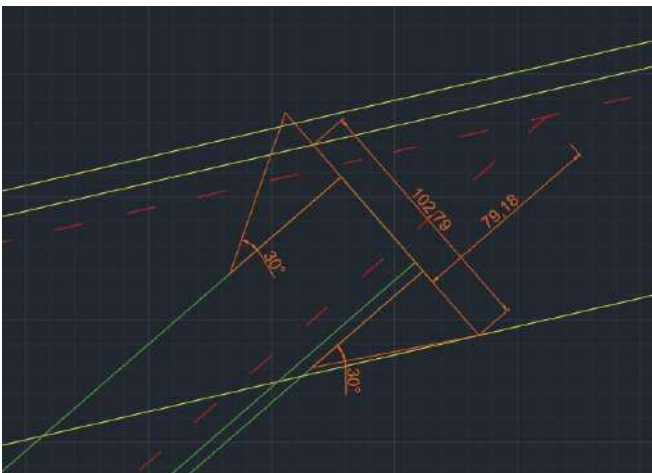
$$N_{t,sd} \leq N_{t,rd}$$

$$N_{t,sd} = 90 \text{ kN} \leq N_{t,rd} = 222,998 \text{ kN} \quad \text{--> Atende!}$$

Compressão na alma no banzo

Hipótese 1 - Diagonal comprimida

$$N_{c,sd} := 2 \cdot F_{c,sd} = 90 \text{ kN} \quad E := 200 \text{ GPa}$$



$$N_e := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$$

$$L := 79,18 \text{ mm} \quad K := 0,65$$

$$A_g := 102,79 \text{ mm} \cdot (t_{WT}) = 6,3935 \text{ cm}^2$$

$$I := \frac{102,79 \text{ mm} \cdot (t_{WT})^3}{12} = 0,2061 \text{ cm}^4$$

$$N_e := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} = 1536,0764 \text{ kN}$$

Índice de esbeltez reduzida

Item 5.3.3.2 - ABNT NBR 8800:2024

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0,3789$$

Fator de redução

Item 5.3.3.1 - ABNT NBR 8800:2024

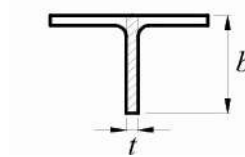
Como $\lambda_0 < 1,5$:

$$\chi := 0,658 \lambda_0^2 = 0,9417$$

Flambagem local

Item 5.3.4.2 - ABNT NBR 8800:2024

$$\begin{aligned} & \text{— para } \frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{\lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{\text{ef}} = b \\ & \text{— para } \frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{\lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{\text{ef}} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{el}}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{\text{el}}}{\chi f_y}} \end{aligned}$$



$$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$b_{WT} := \frac{165 \text{ mm}}{2} = 82,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_{FLM} := \frac{b_{WT}}{t_{WT}} = 13,2637 < 200 \quad \text{Ok!}$$

$$\text{Valor de } \left(\frac{b}{t} \right)_{\lim}$$

Tabela 4 - ABNT NBR 8800:2024

$$\lim_{FL} := 0,75 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 18,0579$$

Verificação

$$\lambda_{FLM} = 13,2637 < \frac{\lim_{FL}}{\sqrt{\chi}} = 18,6088 \quad \text{ok! - Não há FL}$$

Força axial resistente de cálculo

$$N_{c,rd} := \frac{\chi \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 188,8275 \text{ kN}$$

$$N_{c,sd} = 90 \text{ kN} < N_{c,rd} = 188,8275 \text{ kN} \quad \text{--> Atende}$$

Hipótese 2 - Montante comprimido

$$N_{c,sd} := 2 \cdot F_{c,sd} = 90 \text{ kN}$$

$$N_e := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$$

$$L := 19,42 \text{ mm} \quad K := 0,65$$

$$A_g := 114,31 \text{ mm} \cdot (t_{WT}) = 7,1101 \text{ cm}^2$$

$$I := \frac{114,31 \text{ mm} \cdot (t_{WT})^3}{12} = 0,2292 \text{ cm}^4$$

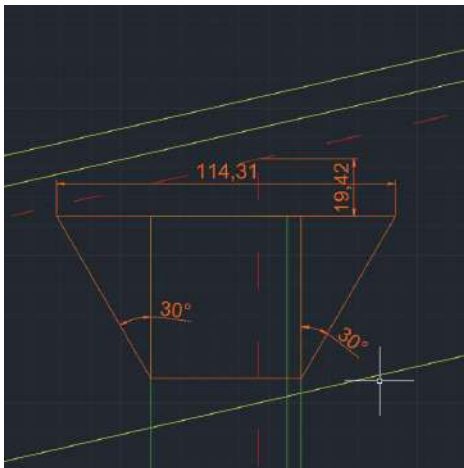
$$N_e := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} = 28397,4085 \text{ kN}$$

Índice de esbeltez reduzida

Item 5.3.3.2 - ABNT NBR 8800:2024

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0,0929$$

Fator de redução



Item 5.3.3.1 - ABNT NBR 8800:2024

Como $\lambda_0 < 1,5$:

$$\chi := 0,658^{\lambda_0^2} = 0,9964$$

Flambagem local

Item 5.3.4.2 - ABNT NBR 8800:2024

$$\begin{aligned} & \text{— para } \frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{\text{lim}}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{\text{ef}} = b \\ & \text{— para } \frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{\text{lim}}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{\text{ef}} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{el}}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{\text{el}}}{\chi f_y}} \end{aligned}$$



$$b_{WT} := \frac{165 \text{ mm}}{2} = 82,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_{FLM} := \frac{b_{WT}}{t_{WT}} = 13,2637 < 200 \quad \text{Ok!}$$

Valor de $\left(\frac{b}{t} \right)_{\text{lim}}$

Tabela 4 - ABNT NBR 8800:2024

$$\text{lim}_{FL} := 0,75 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 18,0579$$

Verificação

$$\lambda_{FLM} = 13,2637 < \frac{\text{lim}_{FL}}{\sqrt{\chi}} = 18,0906 \quad \text{ok! - Não há FL}$$

Força axial resistente de cálculo

$$N_{c,rd} := \frac{\chi \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 222,1932 \text{ kN}$$

$$N_{c,sd} = 90 \text{ kN} < N_{c,rd} = 222,1932 \text{ kN} \quad \text{--> Atende}$$

Solda na alma do banzo

Hipótese 1 - Diagonal

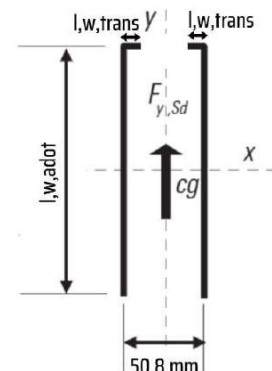
Tensão solicitante na solda

$$\tau_{w,sd} := \sqrt{\tau_{w,x,sd}^2 + \tau_{w,y,sd}^2}$$

$$\tau_{w,x,sd} := 0$$

$$\tau_{w,y,sd} := \frac{F_{y,sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z,sd} \cdot x}{I_z}$$

$$F_{y,sd} := F_{c,sd} = 45 \text{ kN}$$



O comprimento efetivo das soldas longitudinais de elementos axialmente solicitados deve ser tomado como igual ao seu comprimento multiplicado pelo fator β dado por:

$$0,6 \leq \beta := 1,2 - 0,002 \cdot \left(\frac{2 \cdot l_{w,diag} + 2 \cdot l_{w,trans}}{d_{w,adot}} \right) \leq 1,0$$

$$0,6 \leq \beta = 1,13 \leq 1,0$$

$\beta := 1$ --> Portanto, o comprimento das soldas longitudinais não precisa ser reduzido.

$$A_{ew} := (2 \cdot l_{w,diag} + 2 \cdot l_{w,trans}) \cdot a_w = 3,9592 \text{ cm}^2$$

$$M_{z,sd} := 0$$

$$\tau_{w,y,sd} := \frac{F_{y,sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z,sd} \cdot x}{I_z} = 11,3659 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{w,sd} := \sqrt{\tau_{w,x,sd}^2 + \tau_{w,y,sd}^2} = 11,3659 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$



Verificação do metal da solda

$$\tau_{w,sd} = 11,3659 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \tau_{w,rd} := 0,6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{w2}} = 21,5556 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ --> Atende}$$

Ruptura da alma do banco com a diagonal na região da solda

$$t > \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} \quad \begin{matrix} n := 2 \\ m := 1 \end{matrix}$$

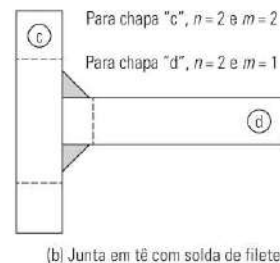
$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2}$$

$$\sigma_{w,sd} := 0$$

$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2} = 11,3659 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_{verif} := \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} = 3,2143 \text{ mm}$$

$$t_{WT} = 6,22 \text{ mm} > t_{verif} = 3,2143 \text{ mm} \text{ --> Atende}$$



Hipótese 2 - Montante

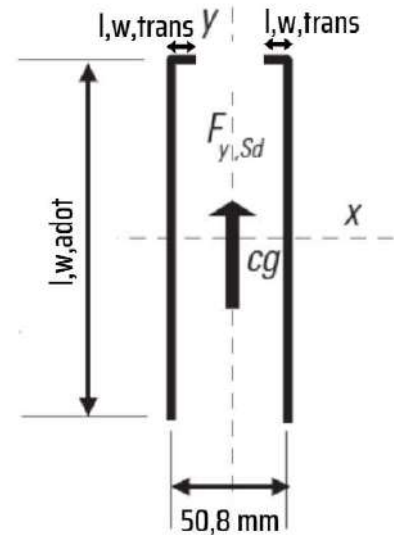
Tensão solicitante na solda

$$\tau_{w, sd} := \sqrt{\tau_{w, x, sd}^2 + \tau_{w, y, sd}^2}$$

$$\tau_{w, x, sd} := 0$$

$$\tau_{w, y, sd} := \frac{F_{y, sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z, sd} \cdot x}{I_z}$$

$$F_{y, sd} := F_{c, sd} = 45 \text{ kN}$$



O comprimento efetivo das soldas longitudinais de elementos axialmente solicitados deve ser tomado como igual ao seu comprimento multiplicado pelo fator β dado por:

$$0,6 \leq \beta := 1,2 - 0,002 \cdot \left(\frac{2 \cdot l_{w, mont} + 2 \cdot l_{w, trans}}{d_{w, adot}} \right) \leq 1,0$$

$$0,6 \leq \beta = 1,135 \leq 1,0$$

$\beta := 1$ --> Portanto, o comprimento das soldas longitudinais não precisa ser reduzido.

