

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS RESISTENTES A SOLICITAÇÕES – ANÁLISE APLICADA EM GALPÃO METÁLICO****CONTRIBUTION TO THE STUDY OF BOLTED CONNECTIONS RESISTANT TO LOAD DEMANDS – APPLICATION ANALYSIS IN A METALLIC WAREHOUSE****CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE UNIONES ATORNILLADAS RESISTENTES A SOLICITACIONES – ANÁLISIS APLICADO EN UN GALPÓN METÁLICO**Leonardo Antonio Martins dos Santos<sup>1</sup>, João Francisco Otrente<sup>2</sup>, Gerson de Marco<sup>3</sup>

e6117005

<https://doi.org/10.47820/recima21.v6i11.7005>

PUBLICADO: 11/2025

**RESUMO**

O trabalho tem como objetivo estudar o comportamento e o dimensionamento de ligações parafusadas submetidas a diferentes solicitações, considerando a influência dos elementos que compõem a conexão, especialmente a rigidez da chapa de ligação. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi analisada a ligação viga-pilar de um galpão metálico, dimensionado conforme as normas brasileiras vigentes, utilizando-se os programas computacionais Ftool e VisualVentos para a determinação dos esforços solicitantes e verificações analíticas. Os resultados demonstraram que a distribuição de esforços entre os parafusos não ocorre de forma linear, havendo concentração de tensões em regiões específicas da ligação. Observou-se ainda que o aumento da espessura da chapa não necessariamente representa maior segurança estrutural, uma vez que a rigidez adicional tende a atrair esforços mais elevados, principalmente em sistemas hiperestáticos. Comparando-se às análises realizadas, verificou-se que o esforço de tração máximo nos parafusos aumentou de 16,01 kN para 40,70 kN quando considerada a influência da chapa, evidenciando sua relevância no comportamento global da ligação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ligações parafusadas. Rigidez da chapa. Viga-pilar. Galpão metálico. Dimensionamento estrutural.

**ABSTRACT**

*The work aims to study the behavior and design of bolted connections subjected to different load demands, considering the influence of the elements that compose the connection, especially the stiffness of the connection plate. For the development of the research, the beam-column connection of a steel warehouse was analyzed, designed according to current Brazilian standards, using the computational programs Ftool and VisualVentos to determine the acting forces and perform analytical verifications. The results showed that the distribution of forces among the bolts does not occur linearly, with stress concentration in specific regions of the connection. It was also observed that increasing the plate thickness does not necessarily represent greater structural safety, since the additional stiffness tends to attract higher forces, especially in hyperstatic systems. Comparing the analyses performed, it was verified that the maximum tensile force on the bolts increased from 16.01 kN to 40.70 kN when the influence of the plate was considered, highlighting its relevance in the global behavior of the connection.*

**KEYWORDS:** Bolted connections. Plate stiffness. Beam-column. Steel warehouse. Structural design.

<sup>1</sup> Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.<sup>2</sup> Orientador. Docente Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.<sup>3</sup> Coorientador. Docente Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.



## REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS RESISTENTES A SOLICITAÇÕES –  
ANÁLISE APLICADA EM GALPÃO METÁLICO  
Leonardo Antonio Martins dos Santos, João Francisco Otrente, Gerson de Marco

### RESUMEN

*El trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento y el dimensionamiento de uniones que atornilladas sometidas a diferentes solicitaciones, considerando la influencia de los elementos componen la conexión, especialmente la rigidez de la placa de unión. Para el desarrollo de la investigación, se analizó la unión viga-pilar de un galpón metálico, dimensionado conforme a las normas brasileñas vigentes, utilizando los programas computacionales Ftool y VisualVentos para la determinación de los esfuerzos solicitantes y las verificaciones analíticas. Los resultados demostraron que la distribución de esfuerzos entre los tornillos no ocurre de forma lineal, observándose una concentración de tensiones en regiones específicas de la unión. También se observó que el aumento del espesor de la placa no representa necesariamente una mayor seguridad estructural, ya que la rigidez adicional tiende a atraer esfuerzos más elevados, especialmente en sistemas hiperestáticos. Al comparar los análisis realizados, se verificó que el esfuerzo de tracción máximo en los tornillos aumentó de 16,01 kN a 40,70 kN cuando se consideró la influencia de la placa, evidenciando su relevancia en el comportamiento global de la unión.*

**PALABRAS CLAVE:** Uniones atornilladas. Rigidez de la placa. Viga-pilar. Galpón metálico. Dimensionamiento estructural.

### 1. INTRODUÇÃO

Os conectores são elementos de união que atuam por meio de furos executados nas chapas metálicas, são classificados principalmente em três tipos: rebites, parafusos comuns, parafusos de alta resistência. Além desses, as conexões mecânicas incluem também a soldagem, que constitui uma alternativa amplamente empregada na união de peças estruturais, oferecendo elevada rigidez e continuidade ao sistema estrutural. O autor também destaca que os conectores são elementos essenciais no comportamento de sistemas compostos por diferentes partes, atuando na função de garantir a transmissão dos esforços atuantes entre os componentes da estrutura (Pfeil, 2009).

Na engenharia estrutural da atualidade, as conexões mais utilizadas são as soldadas e as parafusadas. As ligações soldadas oferecem a vantagem de proporcionar continuidade total entre os elementos. Já as ligações parafusadas apresentam maior versatilidade durante o processo construtivo, facilitando a montagem e desmontagem, permitindo inspeções e manutenções mais viáveis ao longo da vida útil da estrutura.

Importante destacar que independentemente do método escolhido, as ligações devem atender aos critérios normativos estabelecidos, assegurando o cumprimento dos estados limites últimos que garantem a integridade da estrutura diante as solicitações máximas e dos estados limites de serviço, que proporcionam manter o conforto e a funcionalidade da edificação sob as condições usuais de uso. Dessa forma, o dimensionamento correto das conexões é fundamental para a segurança como um todo da estrutura, considerando os diferentes tipos de esforços que podem atuar, como tração, compressão, cisalhamento e momentos fletores.

Este trabalho tem o objetivo de estudar a potencialidade das ligações parafusadas resistentes a diversas solicitações combinadas, de modo a retratar o seu dimensionamento e



## REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS RESISTENTES A SOLICITAÇÕES –  
ANÁLISE APLICADA EM GALPÃO METÁLICO  
Leonardo Antonio Martins dos Santos, João Francisco Otrente, Gerson de Marco

verificação em concordância com as normativas vigentes. Para tal, foi explorado o cálculo de uma ligação parafusada de um galpão metálico, em que os esforços solicitantes foram obtidos via programa computacional Ftool e os demais cálculos via processos analíticos. Dessa forma, o trabalho contribui com situações de projeto que pouco são abordadas na literatura nacional.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso do aço na construção civil tem se consolidado como uma alternativa técnica e economicamente viável, sendo largamente empregado tanto como elemento complementar quanto como material principal em diferentes sistemas construtivos. A metodologia construtiva em aço garante maior liberdade no projeto de arquitetura, flexibilidade, compatibilidade com outros materiais, menor prazo de execução, racionalização de materiais e mão de obra, alívio de carga nas fundações, garantia de qualidade e maior assertividade construtiva.

Segundo Sales (1994), dimensionar um elemento ou uma estrutura, pode ser entendido como a escolha correta das seções que vão compô-la, assegurando o desempenho estrutural e a solução mais econômica possível e a economia está ligada ao menor consumo de material e de mão-de-obra, que dependem das condições de fabricação, transporte e de montagem de cada obra.

A seguir, serão apresentados alguns conceitos sobre os elementos que compõem um sistema metálico e a dinâmica de funcionamento dos elementos de ligações. Assim como os principais aspectos normativos para a sua escolha e dimensionamento.