$$A_{ew} := (2 \cdot l_{w, mont} + 2 \cdot l_{w, trans}) \cdot a_w = 3,6764 \text{ cm}^2$$

$$M_{z, sd} := 0$$

$$\tau_{w, y, sd} := \frac{F_{y, sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z, sd} \cdot x}{I_z} = 12,2402 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

$$\tau_{w, sd} := \sqrt{\tau_{w, x, sd}^2 + \tau_{w, y, sd}^2} = 12,2402 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

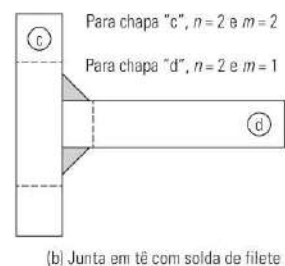
Verificação do metal da solda

$$\tau_{w, sd} = 12,2402 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} < \tau_{w, rd} := 0,6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{w2}} = 21,5556 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \text{ --> Atende}$$

Ruptura da alma do banzo com a diagonal na região da solda

$$t > \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w, res, sd}}{m \cdot f_u} \quad \begin{matrix} n := 2 \\ m := 1 \end{matrix}$$

$$f_{w, res, sd} := \sqrt{\sigma_{w, sd}^2 + \tau_{w, sd}^2}$$



$$\sigma_{w, sd} := 0$$

$$f_{w, res, sd} := \sqrt{\sigma_{w, sd}^2 + \tau_{w, sd}^2} = 12,2402 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_{verif} := \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w, res, sd}}{m \cdot f_u} = 3,4615 \text{ mm}$$

$$t_{WT} = 6,22 \text{ mm} > t_{verif} = 3,4615 \text{ mm} \quad \text{--> Atende}$$

$$\theta := 13^\circ$$

Ligação de segundo gênero (Treliça - Pilar)

Parafusos
ASTM A325

$$Q_{sd13} := 8,3526 \text{ kN} \quad (\text{Cortante})$$

$$\tan(\theta) = 0,2309$$

$$N_{sd13} := 36,1790 \text{ kN} \quad (\text{Tração})$$

$$\sin(\theta) = 0,225$$

$$f_{yp} := 635 \text{ MPa}$$

$$\cos(\theta) = 0,9744$$

$$f_{up} := 830 \text{ MPa}$$

$$Q_{sd} := (Q_{sd13} \cdot \cos(\theta)) - (N_{sd13} \cdot \sin(\theta)) = 0,0192 \text{ N}$$

$$\gamma_{a1} := 1,10 \quad \gamma_{a2} := 1,35$$

$$N_{sd} := ((Q_{sd13} \cdot \sin(\theta))) + (N_{sd13} \cdot \cos(\theta)) = 37,1307 \text{ kN}$$

Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos

Especificação	f_u^a MPa	f_y^b MPa	Dímetro d_b mm	pos.
ASTM A307	-	415	-	$1/4 \leq d_b \leq 4$
ISO 4014 Classe 4.6 da ISO 888-1	235	400	12 $\leq d_b \leq 36$	-
ASTM F1558/A193 F1558-1	685	895	10 $\leq d_b \leq 36$	$1/4 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 4014 Classe 8.8 da ISO 888-1	640	820	12 $\leq d_b \leq 36$	-
ASTM F1225/A490 F1225-1	895	1 040	16 $\leq d_b \leq 36$	$1/4 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 4014 Classe 10.9 da ISO 888-1	900	1 000	12 $\leq d_b \leq 36$	-

^a Dimensões variadas com referência à conexão. ^b Dimensões variadas com referência à conexão. ^c Dimensões variadas com referência à conexão. ^d Dimensões variadas com referência à conexão. ^e Dimensões variadas com referência à conexão.

Furo padrão

$$d_b := 16 \text{ mm}$$

$$d_n := d_b + 3,5 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm}$$

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Unidades	Dímetro do parafuso ou barra redonda rosqueada	Dímetro do furo-padrão	Dímetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
polegadas	d_b				
	1/2	9/16	5/8	9/16 \times 1 1/16	9/16 \times 1 1/4
	5/8	11/16	13/16	11/16 \times 7/8	11/16 \times 1 9/16
	3/4	13/16	15/16	13/16 \times 1	13/16 \times 1 7/8
milímetros	7/8	15/16	1 1/16	15/16 \times 1 1/8	15/16 \times 2 3/8
	1	1 1/8	1 1/4	1 1/8 \times 1 5/16	1 1/8 \times 2 1/2
	$\geq 1 1/8$	$d_b + 1/8$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$
	16	18	20	18 \times 22	18 \times 40
	20	22	24	22 \times 26	22 \times 50
	22	24	28	24 \times 30	24 \times 55
	24	27	30	27 \times 32	27 \times 60
	27	30	35	30 \times 37	30 \times 67
	30	33	38	33 \times 40	33 \times 75
	≥ 36	$d_b + 3$	$d_b + 8$	$(d_b + 3) \times (d_b + 10)$	$(d_b + 3) \times 2,5 d_b$

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências dos materiais

Combinações últimas	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c
	Escoamento e Instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}	
Normais	1,10	1,35	1,40
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20
Excepcionais	1,00	1,15	1,20

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

VERIFICAR O MUITO ALONGADO

$$d_w := 10,2 \text{ mm}$$

Distância min. entre furo - borda

Distância máx. entre furo - borda

$$1,25 \cdot d_b = 2 \text{ cm}$$

$$d_{max1} := 12 \cdot d_w = 12,24 \text{ cm}$$

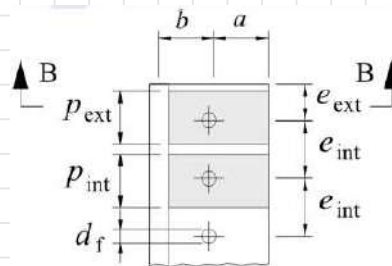
$$d_{fb1} := 3 \text{ cm}$$

$$d_{max2} := 15 \text{ cm}$$

$$d_{fb2} := 5,72 \text{ cm}$$

Distância min. entre furo - alma do WT

$$1,35 \cdot d_b = 2,16 \text{ cm}$$



$$d_{fm} := 2,22 \text{ cm}$$

****A distância entre centro de furo e chapa, etc, não deve ser inferior a 1,35 db, para permitir o uso dos instrumentos de aperto.**

Distância min. entre furo - furo

Distância max. entre furo - furo

$$3 \cdot d_b = 4,8 \text{ cm}$$

$$d_{max1} := 24 \cdot d_w = 24,48 \text{ cm}$$

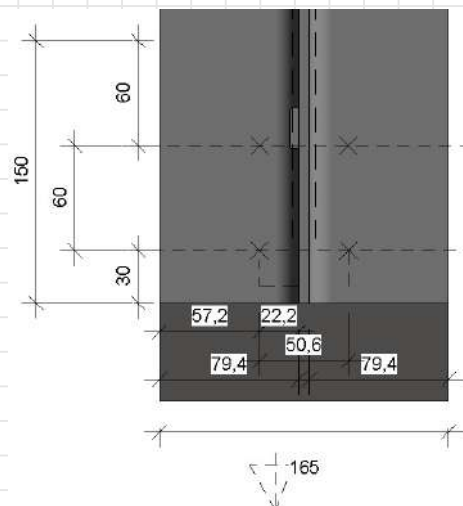
$$d_{ff1} := 6,0 \text{ cm}$$

$$d_{max2} := 30 \text{ cm}$$

$$d_{ff2} := 5,06 \text{ cm}$$

$$d_{ff1} := 6,0 \text{ cm}$$

$$d_{fb1} := 3 \text{ cm}$$



$$d_{fm} := 2,22 \text{ cm}$$

$$d_{fb2} := 5,72 \text{ cm} \quad d_{ff2} := 5,06 \text{ cm}$$

6.3.12 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

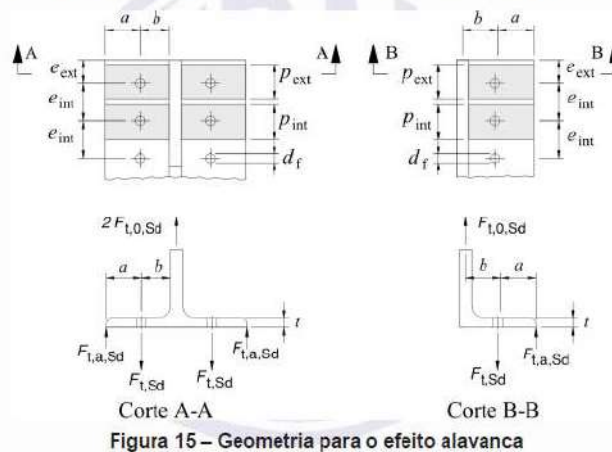
Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

Tabela 16 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d_b		Distância mínima mm
pol.	mm	
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
> 1 1/4	$\geq 38 \text{ mm}$	$1,25 \cdot d_b$

São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja atendida. Para furos alargados e alongados, ver a Tabela 17.

Para efeito de cálculo, a dimensão "a" não pode ser considerada maior que $1,25b$.



Corte A-A
Corte B-B
Figura 15 – Geometria para o efeito alavanca

$$e_{ext} := d_{fb1} = 3 \text{ cm}$$

$$e_{int} := d_{ff1} = 6 \text{ cm}$$

Placa Rígida

$$b := d_{fm} = 2,22 \text{ cm}$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$f_{ychapa} := 345 \text{ MPa}$$

$$f_{uchapa} := 450 \text{ MPa}$$

$$a := d_{fb2} = 5,72 \text{ cm}$$

$$a := 1,25 \cdot d_b = 2 \text{ cm}$$

$$1,75 \cdot b = 38,85 \text{ mm}$$

$$f_{uchapa} = 0,45 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

$$p_{ext} := \min \left(\left[e_{ext} \quad 1,75 \cdot b \right] \right) + \min \left(\left[0,5 \cdot e_{int} \quad 1,75 \cdot b \right] \right) = 6 \text{ cm}$$

Para efeito de cálculo, a dimensão "a" não pode ser considerada maior que $1,25b$.

Tabela A.2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a, b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	B	290	400
				42	290	415
				50	345	450
			1 e 2	55	380	485
				60	415	520
		Chapas e barras ^c	$t \leq 150$ mm	65	450	550
				42	290	415
			$t \leq 100$ mm	50	345	450
			$t \leq 50$ mm	55	380	485
			$t \leq 31,5$ mm	60	415	520
A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	-	65	450	550
				345 a 450		450

$$t_r := \sqrt{\frac{4 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot N_{sd} \cdot \gamma_{a1}}{p_{ext} \cdot f_{uchapa}}} = 9,2695 \text{ mm}$$

$$t_{r, adot} := 10,2 \text{ mm} \text{ espessura da mesa do WT}$$

Logo, é rígida

Dimensionamento de parafusos - Tração

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

$$n := 4 \quad \text{número de parafusos}$$

$$F_{t, sd} := \frac{N_{sd}}{n} = 9,2827 \text{ kN}$$

$$5/8" \rightarrow 15,9 \text{ mm}$$

$$3/4" \rightarrow 19,1 \text{ mm}$$

$$7/8" \rightarrow 22,2 \text{ mm}$$

$$1" \rightarrow 25,4 \text{ mm}$$

$$1-1/8" \rightarrow 28,6 \text{ mm}$$

$$1-1/4" \rightarrow 31,8 \text{ mm}$$

$$1-3/8" \rightarrow 34,9 \text{ mm}$$

$$1-1/2" \rightarrow 38,1 \text{ mm}$$

6.3.3.1 Tração

A força de tração resistente de cálculo de um parafuso tracionado ou de uma barra redonda rosqueada tracionada é calculada conforme a seguir (ver 6.3.5):

$$F_{tRd} = \frac{A_{be} f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

onde

f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso ou barra redonda rosqueada, especificada no Anexo A;

A_{be} é a área efetiva, especificada em 6.3.2.2.

No caso de barras redondas rosqueadas, exceto chumbadores (ver 6.7), a força resistente de cálculo não pode ser superior a $A_b f_y \gamma_{a1}$.

6.3.2.2 Área efetiva do parafuso ou barra redonda rosqueada, para tração

A área resistente ou área efetiva de um parafuso ou de uma barra redonda rosqueada (A_{be}), para tração, é um valor compreendido entre a área bruta e a área da raiz da rosca. Nesta Norma, essa área é considerada igual a $0,75A_b$, sendo A_b a área bruta, baseada no diâmetro do parafuso ou da barra redonda rosqueada. Logo, calcula-se conforme a seguir:

$$A_{be} = 0,75A_b$$

$$A_{be} := 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,508 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,Rd} := \frac{A_{be} \cdot f_{up}}{Y_{a2}} = 92,7119 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{t,sd} = 9,2827 \text{ kN} \quad ok!$$

Dimensionamento de parafusos - Cisalhamento NBR8800/2024 – item 6.3.3.2.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 2,0106 \text{ cm}^2 \quad f_{up} = 83 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \quad Y_{a2} = 1,35$$

$$F_{v,Rd} := \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_{up}}{Y_{a2}} = 55,6271 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{v,sd} := \frac{Q_{sd}}{n} = 4,802 \cdot 10^{-6} \text{ kN} \quad ok!$$

$$F_{v,sd} = 0,0048 \text{ N}$$

Dimensionamento de parafusos a tração e cisalhamento combinados → NBR8800/2024 – item 6.3.3.4

$$\left(\frac{F_{t,sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0,01 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 1 \quad ok!$$

Limitação adicional do valor da força de tração solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada, de acordo com a Tabela 12 da ABNT NBR 8800.

$$\frac{f_{uchapa} \cdot a_b}{Y_{a2}} - 1,90 \cdot F_{v,sd} = 67,0206 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{t,sd} = 9,2827 \text{ kN}$$

Dimensionamento da pressão de contato em furos na mesa do WT → NBR8800/2024 – item 6.3.3.3

Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto.

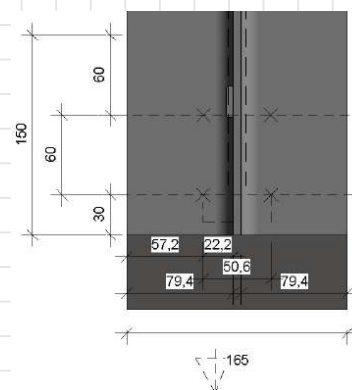
$$l_{f1} := d_{ff1} - d_n = 40,5 \text{ mm}$$

é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

$$l_{f2} := d_{fb1} - \frac{d_n}{2} = 20,25 \text{ mm}$$

$$l_f := \min \left(\left[l_{f1} \quad l_{f2} \right] \right) = 20,25 \text{ mm}$$

$$d_n = 0,0195 \text{ m}$$



Colapso por rasgamento da MESA DO WT

$$F_{sd} := \frac{Q_{sd}}{2} = 0,0096 \text{ N}$$

$$d_{fb2} = 5,72 \text{ cm}$$

$l := 90 \text{ mm}$ DISTANCIA DO CENTRO DO FURO ATÉ A BORDA, NO SENTIDO DA FORÇA

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot (l) = 9,18 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1$$

$$A_{nv} := A_{gv} - 1,5 \cdot (t_{r,adot} \cdot d_n) = 6,1965 \text{ cm}^2$$

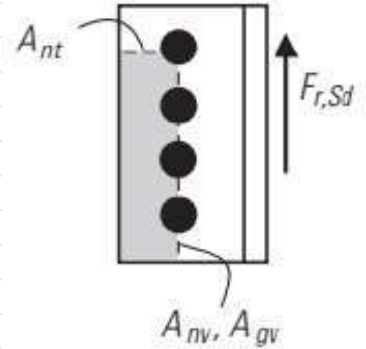
$$A_{nt} := t_{r,adot} \cdot (d_{fb2} - 0,5 \cdot d_n) = 4,8399 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa} + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 285,26 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa} + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 302,09 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \ F_{Rd2} \right] \right) = 285,26 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 0,0192 \text{ N}$$

ok !

**Dimensionamento do cisalhamento MESA DO WT**

$$F_{sd} := \frac{Q_{sd}}{2} = 0,0096 \text{ N}$$

$l := 15 \text{ cm}$ comprimento no sentido da força cortante

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot l = 15,3 \text{ cm}^2$$

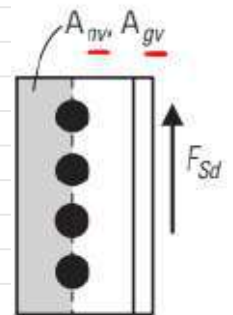
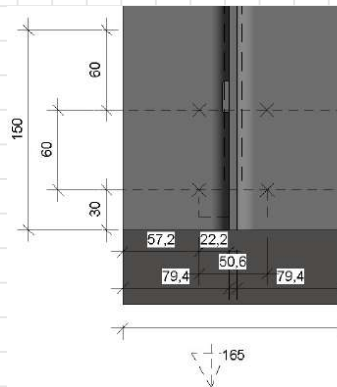
$$A_{nv} := A_{gv} - \left(\frac{n}{2} \cdot t_{r,adot} \cdot d_n \right) = 11,322 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 287,9182 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 226,44 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \ F_{Rd2} \right] \right) = 226,44 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 0,0192 \text{ N}$$

ok !

**Dimensionamento da flexão da chapa**

$$\left(\text{quantidade de parafuso} \right) \frac{N_{sd}}{n} = 9,2827 \text{ kN}$$

força aplicada no local do parafuso



$$t_{r,adot} = 10,2 \text{ mm}$$

$$M_{sd,f} := 0,2 \text{ kN m}$$

$$W_{chapa} := \frac{p_{ext} \cdot t_{r,adot}^2}{6} = 1,0404 \text{ cm}^3$$

$$M_{rd,f} := \frac{W_{chapa} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 0,3263 \text{ m kN}$$



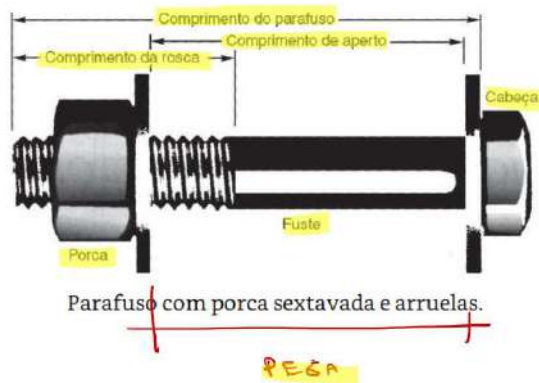
$$M_{rd,f} = 0,3263 \text{ m kN}$$

■ > ■

$$M_{sd,f} = 0,2 \text{ m kN}$$

ok !