### 2.1. Estrutura Metálica – Componentes

Geschwindner (2008) define os componentes estruturais em função dos esforços a que estão submetidos. Para este autor, existem cinco principais tipos de componentes estruturais: elementos de tensão, elementos de compressão, elementos de flexão, elementos de força combinada e as conexões. Os elementos de tensão são normalmente encontrados como contraventamentos e componentes do sistema de treliças que suportam apenas as forças de tração ou extensão. Os elementos de compressão são as colunas, escoras ou pilares, são os elementos verticais ou nos contraventamentos e sistemas treliçados as peças que estão sendo comprimidas ou esmagadas. Os elementos de flexão são conhecidos como vigas, vigas mestras, travessas, terças e vergas. Cada um destes elementos tem sua própria aplicação estrutural, mas normalmente vão suportar os momentos de flexão e as forças de cisalhamento como cargas primárias e as forças axiais e de torção como cargas secundárias. Os elementos de força combinada são as peças submetidas à flexão e compressão axial. No entanto, com a função de promover a união dos componentes estruturais e garantir a continuidade e a unicidade da



## REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS RESISTENTES A SOLICITAÇÕES –  
ANÁLISE APLICADA EM GALPÃO METÁLICO  
Leonardo Antonio Martins dos Santos, João Francisco Otrante, Gerson de Marco

estrutura e a consequente transmissão das cargas e esforços solicitantes são utilizados os elementos de ligação ou conexões.

### 2.2. Principais tipos de ligação em estruturas metálicas

Ligações parafusadas: De acordo com a Tabela A.3 da NBR 8800:2024, são fornecidos os valores mínimos de resistência para fins estruturais, usualmente conhecidos como parafusos comuns e parafusos de alta resistência.

IBS/CBCA (2011) define que nas ligações com parafusos comuns, os esforços de tração são transmitidos através do corpo dos parafusos, enquanto os esforços de cisalhamento, devido ao deslizamento entre as chapas, são transmitidos por cisalhamento do corpo do parafuso e o contato de sua superfície lateral com a face do furo. Já os parafusos de alta resistência quanto maior torque, maior a pressão de contato resultada, maior a força de atrito mobilizada e, consequentemente, maior a resistência ao deslizamento e, os parafusos de alta resistência necessitam de cuidados especiais em relação a arruelas e acabamento da superfície e a especificação de torque de montagem, cuidados estes que são dispensados quando são usados parafusos comuns.

Ligações soldadas: Para Sales (1994), soldar significa “ligar” componentes metálicos através da fusão de eletrodos também metálicos. Devido à temperatura imposta por um arco voltaico, processa-se também a fusão parcial do metal base, ou seja, dos componentes a serem ligados. Após o resfriamento, o metal base e o metal do eletrodo passam a constituir um corpo único. A soldabilidade de um aço indica a facilidade da execução de uma junta por meio do processo de soldagem sem defeitos e livre de fissuras ou falhas. Alguns aços estruturais são melhores para a soldagem do que outros e os procedimentos de soldagem devem levar em conta a composição química do metal base (material a ser soldado).

### 2.3. Estados Limites

Segundo IBS/CBCA (2011), o estado limite ocorre sempre que a estrutura deixa de satisfazer um de seus objetivos, ou seja, garantia de segurança estrutural, evitar vibrações, deslocamentos, entre outros. Esses estados são classificados em: Estados limites últimos (ELU) e Estados limites de utilização (ELS). Os estados limites últimos estão associados à ocorrência de cargas excessivas e consequente colapso da estrutura devido, por exemplo, à perda de equilíbrio como corpo rígido, plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção, ruptura de uma ligação ou seção, flambagem em regime elástico ou não, ou ainda à ruptura por fadiga. Já os estados limites de utilização (associados a cargas em serviço) incluem: deformações excessivas e vibrações excessivas. Com base no propósito deste estudo, será apresentado a seguir o

dimensionamento de um galpão, de modo que, a partir dos esforços solicitantes obtidos, seja possível calcular e analisar a ligação parafusada entre viga e pilar.

### 3. ESTUDO DA PONTENCIALIDADE DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS RESISTENTES A DIVERSAS SOLICITAÇÕES COMBINADAS

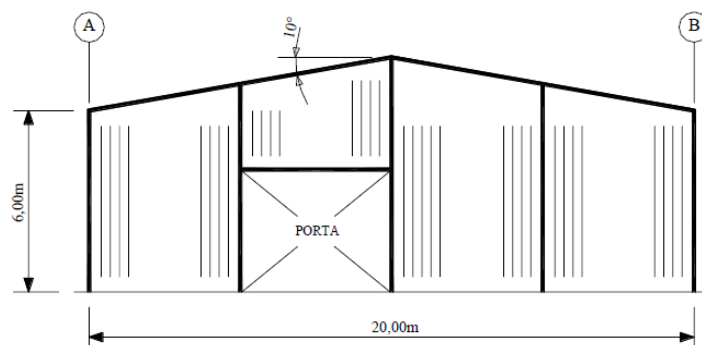
#### 3.1. Características de Projeto

A estrutura analisada (Figura 1, 2 e 3) consiste em um galpão metálico industrial modelado pelo *software* Inventor, com o objetivo de realizar o dimensionamento e aplicar os critérios apresentados anteriormente.

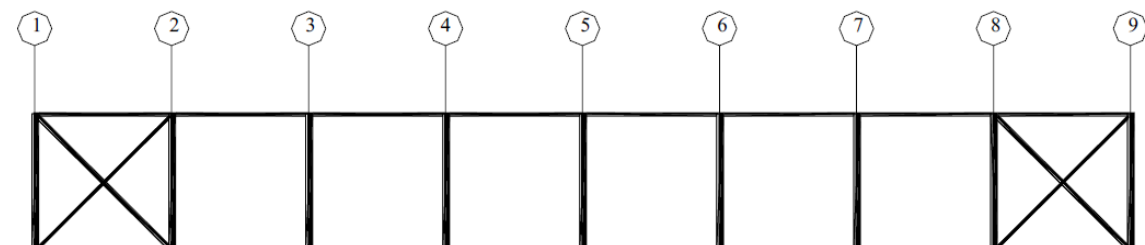
- Telhado em duas águas com inclinação de  $10^\circ$ ;
- Vão transversal: 20m (distância entre eixos de colunas);
- Comprimento do galpão: 48m (distância entre eixos de colunas);
- Pé-direito: 6m;
- Altura do galpão (na cumeeira): 7,76m;
- Espaçamento entre pórticos: 6m;
- Cobertura e tapamentos (frontais e laterais): em chapa zincada trapezoidal;
- Portas: o edifício possui duas portas, uma em cada fachada frontal com 5m de largura por 4m de altura;

#### 3.2. Sistema Estrutural

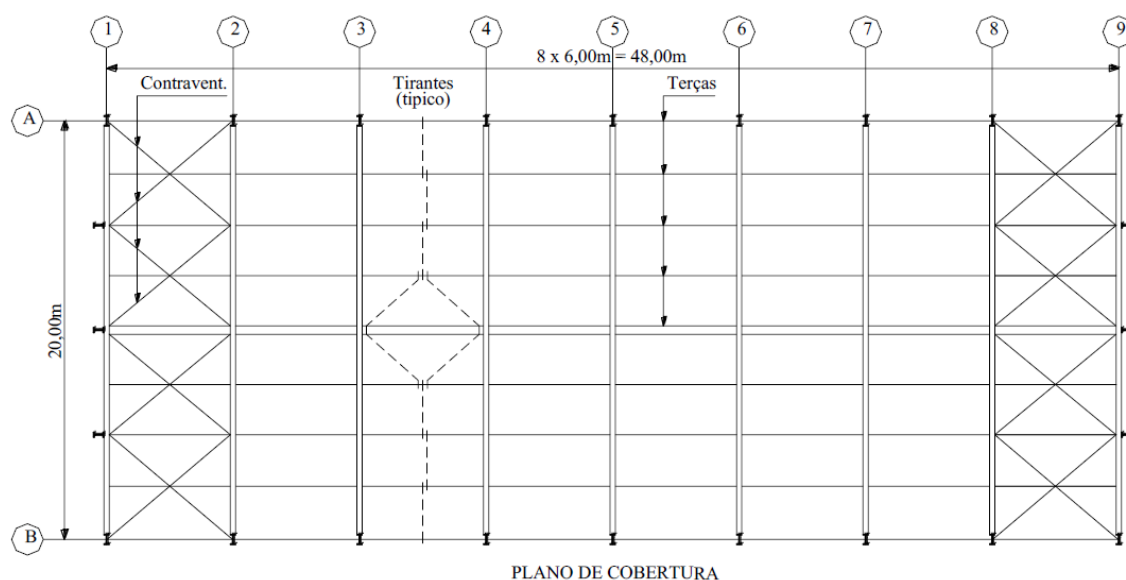
- Transversal: Formado por pórticos bi-rotulados (colunas com as bases rotuladas nas fundações), com vigas e colunas em alma cheia.
- Longitudinal: Pela colocação de contraventamentos verticais e horizontais.