Pega



quando o comprimento de pega exceder 5db, a força de cisalhamento resistente de cálculo dos parafusos ou barras redondas rosqueadas deve ser reduzida em 1 % para cada 1,5 mm adicionais de pega (db é o diâmetro do parafuso ou da barra redonda rosqueada).

$$Pega_{max} := 5 \cdot d_b = 80 \text{ mm}$$

$$Pega_{atual} := 2 \cdot t_{r,adot} = 20,4 \text{ mm}$$

Logo, a pega não é longa

Apoio do primeiro gênero

Furo muito alongado

$$d_b := 16 \text{ mm}$$

$$d_{n1} := d_b + 3,5 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm}$$

$$d_{n2} := 2,5 \cdot d_b = 40 \text{ mm}$$

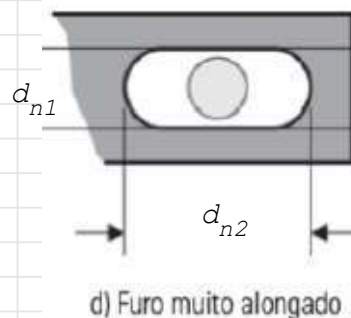
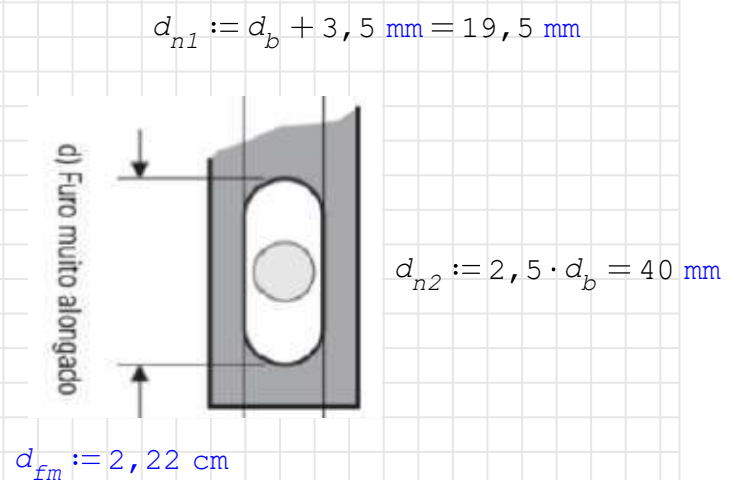
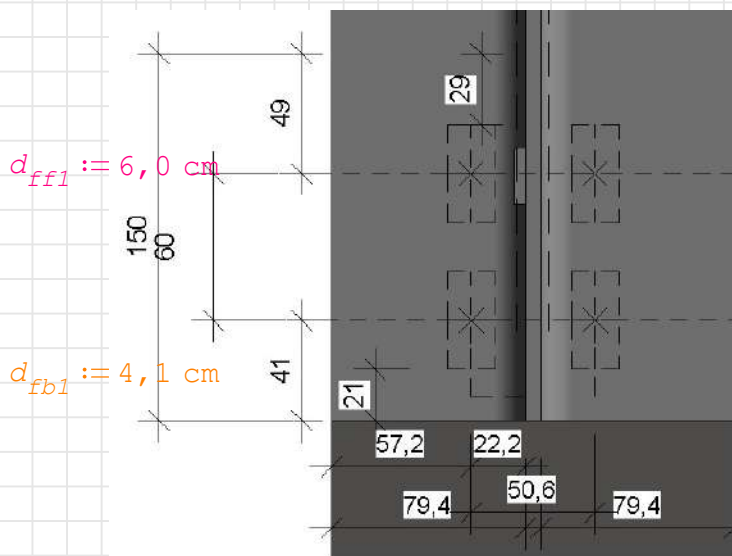


Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Unidades	Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
polegadas	1/2	9/16	5/8	$9/16 \times 11/16$	$9/16 \times 1 \frac{1}{4}$
	5/8	11/16	13/16	$11/16 \times 7/8$	$11/16 \times 1 \frac{9}{16}$
	3/4	13/16	15/16	$13/16 \times 1$	$13/16 \times 1 \frac{7}{8}$
	7/8	15/16	$1 \frac{1}{16}$	$15/16 \times 1 \frac{1}{8}$	$15/16 \times 2 \frac{3}{16}$
	1	$1 \frac{1}{8}$	$1 \frac{1}{4}$	$1 \frac{1}{8} \times 1 \frac{5}{16}$	$1 \frac{1}{8} \times 2 \frac{1}{2}$
	$\geq 1 \frac{1}{8}$	$d_b + 1/8$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$
milímetros	16	18	20	18×22	18×40
	20	22	24	22×26	22×50
	22	24	28	24×30	24×55
	24	27	30	27×32	27×60
	27	30	35	30×37	30×67
	30	33	38	33×40	33×75
	≥ 36	$d_b + 3$	$d_b + 8$	$(d_b + 3) \times (d_b + 10)$	$(d_b + 3) \times 2,5 d_b$



$$d_{fb2} := 5,72 \text{ cm} \quad d_{ff2} := 5,06 \text{ cm}$$

6.3.12 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

Tabela 16 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

pol.	Dímetro d_b mm	Distância mínima mm
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
> 1 1/4	≥ 36 mm	$1,25 d_b$

São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja atendida.
Para furos alargados e alongados, ver a Tabela 17.

Para efeito de cálculo, a dimensão "a" não pode ser considerada maior que $1,25b$.

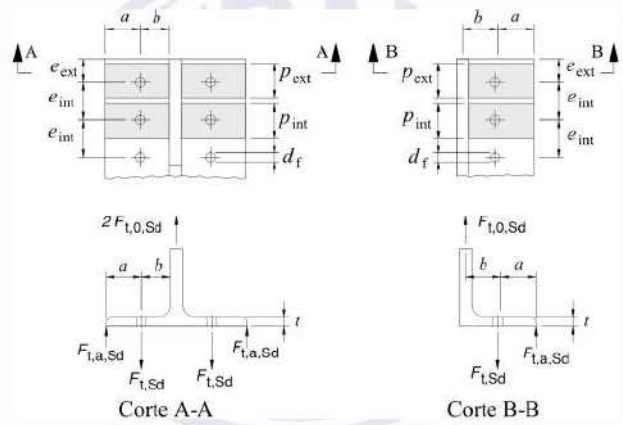


Figura 15 – Geometria para o efeito alavanca

$$e_{ext} := d_{fb1} = 4,1 \text{ cm}$$

$$e_{int} := d_{ff1} = 6 \text{ cm}$$

Placa Rígida

$$b := d_{fm} = 2,22 \text{ cm}$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$f_{ychapa} := 345 \text{ MPa}$$

$$a_{min} := 1,25 \cdot d_b = 2 \text{ cm}$$

Para efeito de cálculo, a dimensão "a" não pode ser considerada maior que $1,25b$.

$$f_{uchapa} := 450 \text{ MPa}$$

$$a := d_{fb2} = 5,72 \text{ cm}$$

$$p_{ext} := \min \left(\left[e_{ext} \quad 1,75 \cdot b \right] \right) + \min \left(\left[0,5 \cdot e_{int} \quad 1,75 \cdot b \right] \right) = 6,885 \text{ cm}$$

Tabela A.2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a, b} ou faixa de espessura disponível	Grau	<i>f_y</i> MPa	<i>f_u</i> MPa	
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550	
		Chapas e barras ^c	<i>t</i> ≤ 200 mm				
	A500	Perfis	4	A	230	310	
				B	290	400	
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	42	290	415	
				50	345	450	
				55	380	485	
				60	415	520	
				65	450	550	
		Chapas e barras ^c	1 e 2	<i>t</i> ≤ 150 mm	42	290	415
				<i>t</i> ≤ 100 mm	50	345	450
				<i>t</i> ≤ 50 mm	55	380	485
				<i>t</i> ≤ 31,5 mm	60	415	520
					65	450	550
	A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	-	345 a 450	450	

$$t_r := \sqrt{\frac{4 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot N_{sd} \cdot Y_{a1}}{p_{ext} \cdot f_{uchapa}}} = 8,6532 \text{ mm}$$

$$t_{r,adot} := 10,2 \text{ mm} \text{ espessura da mesa do WT}$$

Logo, é rígida

ESPESSURAS COMERCIAIS

6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm.

Dimensionamento de parafusos - Tração

$$5/8" \rightarrow 15,9 \text{ mm}$$

$$3/4" \rightarrow 19,1 \text{ mm}$$

$$7/8" \rightarrow 22,2 \text{ mm}$$

$$1" \rightarrow 25,4 \text{ mm}$$

$$1-1/8" \rightarrow 28,6 \text{ mm}$$

$$1-1/4" \rightarrow 31,8 \text{ mm}$$

$$1-3/8" \rightarrow 34,9 \text{ mm}$$

$$1-1/2" \rightarrow 38,1 \text{ mm}$$

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

$$n := 4 \quad \text{número de parafusos}$$

$$F_{t,sd} := \frac{N_{sd}}{n} = 9,2827 \text{ kN}$$

6.3.3.1 Tração

A força de tração resistente de cálculo de um parafuso tracionado ou de uma barra redonda rosqueada tracionada é calculada conforme a seguir (ver 6.3.5):

$$F_{tRd} = \frac{A_{be} f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

onde

f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso ou barra redonda rosqueada, especificada no Anexo A;

A_{be} é a área efetiva, especificada em 6.3.2.2.

No caso de barras redondas rosqueadas, exceto chumbadores (ver 6.7), a força resistente de cálculo não pode ser superior a $A_b f_{y1}$.

6.3.2 Área efetiva do parafuso ou barra redonda rosqueada, para tração

A área resistente ou área efetiva de um parafuso ou de uma barra redonda rosqueada (A_{be}), para tração, é um valor compreendido entre a área bruta e a área da raiz da rosca. Nesta Norma, essa área é considerada igual a $0,75A_b$, sendo A_b a área bruta, baseada no diâmetro do parafuso ou da barra redonda rosqueada. Logo, calcula-se conforme a seguir:

$$A_{be} = 0,75A_b$$

$$A_{be} := 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,508 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,Rd} := \frac{A_{be} \cdot f_{up}}{\gamma_{a2}} = 92,7119 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{t,sd} = 9,2827 \text{ kN}$$

ok !

Dimensionamento de parafusos - Cisalhamento NBR8800/2024 – item 6.3.3.2.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 2,0106 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} := \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_{up}}{\gamma_{a2}} = 55,6271 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{v,sd} := \frac{Q_{sd}}{n} = 4,802 \cdot 10^{-6} \text{ kN}$$

ok !

Dimensionamento de parafusos a tração e cisalhamento combinados → NBR8800/2024 – item 6.3.3.4

$$\left(\frac{F_{t,sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0,01$$

■ < ■

1

ok !

Limitação adicional do valor da força de tração solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada, de acordo com a Tabela 12 da ABNT NBR 8800.

$$\frac{f_{uchapa} \cdot a_b}{\gamma_{a2}} - 1,90 \cdot F_{v,sd} = 67,0206 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{t,sd} = 9,2827 \text{ kN}$$

Dimensionamento da pressão de contato em furos na mesa do WT → NBR8800/2024 – item 6.3.3.3

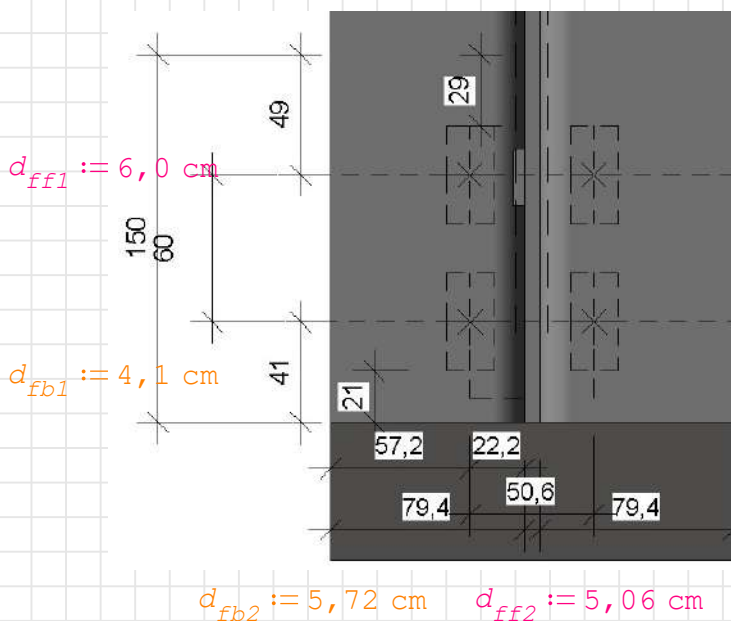
Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto.

$$l_{f1} := d_{ff1} - d_n = 40,5 \text{ mm}$$

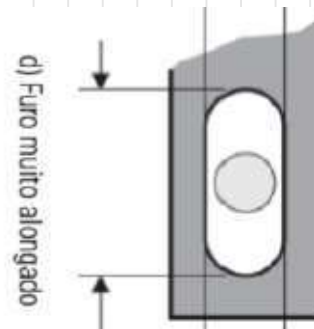
é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

$$l_{f2} := d_{fb1} - \frac{d_n}{2} = 31,25 \text{ mm}$$

$$l_f := \min \left(\left[l_{f1} \quad l_{f2} \right] \right) = 31,25 \text{ mm}$$



$$d_{n1} := d_b + 3,5 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm}$$



$$d_{n2} := 2,5 \cdot d_b = 40 \text{ mm}$$

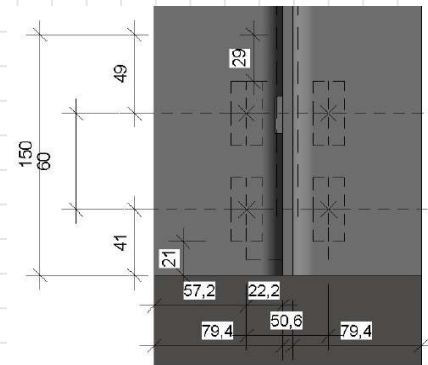
$$d_{fm} := 2,22 \text{ cm}$$

Menor entre,

$$F_{c,rd1} := \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{\gamma_{a2}} = 127,5 \text{ kN} \quad F_{c,rd2} := \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{\gamma_{a2}} = 130,56 \text{ kN}$$

$$F_{c,Rd} := \min \left(\left[F_{c,rd1} \quad F_{c,rd2} \right] \right) = 127,5 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad Q_{sd} = 0,0192 \text{ N}$$

- l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;
- d_b é o diâmetro do parafuso;
- t é a espessura da parte ligada;
- f_u é a resistência à ruptura do aço da parede do furo.



Colapso por rasgamento da MESA DO WT

$$F_{Sd} := \frac{Q_{sd}}{2} = 0,0096 \text{ N}$$

$$d_{fb2} = 5,72 \text{ cm}$$

$l := 101 \text{ mm}$ DISTANCIA DO CENTRO DO FURO ATÉ A BORDA, NO SENTIDO DA FORÇA

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot (l) = 10,302 \text{ cm}^2$$

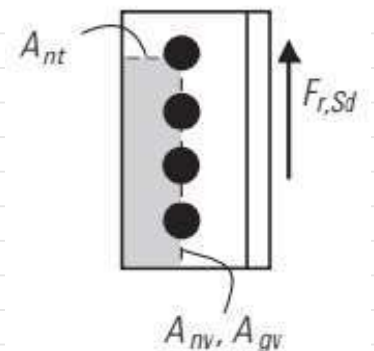
$$C_{ts} := 1$$

$$A_{nv} := A_{gv} - 1,5 \cdot (t_{r,adot} \cdot d_n) = 7,3185 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} := t_{r,adot} \cdot (d_{fb2} - 0,5 \cdot d_n) = 4,8399 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa} + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 307,7 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa} + C_{ts} \cdot A_{nt} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 319,294 \text{ kN}$$



$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \ F_{Rd2} \right] \right) = 307,7 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{Sd} := Q_{sd} = 0,0192 \text{ N}$$

ok !

Dimensionamento do cisalhamento MESA DO WT

$$F_{Sd} := \frac{Q_{sd}}{2} = 0,0096 \text{ N}$$

$l := 15 \text{ cm}$ comprimento no sentido da força cortante

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot l = 15,3 \text{ cm}^2$$

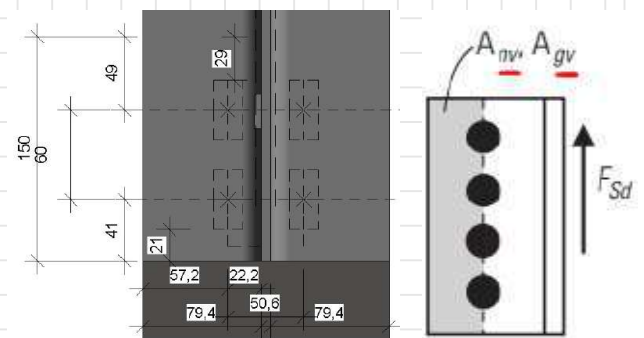
$$A_{nv} := A_{gv} - \left(\frac{n}{2} \cdot t_{r,adot} \cdot d_n \right) = 11,322 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 287,9182 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 226,44 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \ F_{Rd2} \right] \right) = 226,44 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{Sd} := Q_{sd} = 0,0192 \text{ N}$$

ok !



Dimensionamento da flexão da chapa

(quantidade de parafuso) $\frac{N_{sd}}{n} = 9,2827 \text{ kN}$

força aplicada no local do parafuso

$$t_{r,adot} = 10,2 \text{ mm}$$

$$M_{sd,f} := 0,2 \text{ kN m}$$



$$W_{chapa} := \frac{p_{ext} \cdot t_{r,adot}^2}{6} = 1,1939 \text{ cm}^3$$

$$M_{rd,f} := \frac{W_{chapa} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 0,3744 \text{ m kN}$$

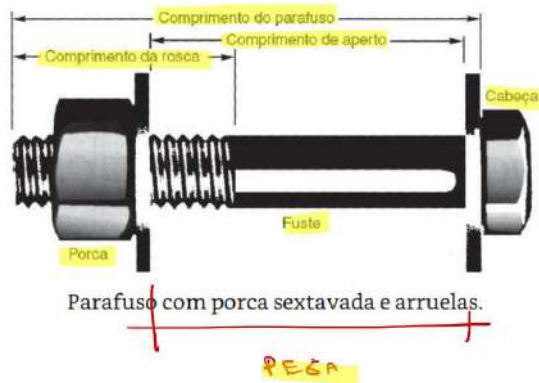
$$M_{rd,f} = 0,3744 \text{ m kN}$$

■ > ■

$$M_{sd,f} = 0,2 \text{ m kN}$$

ok !

Pega



quando o comprimento de pega exceder 5db, a força de cisalhamento resistente de cálculo dos parafusos ou barras redondas rosqueadas deve ser reduzida em 1 % para cada 1,5 mm adicionais de pega (db é o diâmetro do parafuso ou da barra redonda rosqueada).

$$Pega_{max} := 5 \cdot d_b = 80 \text{ mm}$$

$$Pega_{atual} := 2 \cdot t_{r,adot} = 20,4 \text{ mm}$$

Logo, a pega não é longa

Ligação da escora na terça

$$f_{c_{sd}} := 1,01 \text{ kN} \quad (\text{compressão})$$

Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos

Especificação	f_{yb}^b MPa	f_{ub}^b MPa	Diâmetro d_b	
			mm	pol.
ASTM A307	-	415	-	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 4$
ISO 4016 Classe 4.6 da ISO 898-1	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM F3125 A325 e F1852 ^a	635	830	$16 \leq d_b \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 1\frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 8.8 da ISO 898-1	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM F3125 A490 e F2280 ^a	895	1 040	$16 \leq d_b \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 1\frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 10.9 da ISO 898-1	900	1 000	$12 \leq d_b \leq 36$	-
^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.				
^b f_{yb} e f_{ub} são, respectivamente, a resistência ao escoamento e a resistência à ruptura do aço dos parafusos.				