**Figura 1.** Seção transversal – Fachada frontal  
Fonte: Adaptado de Silva



**Figura 2. Contraventamento vertical**  
Fonte: Adaptado de Silva



**Figura 3. Plano de cobertura**  
Fonte: Adaptado de Silva

### 3.3. Materiais

- Aço estrutural ASTM A36 para chapas e perfis.
- Aço tipo SAE 1020 para chumbadores e tirantes.
- Parafuso comum ASTM A307 para terças e longarinas.
- Parafuso de alta resistência ASTM A325 para ligações principais.
- Eletrodos segundo AWS (classe 60 ou 70).

### 3.4. Normas adotadas

- NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações.
- NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.



• NBR 8800:2024 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Projeto de revisão da norma.

• NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

### 3.5. Ações Atuantes

#### Carga permanente (CP) e Carga accidental (CA)

A carga permanente será estimada para cada parte da estrutura, e a sobrecarga na cobertura: igual a  $0,25 \text{ kN/m}^2$  (em projeção horizontal), de acordo com a NBR 8800:2024.

#### Carga do vento (CV)

De acordo com a NBR 6123:1980, o cálculo será feito utilizando o programa de computador Visual Ventos:

- Velocidade básica do vento ( $V_0$ ): Cidade adotada Ribeirão Preto-SP  $\rightarrow V_0 = 45 \text{ m/s}$
- Velocidade característica do vento:  $V_k = V_0 \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3 \rightarrow V_k = 34,50 \text{ m/s}$   
(1)

Fator topográfico (S1): Terreno plano ou fracamente acidentado  $\rightarrow S1 = 1,00$

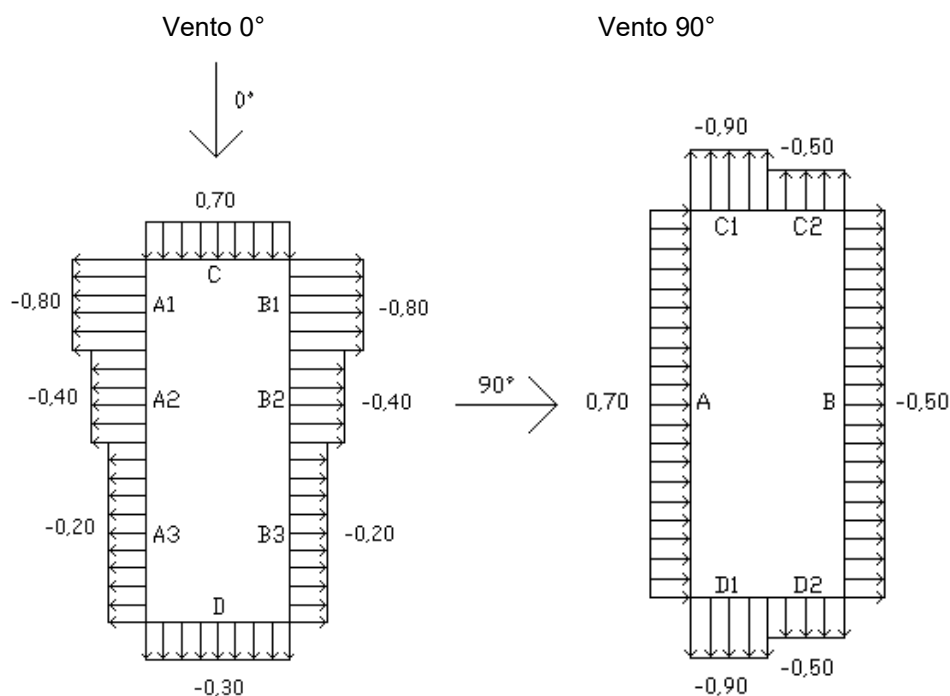
Fator de Rugosidade (S2): Categoria IV; Classe B  $\rightarrow S2 = 0,81$

Fator Estático (S3): Grupo 3  $\rightarrow S3 = 0,95$

Pressão Dinâmica:  $q = 0,613 \cdot (V_k)^2 \rightarrow q = 0,613 \cdot 34,50^2 = 0,73 \text{ kN/m}^2$  (2)

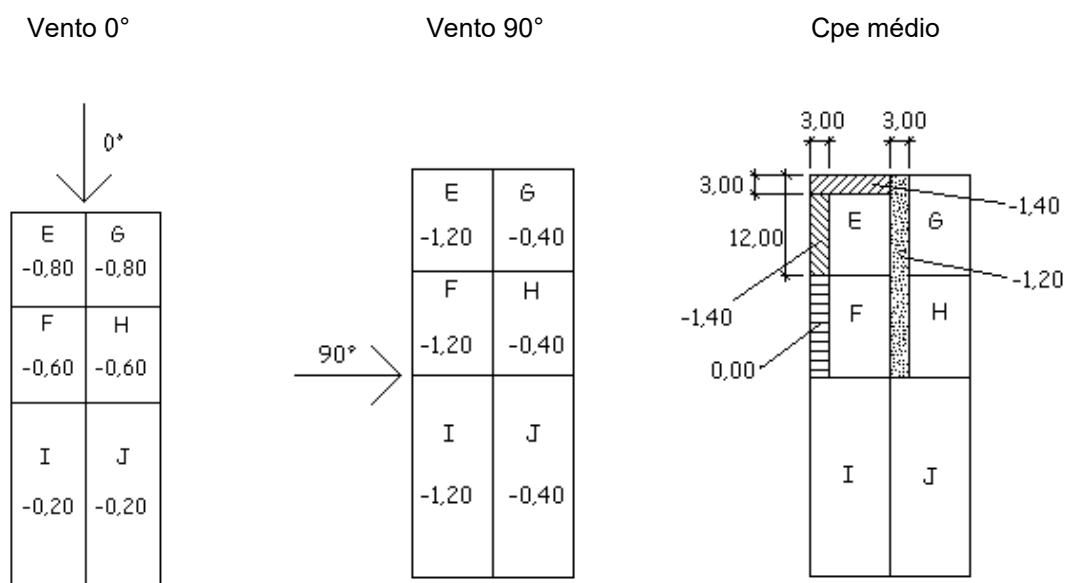
- Coeficientes de pressão externos ( $C_{pe}$ ), conforme Figuras 4 e 5.





**Figura 4.** Coeficiente de pressão externos para as paredes  
Fonte: Autor, 2025

Cpe médio = -1,00



**Figura 5.** Coeficiente de pressão externos para o telhado  
Fonte: Autor, 2025

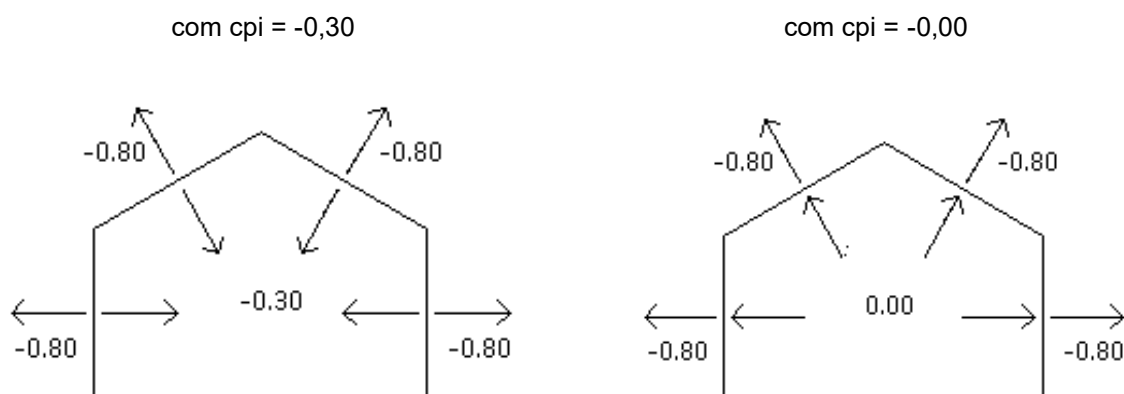
- Coeficientes de pressão internos (Cpi), conforme Figuras 6 e 7.