Parafuso: ASTM A307

$$f_{ub} := 415 \text{ MPa} \quad \frac{1}{2} \leq d_b \leq 4$$

Solda: Eletrodo E70

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \quad \chi$$

$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Ligação escora entre terça e cumeeira

$\theta := 13^\circ$

$f_y := 345 \text{ MPa}$

$\tan(\theta) = 0,2309$

$f_u := 450 \text{ MPa}$

$\sin(\theta) = 0,225$

Solda: Eletrodo E70

$\cos(\theta) = 0,9744$

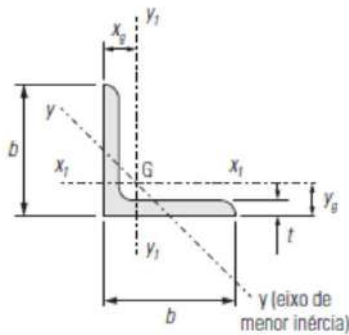
$t_{\text{terça}} := 2,65 \text{ mm}$

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

$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$\gamma_{a2} := 1,35$

$\gamma_{w2} := 1,35$

A.3 Cantoneiras de abas iguais**A.3.1 Série baseada em polegadas**

- b = largura das abas
- t = espessura das abas
- x_g = posição do centro geométrico G na direção do eixo x1
- y_g = posição do centro geométrico G na direção do eixo y1
- A_g = área bruta
- I_{x1} = momento de inércia em relação ao eixo x1
- W_{x1} = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x1
- Z_{x1} = módulo de resistência plástico em relação ao eixo x1
- r_{x1} = raio de giração em relação ao eixo x1
- I_{y1} = momento de inércia em relação ao eixo y1
- W_{y1} = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y1
- r_{y1} = raio de giração em relação ao eixo y1
- r_y = raio de giração em relação ao eixo y (mínimo)
- J = constante de torção

Designação (mm x mm)	b (mm)	t (mm)	x_g = y_g (mm)	A_g (cm²)	Massa (kg/m)	I_{x1} = I_{y1} (cm⁴)	W_{x1} = W_{y1} (cm³)	Z_{x1} = Z_{y1} (cm³)	r_{x1} = r_{y1} (cm)	r_y (cm)	J (cm⁴)
L 44,45 x 3,17	44,45	3,17	12,2	2,71	2,14	5,41	1,64	2,92	1,40	0,89	0,091

Parafuso: ASTM A307

$f_{ub} := 415 \text{ MPa} \quad \frac{1}{2} \leq db \leq 4$

Solda: Eletrodo E70

$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$\gamma_{w2} := 1,35$

$d_{fb1} := 27,5 \text{ mm}$

$d_b := 12,7 \text{ mm}$

$t_{adot} := 6 \text{ mm}$

Distância mínima entre furos e chapa:

Distância dos furos às bordas

$d_{fm} := 20 \text{ mm}$

$1,35 \cdot d_b = 17,145 \text{ mm}$

Mínimo $1,25 \cdot d_b = 15,875 \text{ mm}$

$$\text{Máximo} \quad \begin{cases} 12 \cdot t_{adot} \\ 150 \text{ mm} \end{cases} = \begin{cases} 72 \\ 150 \end{cases} \text{ mm}$$

Compressão

$$F_{c,sd} := 1,10 \text{ kN} \quad N_{c,rd} := 14,21 \text{ kN}$$

Placa Rígida

$$t_{r,adot} := 6 \text{ mm}$$

Logo, é rígida



Disposição construtiva - solda

Dimensão mínima da perna do filete

$$t_{WT} := 3 \text{ mm} < 6,3 \text{ mm}$$

$$d_{w,min} := 3 \text{ mm}$$

$$d_{w,adot} := 3 \text{ mm}$$

$$a_w := 0,707 \cdot d_{w,adot} = 2,121 \text{ mm}$$

Dimensão máxima da perna do filete

$$d_{w,max} := t_{WT} - 1,5 \text{ mm} = 1,5 \text{ mm}$$

Comprimento de solda

$$\text{Mínimo} \quad 4 \cdot d_{w,adot} = 12 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$$

$$l_{w,mont} := 85,73 \text{ mm}$$

$$l_{w,trans} := 0 \text{ mm}$$

Esforços solicitantes das cantoneiras

$$\text{Compressão} \quad F_{c,sd} := 1,1 \text{ kN}$$

P/ dimensionamento

$$F_{c,rd} := 14,21 \text{ kN}$$

Esforços solicitantes de cálculo

$$\text{Compressão} \quad F_{c,sd} = 1,1 \text{ kN} \geq \left\{ \frac{F_{c,rd}}{2} = \begin{cases} 45 \\ 7,105 \end{cases} \text{ kN} \right.$$

$$F_{c,sd} := \max \left[\left(F_{c,sd} \right) (45 \text{ kN}) \left(\frac{F_{c,rd}}{2} \right) \right] = 45 \text{ kN}$$

Tirante rígido terça

Tensão solicitante na solda

$$\tau_{w, sd} := \sqrt{\tau_{w, x, sd}^2 + \tau_{w, y, sd}^2}$$

$$\tau_{w, x, sd} := 0$$

$$\tau_{w, y, sd} := \frac{F_{y, sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z, sd} \cdot x}{I_z}$$

$$F_{y, sd} := F_{c, sd} = 45 \text{ kN}$$

O comprimento efetivo das soldas longitudinais de elementos axialmente solicitados deve ser tomado como igual ao seu comprimento multiplicado pelo fator β dado por:

$$0,6 \leq \beta := 1,2 - 0,002 \cdot \left(\frac{2 \cdot l_{w, mont} + 2 \cdot l_{w, trans}}{d_{w, adot}} \right) \leq 1,0$$

$$0,6 \leq \beta = 1,0857 \leq 1,0$$

$\beta := 1$ --> Portanto, o comprimento das soldas longitudinais não precisa ser reduzido.

$$A_{ew} := (2 \cdot l_{w, mont}) \cdot a_w = 3,6367 \text{ cm}^2$$

$$M_{z, sd} := 0$$

$$\tau_{w, y, sd} := \frac{F_{y, sd}}{A_{ew}} = 12,374 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

$$\tau_{w, sd} := \sqrt{\tau_{w, x, sd}^2 + \tau_{w, y, sd}^2} = 12,374 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

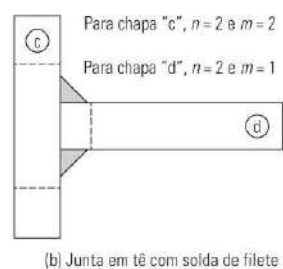
Verificação do metal da solda

$$\tau_{w, sd} = 12,374 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} < \tau_{w, rd} := 0,6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{w2}} = 21,5556 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \text{ --> Atende}$$

Ruptura da da cantoneira na região da solda

$$t > \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w, res, sd}}{m \cdot f_u} \quad \begin{matrix} n := 2 \\ m := 1 \end{matrix}$$

$$f_{w, res, sd} := \sqrt{\sigma_{w, sd}^2 + \tau_{w, sd}^2}$$



$$\sigma_{w,sd} := 0$$

$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2} = 12,374 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_{verif} := \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} = 2,6245 \text{ mm}$$

$$3,17 \text{ mm} > t_{verif} = 2,6245 \text{ mm} \quad \text{--> Atende}$$

Ruptura da chapa C com a cantoneira na região da solda

$$t > \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} \quad \begin{array}{l} n := 2 \\ m := 2 \end{array}$$

$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2}$$

$$\sigma_{w,sd} := 0$$

$$f_{w,res,sd} := \sqrt{\sigma_{w,sd}^2 + \tau_{w,sd}^2} = 12,374 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$t_{verif} := \frac{2,25 \cdot n \cdot a_w \cdot f_{w,res,sd}}{m \cdot f_u} = 1,3123 \text{ mm}$$

$$6 \text{ mm} > t_{verif} = 1,3123 \text{ mm} \quad \text{--> Atende}$$

Ligação entre banzo inferior e superior (Entre Trelças)

$$\theta := 13^\circ$$

Parafusos
ASTM A325

$$Q_{sd13} := 5,3 \text{ kN}$$

$$\tan(\theta) = 0,2309$$

$$\sin(\theta) = 0,225$$

$$\cos(\theta) = 0,9744$$

$$f_{yp} := 635 \text{ MPa}$$

$$f_{up} := 830 \text{ MPa}$$

$$Q_{sd} := 11,24 \text{ kN (Compressão)}$$

$$\gamma_{a1} := 1,10 \quad \gamma_{a2} := 1,35$$

Furo padrão

$$d_b := 12,6 \text{ mm}$$

$$d_n := d_b + 3,5 \text{ mm} = 16,1 \text{ mm}$$

Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos

Especificação	f_u^a MPa	f_u^b MPa	Dímetro d_b mm	Dímetro d_n mm
ASTM A307	-	415	-	1/4"
ISO 4016 Classe 4.6 da ISO 898-1	235	400	12 ≤ d_b < 36	15 ≤ d_n < 48
ASTM F3125/A325 e F1552 ²	635	830	16 ≤ d_b < 36	19 ≤ d_n < 110
ISO 4016 Classe 8.8 da ISO 898-1	640	850	12 ≤ d_b < 36	-
ASTM F3125/A325 e F2280 ²	995	1040	16 ≤ d_b < 36	19 ≤ d_n < 110
ISO 4016 Classe 10.9 da ISO 898-1	900	1000	12 ≤ d_b < 36	-

² Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica compatível à dos aços AISI 302 COR ou à dos aços AISI 409.

³ f_u e f_y são, respectivamente, a resistência ao escoamento e a resistência à ruptura do aço dos parafusos.

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Unidades	Dímetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Dímetro do furo-padrão	Dímetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
polegadas	1/2	9/16	5/8	9/16 × 11/16	9/16 × 1 1/4
	5/8	11/16	13/16	11/16 × 7/8	11/16 × 1 9/16
	3/4	13/16	15/16	13/16 × 1	13/16 × 1 7/8
	7/8	15/16	1 1/16	15/16 × 1 1/8	15/16 × 2 3/16
	1	1 1/8	1 1/4	1 1/8 × 1 5/16	1 1/8 × 2 1/2
	≥ 1 1/8	$d_b + 1/8$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$
milímetros	16	18	20	18 × 22	18 × 40
	20	22	24	22 × 26	22 × 50
	22	24	28	24 × 30	24 × 55
	24	27	30	27 × 32	27 × 60
	27	30	35	30 × 37	30 × 67
	30	33	38	33 × 40	33 × 75
	≥ 36	$d_b + 3$	$d_b + 8$	$(d_b + 3) \times (d_b + 10)$	$(d_b + 3) \times 2,5 d_b$

VERIFICAR O MUITO LONGADO

$$d_w := 10,2 \text{ mm}$$

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências dos materiais γ_m

Combinações últimas	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento e Instabilidade	Ruptura		
	γ_{a1}	γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Distância min. entre furo - borda

Distância máx. entre furo - borda

$$1,25 \cdot d_b = 1,575 \text{ cm}$$

$$d_{max1} := 12 \cdot d_w = 12,24 \text{ cm}$$

$$e_{int} := 2 \text{ cm}$$

$$d_{max2} := 15 \text{ cm}$$

$$e_{ext} := 2 \text{ cm}$$

Distância min. entre furo - mesa

Distância máx. entre furo - mesa

$$b_1 := 1,35 \cdot d_b = 1,701 \text{ cm}$$

$$b_{1,adot} := 2 \text{ cm}$$

****A distância entre centro de furo e chapa, etc, não deve ser inferior a 1,35 db, para permitir o uso dos instrumentos de aperto.**

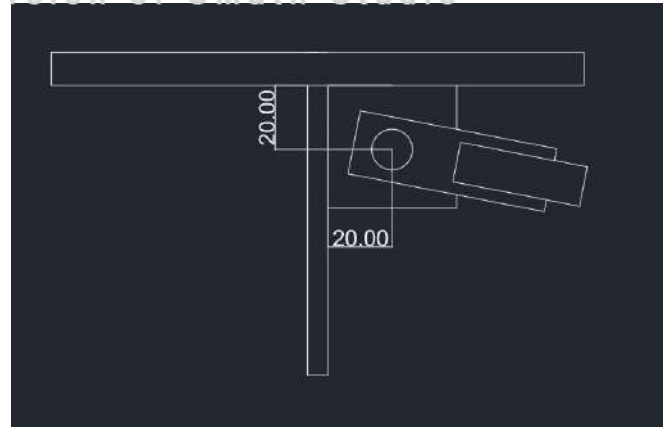
6.3.12 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

Tabela 16 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d_b		Distância mínima mm
pol.	mm	
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
> 1 1/4	≥ 38 mm	1,25 d_b

São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja atendida.
Para furos alargados e alongados, ver a Tabela 17.



Dimensionamento de parafusos - Cisalhamento NBR8800/2024 – item 6.3.3.2.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,2469 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} := \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_{up}}{Y_{a2}} = 34,4975 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{v,Sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

ok !

Placa Rígida

$$f_{ychapa} := 345 \text{ MPa}$$

$$f_{uchapa} := 450 \text{ MPa}$$

$$t_{r,adot} := 6 \text{ mm} \quad \text{espessura}$$

Dimensionamento da pressão de contato em furos na chapa → NBR8800/2024 – item 6.3.3.3

Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto.

$$l_f := e_{ext} - \frac{d_n}{2} = 11,95 \text{ mm}$$

Menor entre,

$$F_{c,rd1} := \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 28,68 \text{ kN}$$

$$F_{c,rd2} := \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 60,48 \text{ kN}$$

$$F_{c,Rd} := \min \left(\left[F_{c,rd1} \quad F_{c,rd2} \right] \right) = 28,68 \text{ kN}$$

■ > ■

$$Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

Dimensionamento do cisalhamento na chapa

$$F_{sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

$$l := 4 \text{ cm}$$

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot l = 2,4 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} - (t_{r,adot} \cdot d_n) = 1,434 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 45,1636 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 28,68 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \quad F_{Rd2} \right] \right) = 28,68 \text{ kN} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN} \quad \text{ok !}$$

Dimensionamento da compressão na chapa

$$F_{rd} := \frac{f_{ychapa} \cdot A_{gv}}{Y_{a1}} = 75,2727 \text{ kN}$$

$$\blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

$$L_e := 1,41 \text{ cm}$$

$$r := \frac{t_{r,adot}}{\sqrt{12}} = 0,1732 \text{ cm}$$

$$\frac{L_e}{r} = 8,1406 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 25$$

Solda na chapa maior

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

menor dimensão é 6,2mm

$$d_{wmin} := 3 \text{ mm}$$

$$d_{wmax} := 6,2 \text{ mm}$$

$$d_{wcM} := 4 \text{ mm}$$

$$c_{efM} := 50 \text{ mm}$$

$$A_w := d_{wcM} \cdot c_{efM} = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$F_{rds} := \frac{0,6 \cdot A_w \cdot f_w}{Y_{a2}} = 4,3111 \frac{\text{m J}}{\text{cm}^2} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

resistência de 43kN

Solda na chapa menor

menor dimensão é 4mm

$$dw_{min} = 0,003 \text{ m}$$

$$dw_{maxcm} := 4 \text{ mm}$$

$$dw_{cm} := 4 \text{ mm}$$

$$ce_{fm} := 40 \text{ mm}$$

$$Aw2 := dw_{cm} \cdot ce_{fm} = 0,0002 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \text{ mm}^2$$

resistencia de 35kN

$$F_{rds} := \frac{0,6 \cdot Aw2 \cdot f_w}{\gamma_{a2}} = 3,4489 \frac{\text{m J}}{\text{cm}^2} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 11,24 \text{ kN}$$

Ligação entre banzo inferior e superior (Entre Trelças)

Parafusos
ASTM A325

$$Q_{sd} := 5,3 \text{ kN} \quad (\text{Compressão})$$

$$f_{yp} := 635 \text{ MPa}$$

$$f_{up} := 830 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1} := 1,10 \quad \gamma_{a2} := 1,35$$

Furo padrão

$$d_b := 12,6 \text{ mm}$$

$$d_n := d_b + 3,5 \text{ mm} = 16,1 \text{ mm}$$

Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos

Especificação	f_u^a MPa	f_u^b MPa	Dímetro d_b mm	Dímetro d_b pol.
ASTM A307	-	415	-	$1/4 \leq d_b \leq 1$
ISO 4016 Classe 4.6 da ISO 898-1	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM F3125/A325 e F1552 ²	635	830	$16 \leq d_b \leq 36$	$5/8 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 4016 Classe 5.8 da ISO 898-1	640	850	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM F3125/A325 e F2280 ²	995	1040	$16 \leq d_b \leq 36$	$5/8 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 4016 Classe 10.9 da ISO 898-1	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

² Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica compatível à dos aços AISI 302 COR ou à dos aços ASTM A409.
^a f_u e f_u^b são, respectivamente, a resistência ao escoamento e a resistência à ruptura do aço dos parafusos.

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Unidades	Dímetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Dímetro do furo-padrão	Dímetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
polegadas	1/2	9/16	5/8	9/16 × 11/16	9/16 × 1 1/4
	5/8	11/16	13/16	11/16 × 7/8	11/16 × 1 9/16
	3/4	13/16	15/16	13/16 × 1	13/16 × 1 7/8
	7/8	15/16	1 1/16	15/16 × 1 1/8	15/16 × 2 3/16
	1	1 1/8	1 1/4	1 1/8 × 1 5/16	1 1/8 × 2 1/2
	≥ 1 1/8	$d_b + 1/8$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$
milímetros	16	18	20	18 × 22	18 × 40
	20	22	24	22 × 26	22 × 50
	22	24	28	24 × 30	24 × 55
	24	27	30	27 × 32	27 × 60
	27	30	35	30 × 37	30 × 67
	30	33	38	33 × 40	33 × 75
	≥ 36	$d_b + 3$	$d_b + 8$	$(d_b + 3) \times (d_b + 10)$	$(d_b + 3) \times 2,5 d_b$

VERIFICAR O MUITO LONGADO

$$d_w := 10,2 \text{ mm}$$

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências dos materiais γ_m

Combinações últimas	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento e Instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Distância min. entre furo - borda

Distância máx. entre furo - borda

$$1,25 \cdot d_b = 1,575 \text{ cm}$$

$$d_{max1} := 12 \cdot d_w = 12,24 \text{ cm}$$

$$e_{int} := 2 \text{ cm} \quad fthn$$

$$d_{max2} := 15 \text{ cm}$$

$$e_{ext} := 2 \text{ cm}$$

Distância min. entre furo - mesa

Distância máx. entre furo - mesa

$$b_1 := 1,35 \cdot d_b = 1,701 \text{ cm}$$

$$b_{1,adot} := 2 \text{ cm}$$

****A distância entre centro de furo e chapa, etc, não deve ser inferior a 1,35 db, para permitir o uso dos instrumentos de aperto.**

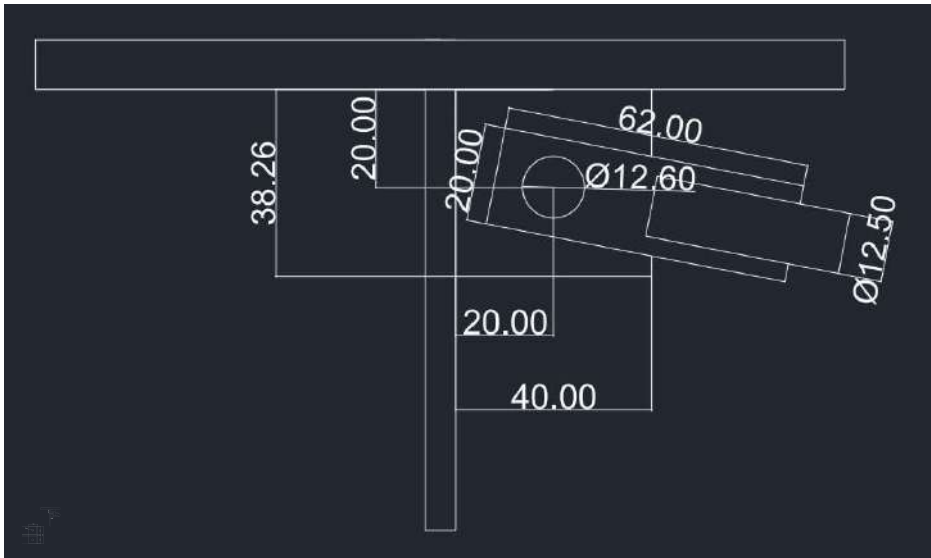
6.3.12 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

Tabela 16 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d_b		Distância mínima mm
pol.	mm	
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
> 1 1/4	≥ 38 mm	$1,25 d_b$

São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja atendida.
Para furos alargados e alongados, ver a Tabela 17.



Dimensionamento de parafusos - Cisalhamento NBR8800/2024 – item 6.3.3.2.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 1,2469 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} := \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_{up}}{\gamma_{a2}} = 34,4975 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{v,Sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

ok !