Adotando quatro faces igualmente permeáveis:



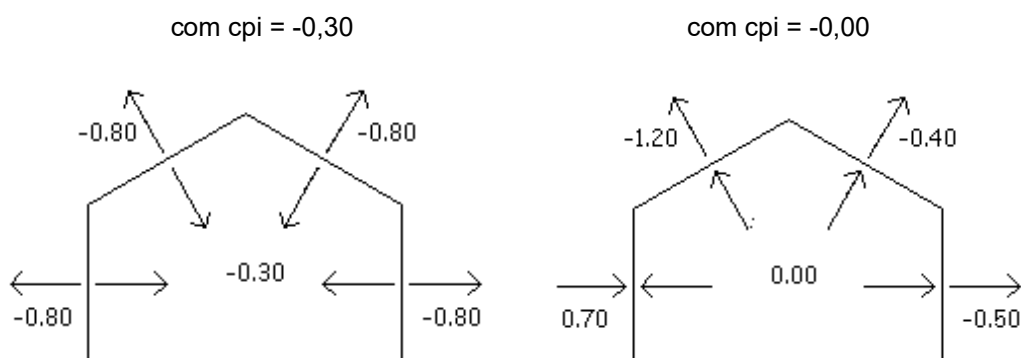
$C_{pi} = -0,30$  ou  $C_{pi} = 0,00$

Vento  $0^\circ$



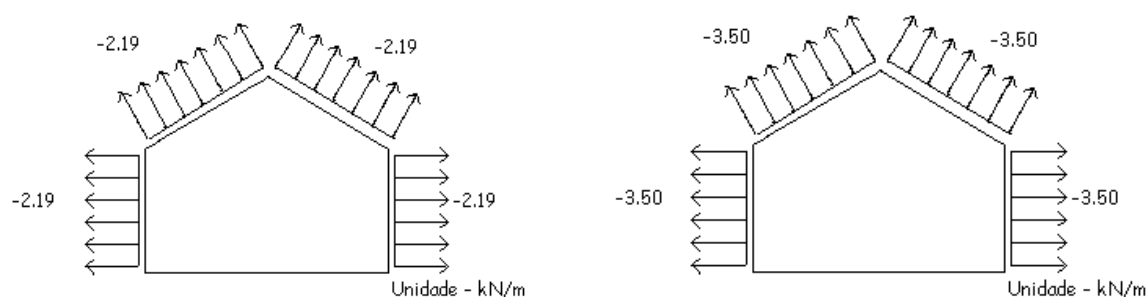
**Figura 6.** Coeficientes de pressão externos e internos – Combinações vento  $0^\circ$   
Fonte: Autor, 2025

Vento  $90^\circ$



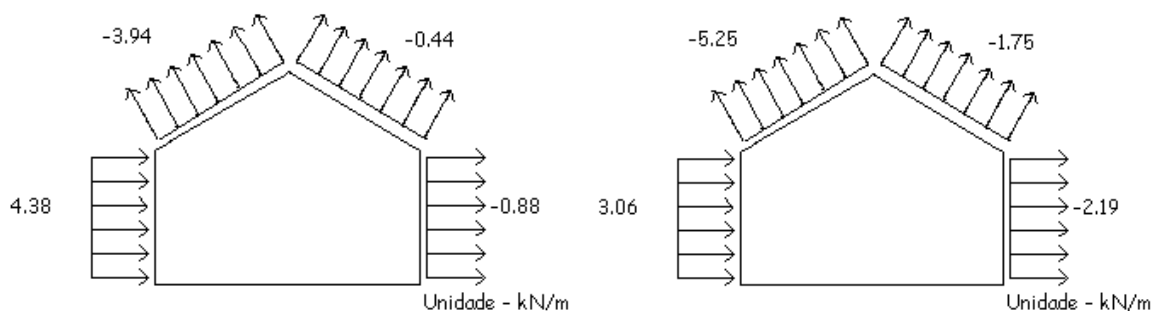
**Figura 7.** Coeficientes de pressão externos e internos – Combinações vento  $90^\circ$   
Fonte: Autor, 2025

- Carregamento resultantes, conforme Figuras 8, 9 e 10 Vento  $0^\circ$



**Figura 8.** Carregamento resultantes vento  $0^\circ$   
Fonte: Autor, 2025

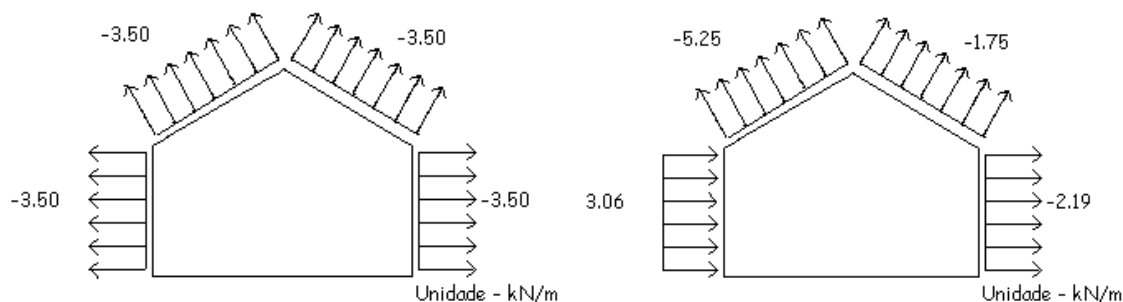
Vento 90°


**Figura 9.** Carregamento resultantes vento 90°

Fonte: Autor, 2025

Vento I

Vento II


**Figura 10.** Carregamento críticos vento 0° e 90°

Fonte: Autor, 2025

### 3.6. Carregamento do pórtico

#### Carregamento relativo à Carga Permanente (CP)

- Fechamento lateral e cobertura

Será dotado para o peso próprio da telha de fechamento lateral e cobertura  $50 \text{ N/m}^2$ , para peso próprio longarinas + tirantes do fechamento lateral  $50 \text{ N/m}^2$  e para peso próprio longarinas + tirantes da cobertura  $70 \text{ N/m}^2$ .

- Perfil coluna

No galpão sendo considerado sem ponte rolante, a altura (d) da seção transversal da coluna varia de  $1/20$  a  $1/30$  da altura (H) da coluna. Adotado  $d = H/20$ .

Logo,  $d = 600 \text{ cm} / 20 = 30 \text{ cm}$ ;

O perfil VS 300 x 33 apresenta-se como o mais próximo ao valor obtido no pré-dimensionamento. Entretanto, após a verificação, constatou-se que ele não atende às solicitações

de cálculo. Assim, será adotado o perfil VS 450 x 49 (49,0 kgf/m), cujo dimensionamento será apresentado no item 3.8.