Espessura da placa

$$f_{ychapa} := 345 \text{ MPa}$$

$$f_{uchapa} := 450 \text{ MPa}$$

$$t_{r,adot} := 6 \text{ mm} \quad \text{espessura}$$

Dimensionamento da pressão de contato em furos na chapa → NBR8800/2024 – item 6.3.3.3

Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto.

$$l_f := e_{ext} - \frac{d_n}{2} = 11,95 \text{ mm}$$

Menor entre,

$$F_{c,rd1} := \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 28,68 \text{ kN}$$

$$F_{c,rd2} := \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 60,48 \text{ kN}$$

$$F_{c,Rd} := \min \left(\left[F_{c,rd1} \quad F_{c,rd2} \right] \right) = 28,68 \text{ kN}$$

■ > ■

$$Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

Dimensionamento do cisalhamento na chapa

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

$$l := 6 \text{ cm}$$

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot l = 3,6 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} - \left(t_{r,adot} \cdot d_n \right) = 2,634 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa}}{Y_{a1}} = 67,7455 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa}}{Y_{a2}} = 52,68 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \quad F_{Rd2} \right] \right) = 52,68 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

ok !

Dimensionamento da compressão na chapa

$$F_{rd} := \frac{f_{ychapa} \cdot A_{gv}}{Y_{a1}} = 112,9091 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

$$L_e := 1,41 \text{ cm}$$

$$r := \frac{t_{r,adot}}{\sqrt{12}} = 0,1732 \text{ cm}$$

$$\frac{L_e}{r} = 8,1406$$

■ < ■

25

Solda na chapa maior

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

menor dimensão é 6,2mm

$$d_{wmin} := 3 \text{ mm}$$

$$dw_{max} := 6,2 \text{ mm}$$

$$dwcM := 4 \text{ mm}$$

$$cefM := 50 \text{ mm}$$

$$Aw := dwcM \cdot cefM = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$Frds := \frac{0,6 \cdot Aw \cdot fw}{Y_{a2}} = 4,3111 \frac{\text{m J}}{\text{cm}^2} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

resistência de 43kN

Solda na chapa menor

menor dimensão é 4mm

$$dw_{min} = 0,003 \text{ m}$$

$$dw_{maxcm} := 4 \text{ mm}$$

$$dwcM := 4 \text{ mm}$$

$$cefM := 40 \text{ mm}$$

$$Aw2 := dwcM \cdot cefM = 0,0002 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \text{ mm}^2$$

resistencia de 35kN

$$Frds := \frac{0,6 \cdot Aw2 \cdot fw}{Y_{a2}} = 3,4489 \frac{\text{m J}}{\text{cm}^2} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 5,3 \text{ kN}$$

Ligação entre banzo inferior e superior (Entre Trelças)

Parafusos
ASTM A325

$$Q_{sd} := 1,97 \text{ kN} \quad (\text{Compressão})$$

$$f_{yp} := 635 \text{ MPa}$$

$$f_{up} := 830 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1} := 1,10 \quad \gamma_{a2} := 1,35$$

Furo padrão

$$d_b := 16 \text{ mm}$$

$$d_n := d_b + 3,5 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm}$$

Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos

Especificação	f_u^a MPa	f_u^b MPa	Dímetro d_b mm	Dímetro d_b pol.
ASTM A307	-	415	-	1/4 a 1
ISO 4016 Classe 4.6 da ISO 898-1	235	400	12 a $d_b \leq 36$	-
ASTM F3125/A325 e F1552 ²	635	830	16 a $d_b \leq 36$	1/2 a $d_b \leq 1 1/2$
ISO 4016 Classe 8.8 da ISO 898-1	840	850	12 a $d_b \leq 36$	-
ASTM F3125/A325 e F2280 ²	995	1040	16 a $d_b \leq 36$	1/2 a $d_b \leq 1 1/2$
ISO 4016 Classe 10.9 da ISO 898-1	900	1000	12 a $d_b \leq 36$	-

² Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica compatível à dos aços AISI 302 COR ou à dos aços ASTM A409.
^a f_u e f_u são, respectivamente, a resistência ao escoamento e a resistência à ruptura do aço dos parafusos.

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Unidades	Dímetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Dímetro do furo-padrão	Dímetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
polegadas	1/2	9/16	5/8	9/16 x 11/16	9/16 x 1 1/4
	5/8	11/16	13/16	11/16 x 7/8	11/16 x 1 9/16
	3/4	13/16	15/16	13/16 x 1	13/16 x 1 7/8
	7/8	15/16	1 1/16	15/16 x 1 1/8	15/16 x 2 3/16
	1	1 1/8	1 1/4	1 1/8 x 1 5/16	1 1/8 x 2 1/2
	≥ 1 1/8	$d_b + 1/8$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$
milímetros	16	18	20	18 x 22	18 x 40
	20	22	24	22 x 26	22 x 50
	22	24	28	24 x 30	24 x 55
	24	27	30	27 x 32	27 x 60
	27	30	35	30 x 37	30 x 67
	30	33	38	33 x 40	33 x 75
	≥ 36	$d_b + 3$	$d_b + 8$	$(d_b + 3) \times (d_b + 10)$	$(d_b + 3) \times 2,5 d_b$

VERIFICAR O MUITO LONGADO

$$d_w := 10,2 \text{ mm}$$

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências dos materiais γ_m

Combinações últimas	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento e Instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Distância min. entre furo - borda

Distância máx. entre furo - borda

$$1,25 \cdot d_b = 2 \text{ cm}$$

$$d_{max1} := 12 \cdot d_w = 12,24 \text{ cm}$$

$$e_{int} := 2 \text{ cm}$$

$$d_{max2} := 15 \text{ cm}$$

$$e_{ext} := 2 \text{ cm}$$

Distância min. entre furo - mesa

Distância máx. entre furo - mesa

$$b_1 := 1,35 \cdot d_b = 2,16 \text{ cm}$$

$$b_{1,adot} := 3 \text{ cm}$$

****A distância entre centro de furo e chapa, etc, não deve ser inferior a 1,35 db, para permitir o uso dos instrumentos de aperto.**

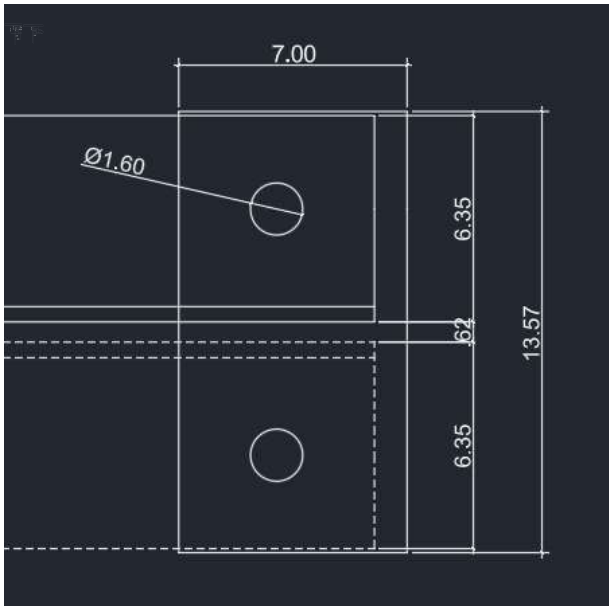
6.3.12 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

Tabela 16 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d_b		Distância mínima
pol.	mm	mm
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
$> 1 1/4$	≥ 38 mm	$1,25 d_b$

São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja atendida.
Para furos alargados e alongados, ver a Tabela 17.



Dimensionamento de parafusos - Cisalhamento NBR8800/2024 – item 6.3.3.2.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$a_b := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 2,0106 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} := \frac{0,45 \cdot a_b \cdot f_{up}}{\gamma_{a2}} = 55,6271 \text{ kN}$$

■ > ■

$$F_{v,Sd} := \frac{Q_{sd}}{2} = 0,985 \text{ kN}$$

ok !

Espessura da placa

$$f_{ychapa} := 345 \text{ MPa}$$

$$f_{uchapa} := 450 \text{ MPa}$$

$$t_{r,adot} := 6 \text{ mm} \quad \text{espessura}$$

Dimensionamento da pressão de contato em furos na chapa → NBR8800/2024 – item 6.3.3.3

Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto.

$$l_f := e_{ext} - \frac{d_n}{2} = 10,25 \text{ mm}$$

Menor entre,

$$F_{c,rd1} := \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{\gamma_{a2}} = 24,6 \text{ kN}$$

$$F_{c,rd2} := \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{r,adot} \cdot f_{uchapa}}{\gamma_{a2}} = 76,8 \text{ kN}$$

$$F_{c,Rd} := \min \left(\left[F_{c,rd1} \quad F_{c,rd2} \right] \right) = 24,6 \text{ kN}$$

$$\blacksquare > \blacksquare \quad Q_{sd} = 1,97 \text{ kN}$$

Dimensionamento do cisalhamento na chapa

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 1,97 \text{ kN}$$

$$l := 6 \text{ cm}$$

$$A_{gv} := t_{r,adot} \cdot l = 3,6 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} := A_{gv} - \left(t_{r,adot} \cdot d_n \right) = 2,43 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rd1} := \frac{0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_{ychapa}}{\gamma_{a1}} = 67,7455 \text{ kN}$$

$$F_{Rd2} := \frac{0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_{uchapa}}{\gamma_{a2}} = 48,6 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} := \min \left(\left[F_{Rd1} \quad F_{Rd2} \right] \right) = 48,6 \text{ kN}$$

$\blacksquare > \blacksquare$

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 1,97 \text{ kN}$$

ok !

Dimensionamento da compressão na chapa

$$F_{rd} := \frac{f_{ychapa} \cdot A_{gv}}{\gamma_{a1}} = 112,9091 \text{ kN}$$

$\blacksquare > \blacksquare$

$$F_{Sd} := Q_{sd} = 1,97 \text{ kN}$$

$$Le := 1,41 \text{ cm}$$

$$r := \frac{t_{r,adot}}{\sqrt{12}} = 0,1732 \text{ cm}$$

$$\frac{Le}{r} = 8,1406$$

$\blacksquare < \blacksquare$

25

Solda na chapa

$$f_w := 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

menor dimensão é 6,2mm

$$d_{wmin} := 3 \text{ mm}$$

$$dw_{max} := 6,2 \text{ mm}$$

$$dwcM := 4 \text{ mm}$$

$$cefM := 50 \text{ mm}$$

$$Aw := dwcM \cdot cefM = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$Frds := \frac{0,6 \cdot Aw \cdot fw}{Y_{a2}} = 4,3111 \frac{\text{m J}}{\text{cm}^2} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad F_{sd} := Q_{sd} = 1,97 \text{ kN}$$

resistência de 43kN