- Perfil Viga

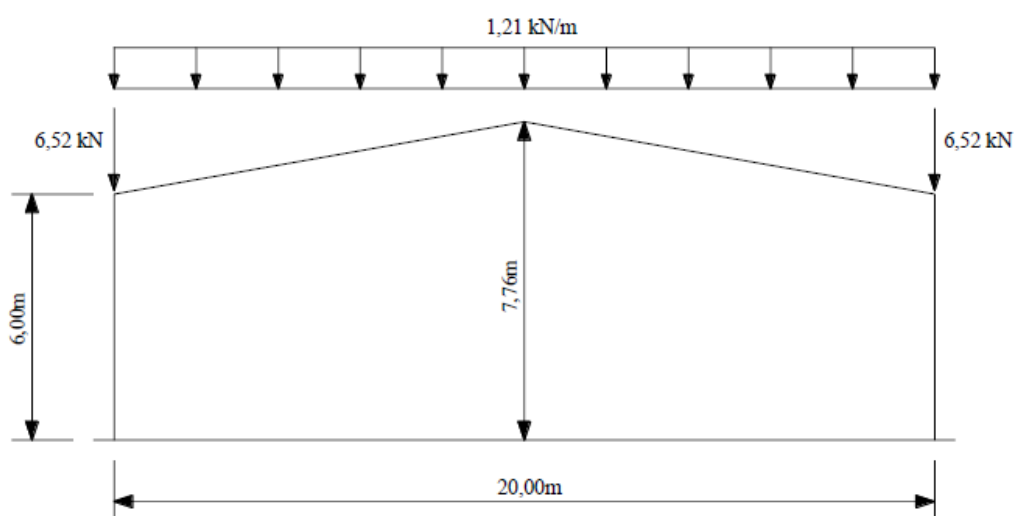
No galpão sendo considerado sem ponte rolante, a altura (d) da seção transversal da viga varia de 1/50 a 1/70 do vão transversal (L). No entanto, será adotado o mesmo perfil da coluna para viga VS 450 x 33 (peso = 49,0 kgf/m).

- Carregamento resultante

O peso próprio do fechamento lateral e da coluna, serão considerados como carga concentrada no topo da coluna. Já o peso próprio da cobertura e da viga, serão considerados como cargas distribuídas ao longo da viga, conforme apresentado na Figura 11. Resultando em:

$$\text{Carga concentrada no topo da coluna} = (0,10 \cdot 6 \cdot 6) + (0,487 \cdot 6) = 6,52 \text{ kN}$$

$$\text{Carga distribuída na viga} = (0,12 \cdot 6) + (0,487) = 1,21 \text{ kN/m}$$

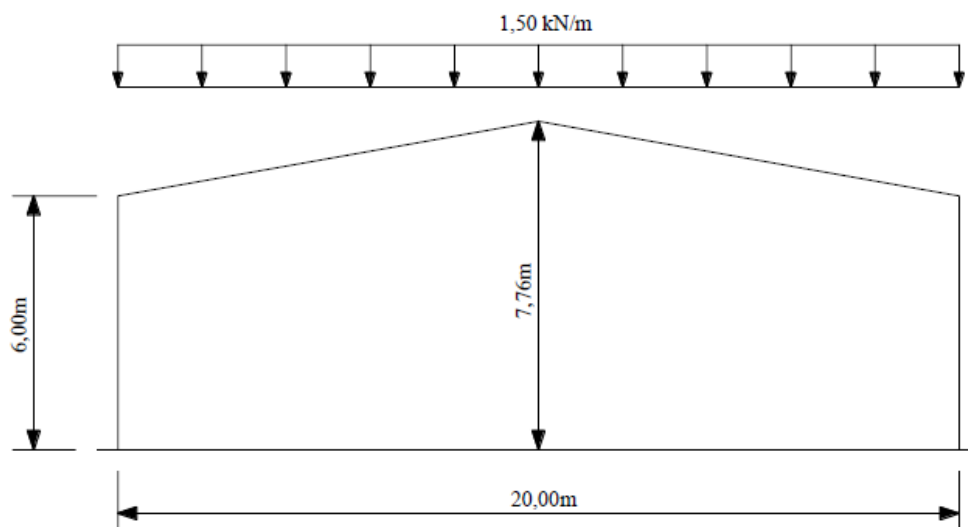


**Figura 11.** Peso próprio Autor, 2025  
Fonte: Autor, 2025

### Carregamento relativo à Carga Acidental (CA)

Será considerada como carga distribuída ao longo da viga, conforme apresentado Figura na 12.

$$\text{Carga distribuída na viga} = (0,25 \cdot 6) = 1,5 \text{ kN}$$

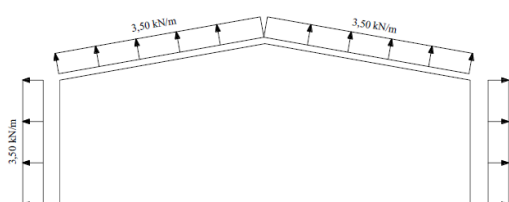


**Figura 12.** Sobrecarga  
Fonte: Autor, 2025

### Carregamento relativo ao Vento (CV)

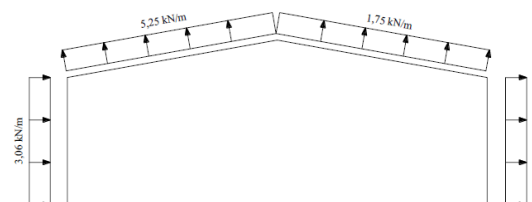
Este carregamento foi obtido anteriormente; serão considerados dois carregamentos críticos, conforme as Figuras 13 e 14.

Hipótese I – vento I (Vento 0°)



**Figura 13.** Carregamento crítico  
Fonte: Autor, 2025

Hipótese II – vento II (Vento 90°)

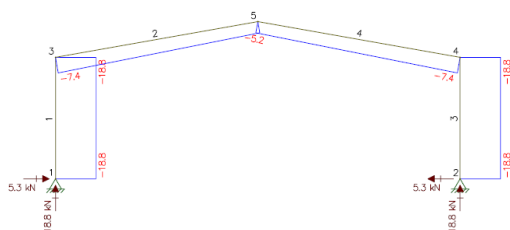


**Figura 14.** Carregamento crítico  
Fonte: Autor, 2025

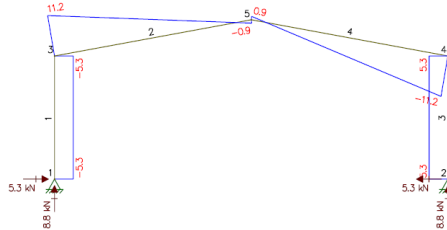
### 3.7. Cálculo dos esforços solicitantes no pórtico

O cálculo dos esforços solicitantes nas colunas e vigas do pórtico será feito utilizando o programa computacional Ftool – *software* livre desenvolvido na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). A seguir apresentam-se as reações de apoio e os diagramas de esforços solicitantes fornecidos por este programa, conforme ilustrado nas Figuras 15 a 26, referente aos quatro carregamentos indicados no item anterior (carga permanente, carga accidental, vento I, vento II).

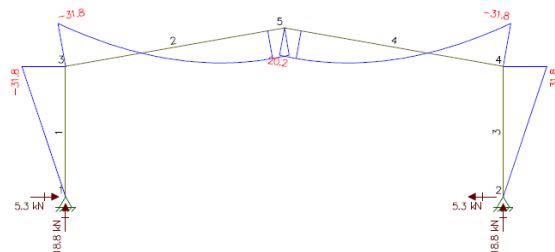
### Esforços solicitantes relativos à Carga Permanente (CP)



**Figura 15.** Diagrama de força normal (kN)  
Fonte: Autor, 2025

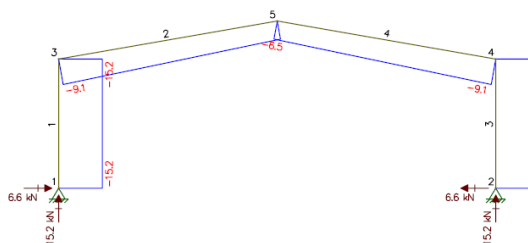


**Figura 16.** Diagrama de força cortante (kN)  
Fonte: Autor, 2025

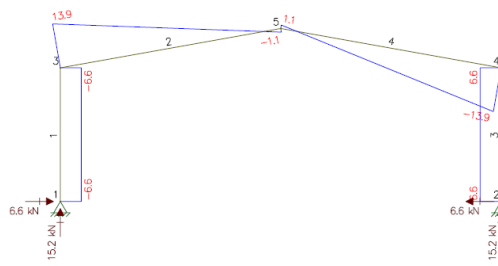


**Figura 17.** Diagrama de momento fletor (kN.m)  
Fonte: Autor, 2025

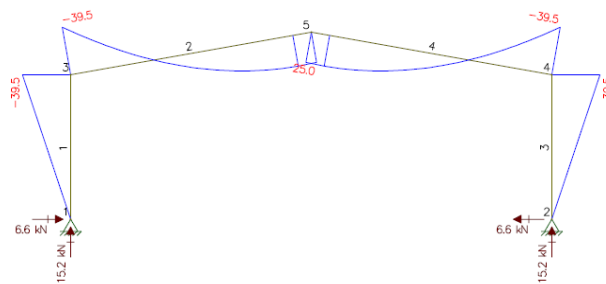
### ESFORÇOS SOLICITANTES RELATIVOS À CARGA ACIDENTAL (CA)



**Figura 18.** Diagrama de força normal (kN)  
Fonte: Autor, 2025

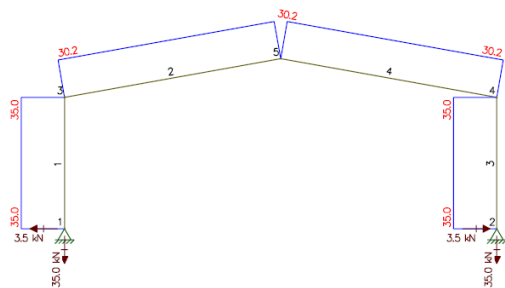


**Figura 19.** Diagrama de força cortante (kN)  
Fonte: Autor, 2025

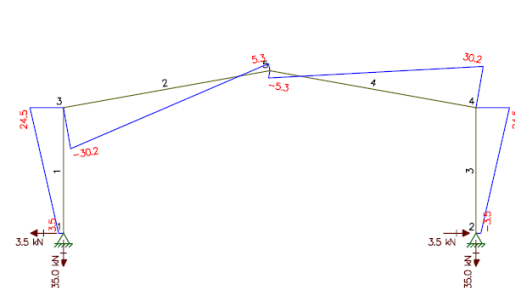


**Figura 20.** Diagrama de momento fletor (kN.m)  
Fonte: Autor, 2025

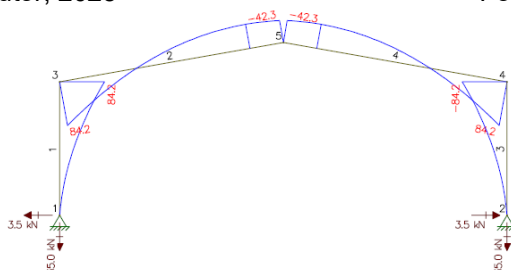
### Esforços solicitantes relativos ao Vento – Hipótese I



**Figura 21.** Diagrama de força normal (kN)  
Fonte: Autor, 2025

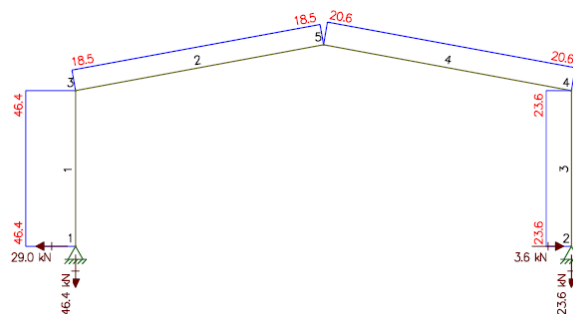


**Figura 22.** Diagrama de força cortante (kN)  
Fonte: Autor, 2025

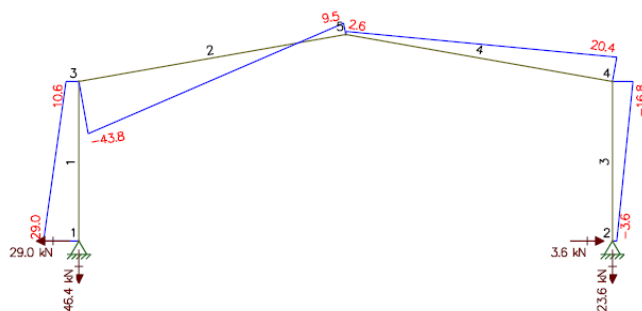


**Figura 23.** Diagrama de momento fletor (kN.m)  
Fonte: Autor, 2025

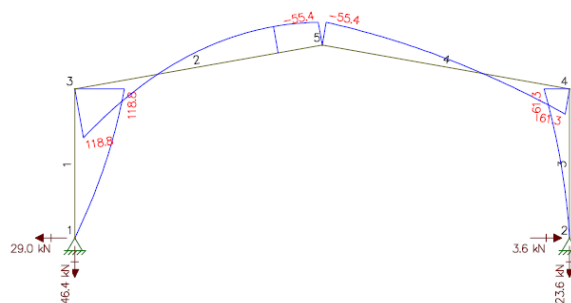
### Esforços solicitantes relativos ao Vento – hipótese II



**Figura 24.** Diagrama de força normal (kN)  
Fonte: Autor, 2025



**Figura 25.** Diagrama de força cortante (kN)  
Fonte: Autor, 2025



**Figura 26.** Diagrama de momento fletor (kN.m)  
Fonte: Autor, 2025

### Valores de Cálculo dos Esforços Solicitantes

Os valores de cálculo dos esforços solicitantes nas barras do pórtico serão obtidos considerando as seguintes combinações de ações:

• Combinação 1:  $\gamma_{\delta} \cdot CP + \gamma_{q1} \cdot CA - (1,25 \cdot CP) + (1,50 \cdot CA)$  (3)

• Combinação 2:  $\gamma_{\delta} \cdot CP + \gamma_{q2} \cdot CA - (1,00 \cdot CP) + (1,40 \cdot CVI)$  (4)

• Combinação 3:  $\gamma_{\delta} \cdot CP + \gamma_{q3} \cdot CA - (1,00 \cdot CP) + (1,40 \cdot CVII)$  (5)

Os resultados dessas combinações estão indicados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Combinações de ações (forças em Kn; momentos em kN.m)

Barra	Nó	Esforço Solicitantes	CP	CA	CVI	CVII	1,25CP + 1,50CA	1,00CP + 1,40CVI	1,00CP + 1,40CVII
1 Coluna	1	N	-18,8	-15,2	35,0	46,4	-46,3	30,2	46,2
		V	-5,3	6,6	3,5	29	3,3	-0,4	35
		M	zero	zero	zero	zero	zero	zero	zero
	3	N	-18,8	-15,2	35,0	46,4	-46,3	30,2	46,2
		V	-5,3	6,6	24,5	10,6	3,3	29,0	9,5
		M	-31,8	-39,5	84,2	118,8	-99	86,1	134,5
2 Viga	3	N	-7,4	-9,1	30,2	18,5	-22,9	34,9	18,5
		V	11,2	13,9	-30,2	-43,8	34,9	-31,1	-50,1
		M	-31,8	-39,5	84,2	118,8	-99	86,1	134,5
	5	N	-5,2	-6,5	30,2	18,5	-16,3	37,1	20,7
		V	-0,9	-1,1	5,3	9,5	-2,8	6,5	12,4
		M	20,2	25,0	-42,3	-55,4	62,8	-39,0	-57,4
3 Coluna	2	N	-18,8	-15,2	35,00	23,6	-46,3	30,2	14,2
		V	5,3	6,6	-3,5	-3,6	16,5	0,4	0,3
		M	zero	zero	zero	zero	zero	zero	zero





4 Viga	4	N	-18,8	-15,2	35,0	23,6	-46,3	30,2	14,2
		V	5,3	6,6	-24,5	-16,8	16,5	-29,0	-18,2
		M	31,8	39,5	-84,2	-61,3	99	-86,1	-54,0
	4	N	-7,4	-9,1	30,2	20,6	-22,9	34,9	21,4
		V	-11,2	-13,9	30,2	20,4	-34,9	31,1	17,4
		M	-31,8	-39,5	84,2	61,3	-99	86,1	54,0
	5	N	-5,2	-6,5	30,2	20,6	-16,3	37,1	23,6
		V	0,9	1,1	-5,3	2,6	2,8	-6,5	4,5
		M	20,2	25,0	-42,3	-55,4	62,8	-39,0	-57,4

Fonte: Autor, 2025

- Esforços solicitantes de cálculo para as colunas do pórtico (ver tabela 1):

Hipótese 1:  $N_d = -46,3 \text{ kN (Compressão)}$ ;  $V_d = 16,5 \text{ kN}$ ;  $M_d = 99,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ Hipótese 2:  $N_d = 46,2 \text{ kN (Tração)}$ ;  $V_d = 9,5 \text{ kN}$ ;  $M_d = 134,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 

- Esforços solicitantes de cálculo para as vigas do pórtico (ver tabela 1):

Hipótese 1:  $N_d = -22,9 \text{ kN (Compressão)}$ ;  $V_d = 34,9 \text{ kN}$ ;  $M_d = -99,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ Hipótese 2:  $N_d = 18,5 \text{ kN (Tração)}$ ;  $V_d = -50,1 \text{ kN}$ ;  $M_d = 134,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 

### 3.8. Dimensionamento das barras do pórtico

O dimensionamento das colunas e vigas do pórtico será feito utilizando o programa computacional VisualMetal – *software* livre desenvolvido na Universidade de Passo Fundo (UPF).

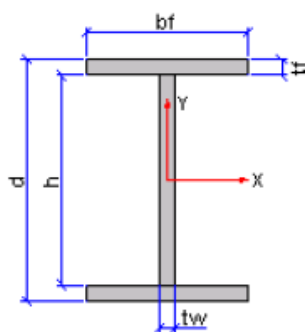
Dimensionamento das colunas

Hipótese 1:  $N_d = -46,3 \text{ kN (Compressão)}$ ;  $V_d = 16,5 \text{ kN}$ ;  $M_d = 99,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 

- Propriedades do aço

Aço estrutural ASTM A36;  $F_y = 25,00 \text{ kN/cm}^2$ ;  $F_u = 40,00 \text{ kN/cm}^2$ ;  $F_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$ ;  $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$ ;  $G = 7892,5 \text{ kN/cm}^2$ .

- Propriedades geométricas do perfil, conforme apresentado na Figura 27.



**Figura 27.** Perfil VS 400x49

Fonte: Autor, 2025



bf = 200mm; tf = 9,5mm; tw = 6,3mm; d = 400mm; h = 381mm; Peso = 48,7kgf/m

Ag = 62,00 cm<sup>2</sup>; Ix = 17393,00 cm<sup>4</sup>; Iy = 1267,46 cm<sup>4</sup>; It = 14,69 cm<sup>4</sup>; rx = 16,75 cm; ry = 4,52 cm; Wx = 869,65 cm<sup>3</sup>; Wy = 126,75 cm<sup>3</sup>; Zx = 970,58 cm<sup>3</sup>; Zy = 193,78 cm<sup>3</sup>

- Comprimento de flambagem

No plano do pórtico, a coluna é rotulada na base e engastada na viga do pórtico (Kx = 2):

Lflx = 1200 cm; Lfly = 600 cm; Lb = 600 cm.

- Esforços solicitantes de cálculo

Nd = -46,30 kN; Vd = 16,50 kN; Mdx = 9900,00 kN · cm; Mdy = 00,00 kN · cm.

- Verificação da resistência à força normal

Esbeltez do elemento:

$$\delta_x = \frac{L_{flx}}{r_x} = \frac{1200,00}{16,75} = 71,65 \quad (6)$$

$$\delta_x = 71,65 < 200 \rightarrow ok!$$

$$\delta_y = \frac{L_{fly}}{r_y} = \frac{600,00}{4,52} = 132,71 \quad (7)$$

$$\delta_y = 132,71 < 200 \rightarrow ok!$$

Resistência de cálculo à compressão (Rd):

$$R_d = \varphi_c \cdot \rho_o \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 0,36 \cdot 0,91 \cdot 62,00 \cdot 25,00 \quad (8)$$

$$R_d = -451,23 \text{ kN} \rightarrow R_d > N_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à força cortante

Resistência de cálculo à força cortante (Rd):

$$R_d = \varphi_c \cdot V_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 330,04 \quad (9)$$

$$R_d = 297,04 \text{ kN} \rightarrow R_d > V_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência ao momento fletor (FLA, FLM, FLT) – flexão em x

Resistência nominal ao momento fletor (Mn):

$$FLA: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm}; FLM: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm};$$

$$FLT: M_n = 15154,90 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se para Mn o menor valor de FLA, FLM ou FLT  $\rightarrow M_n = 15154,90 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Resistência de cálculo ao momento fletor (Rd):

$$R_d = \varphi_c \cdot M_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 15154,9 \quad (10)$$

$$R_d = 13639,40 \text{ kN} \cdot \text{cm} \rightarrow R_d > M_{dx} \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à flexão composta (compressão + flexão)

Resistência de cálculo, forças axiais de flambagem elástica, fatores de equivalência:

$$R_d(N_d) = -451,23 \text{ kN} ; R_d(M_{dx}) = 13,639,40 \text{ kN} \cdot \text{cm} ; N_{ex} = 2696,21 \text{ kN} ;$$

$$N_{ey} = 785,91 \text{ kN} ; C_{mx} = 1 ; C_{my} = 1$$

Interação entre força normal e momento fletor:

$$\frac{N_d}{R_d(N_d)} + \frac{C_{mx} \cdot M_{dx}}{\frac{1 - N_d}{0,73 \cdot N_{ex}}} \cdot R_d(M_{dx}) + \left( \frac{C_{mx} \cdot M_{dy}}{\frac{1 - N_d}{0,73 \cdot N_{ey}}} \right) \cdot R_d(M_{dy}) < 1 \quad (11)$$

$$\frac{-46,30}{-451,23} + \frac{1,00 \cdot 9900,00}{\frac{1 - 6,30}{0,73 \cdot 2696,21}} \cdot 13639,40 + \left( \frac{1,00 \cdot 0,00}{\frac{1 - 46,30}{0,73 \cdot 785,91}} \right) \cdot 0,00 =$$

$$0,85 < 1 \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta ao efeito combinado dos esforços solicitantes.}$$

Hipótese 2:  $N_d = 46,2 \text{ kN (Tração)}$ ;  $V_d = 9,5 \text{ kN}$ ;  $M_d = 134,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$

- Esforços solicitantes de cálculo

$$N_d = 46,20 \text{ kN} ; V_d = 9,50 \text{ kN} ; M_{dx} = 134,50 \text{ kN} \cdot \text{cm} ; M_{dy} = 0,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

- Verificação da resistência à força normal

Estado limite de escoamento da seção bruta:

$$R_d = \phi_t \cdot A_g \cdot f_y \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 62,00 \cdot 25,00 \quad (12)$$

$$R_d = 1395,07 \text{ kN}$$

Estado limite de ruptura da seção líquida:

$$R_d = \phi_t \cdot A_g \cdot f_u \rightarrow R_d = 0,75 \cdot 62,00 \cdot 40,00 \quad (13)$$

$$R_d = 1860,06 \text{ kN}$$

Resistência de cálculo à tração, adota-se para  $R_d$  o menor valor das duas verificações anteriores.

$$R_d = 1395,07 \text{ kN} \rightarrow R_d > N_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à força cortante

Resistência de cálculo à força cortante ( $R_d$ ):

$$R_d = \phi_c \cdot V_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 330,04 \quad (9)$$

$$R_d = 297,04 \text{ kN} \rightarrow R_d > V_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência ao momento fletor (FLA, FLM, FLT) – flexão em x

Resistência nominal ao momento fletor ( $M_n$ ):



$$FLA: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm}; FLM: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm};$$

$$FLT: M_n = 15154,90 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se para  $M_n$  o menor valor de FLA, FLM ou FLT  $\rightarrow M_n = 15154,90 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Resistência de cálculo ao momento fletor ( $R_d$ ):

$$R_d = \varphi_b \cdot M_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 15154,90 \quad (10)$$

$$R_d = 13639,40 \text{ kN} \cdot \text{cm} \rightarrow R_d > M_{dx} \rightarrow \text{Ok! Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à flexão composta (tração + flexão)

Resistência de cálculo:

$$R_d(N_d) = 1395,07 \text{ kN}; R_d(M_{dx}) = 13639,40 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Interação entre força normal e momento fletor:

$$\frac{N_d}{R_d(N_d)} + \frac{M_{dx}}{R_d(M_{dx})} + \frac{M_{dy}}{R_d(M_{dy})} < 1 \quad (14)$$

$$\frac{46,20}{1395,07} + \frac{13450,00}{13639,40} + \frac{0,00}{0,00} =$$

$$1,02 < 1 \rightarrow (\text{Variação mínima}) \text{Ok! Perfil suporta ao efeito combinado dos esforços}$$

solicitantes.

Portanto, também para esta hipótese, todas as verificações são satisfeitas. Assim, perfil adotado para as colunas, VS 400 x 49, atende.

Dimensionamento das vigas

$$\text{Hipótese 1: } N_d = -22,9 \text{ kN (Compressão); } V_d = 34,9 \text{ kN; } M_d = -99,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Comprimento de flambagem

No plano do pórtico, admite-se que o comprimento de flambagem da viga é igual ao seu próprio comprimento  $L_{flx}$  é 1016cm e no plano longitudinal, será considerado metade desse valor. Admite-se que uma escora intermediária ou uma linha de terças reforçadas irá contraventar a viga no meio do seu vão. Assim:

$$L_{fly} = 508 \text{ cm; } L_b 508 \text{ cm}$$

- Esforços solicitantes de cálculo

$$N_d = -22,90 \text{ kN; } V_d = 34,90 \text{ kN; } M_{dx} = 9900,00 \text{ kN} \cdot \text{cm; } M_{dy} = 00,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

- Verificação da resistência à força normal

Esbelteza do elemento:

$$\delta_x = \frac{L_{flx}}{r_x} = \frac{1016,00}{16,75} = 60,66 \quad (6)$$



$$\delta_x = 60,66 < 200 \rightarrow ok!$$

$$\delta_y = \frac{L_{fly}}{r_y} = \frac{508,00}{4,52} = 112,36 \quad (7)$$

$$\delta_y = 112,36 < 200 \rightarrow ok!$$

Resistência de cálculo à compressão ( $R_d$ ):

$$R_d = \varphi_c \cdot r_o \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y \quad (8)$$

$$R_d = 0,90 \cdot 0,45 \cdot 0,91 \cdot 62,00 \cdot 25,00$$

$$R_d = -567,05 \text{ kN} \rightarrow R_d > N_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à força cortante

Resistência de cálculo à força cortante ( $R_d$ ):

$$R_d = \varphi_c \cdot V_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 330,04 \quad (9)$$

$$R_d = 297,04 \text{ kN} \rightarrow R_d > V_d \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência ao momento fletor (FLA, FLM, FLT) – flexão em x

Resistência nominal ao momento fletor ( $M_n$ ):

$$FLA: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm}; FLM: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm};$$

$$FLT: M_n = 17399,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se para  $M_n$  o menor valor de FLA, FLM ou FLT  $\rightarrow M_n = 17399,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Resistência de cálculo ao momento fletor ( $R_d$ ):

$$R_d = \varphi_b \cdot M_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 17399,20 \quad (10)$$

$$R_d = 15659,30 \text{ kN} \cdot \text{cm} \rightarrow R_d > M_{dx} \rightarrow Ok! \text{ Perfil suporta o esforço solicitante.}$$

- Verificação da resistência à flexão composta (compressão + flexão)

Resistência de cálculo, forças axiais de flambagem elástica, fatores de equivalência:

$$R_d(N_d) = -567,05 \text{ kN}; R_d(M_{dx}) = 15659,30 \text{ kN} \cdot \text{cm}; N_{ex} = 3761,22 \text{ kN};$$

$$N_{ey} = 1096,35 \text{ kN}; C_{mx} = 1; C_{my} = 1$$

Interação entre força normal e momento fletor:

$$\frac{N_d}{R_d(N_d)} + \frac{C_{mx} \cdot M_{dx}}{\frac{1 - N_d}{0,73 \cdot N_{ex}}} \cdot R_d(M_{dx}) + \left( \frac{C_{mx} \cdot M_{dy}}{\frac{1 - N_d}{0,73 \cdot N_{ey}}} \right) \cdot R_d(M_{dy}) < 1 \quad (11)$$



$$\frac{-22,90}{-567,05} + \frac{1,00 \cdot 9900,00}{0,73 \cdot 3761,22} \cdot 15659,30 + \left( \frac{1,00 \cdot 0,00}{0,73 \cdot 1096,35} \right) \cdot 0,00 =$$

$0,68 < 1 \rightarrow Ok!$  Perfil suporta ao efeito combinado dos esforços solicitantes.

Hipótese 2:  $N_d = 18,5 \text{ kN}$  (Tração);  $V_d = -50,1 \text{ kN}$ ;  $M_d = 134,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$

- Esforços solicitantes de cálculo

$N_d = 18,50 \text{ kN}$ ;  $V_d = 50,10 \text{ kN}$ ;  $M_{dx} = 13450,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$ ;  $M_{dy} = 0,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

- Verificação da resistência à força normal

Estado limite de escoamento da seção bruta:

$$R_d = \phi_t \cdot A_g \cdot f_y \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 62,00 \cdot 25,00 = 1395,07 \text{ kN} \quad (12)$$

Estado limite de ruptura da seção líquida:

$$R_d = \phi_t \cdot A_g \cdot f_u \rightarrow R_d = 0,75 \cdot 62,00 \cdot 40,00 \quad (13)$$

Resistência de cálculo à tração:

Adota-se para  $R_d$  o menor valor das duas verificações anteriores.

$R_d = 1395,07 \text{ kN} \rightarrow R_d > N_d \rightarrow Ok!$  Perfil suporta o esforço solicitante.

- Verificação da resistência à força cortante

Resistência de cálculo à força cortante ( $R_d$ ):

$$R_d = \phi_c \cdot V_n \rightarrow R_d = 0,90 \cdot 330,04 \quad (9)$$

$R_d = 297,04 \text{ kN} \rightarrow R_d > V_d \rightarrow Ok!$  Perfil suporta o esforço solicitante.

- Verificação da resistência ao momento fletor (FLA, FLM, FLT) – flexão em x

Resistência nominal ao momento fletor ( $M_n$ ):

$FLA: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm}$ ;  $FLM: M_n = 24264,50 \text{ kN} \cdot \text{cm}$ ;

$FLT: M_n = 17399,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Adota-se para  $M_n$  o menor valor de FLA, FLM ou FLT  $\rightarrow M_n = 17399,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Resistência de cálculo ao momento fletor ( $R_d$ ):

$$R_d = \phi_b \cdot M_n \rightarrow 0,90 \cdot 17399,20 \quad (10)$$

$R_d = 15659,30 \text{ kN} \cdot \text{cm} \rightarrow R_d > M_{dx} \rightarrow Ok!$  Perfil suporta o esforço solicitante.

- Verificação da resistência à flexão composta (tração + flexão)

Resistência de cálculo:

$R_d(N_d) = 1395,07 \text{ kN}$ ;  $R_d(M_{dx}) = 15659,30 \text{ kN} \cdot \text{cm}$

Interação entre força normal e momento fletor:



$$\frac{Nd}{Rd(Nd)} + \frac{Mdx}{Rd(Mdx)} + \frac{Mdy}{Rd(Mdy)} < 1 \quad (14)$$

$$\frac{18,50}{1395,07} + \frac{13450,00}{15659,30} + \frac{0,00}{0,00} =$$

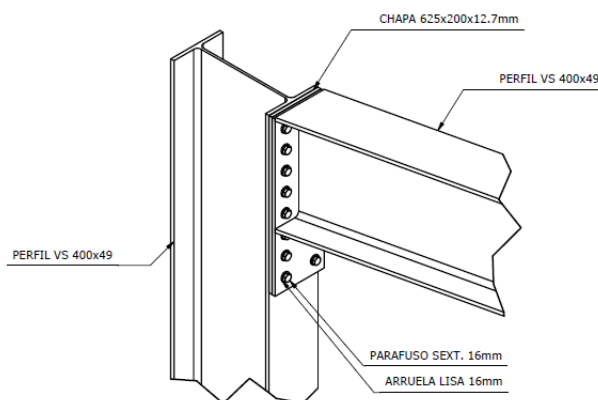
0,87 < 1 → Ok! Perfil suporta ao efeito combinado dos esforços solicitantes.

Portanto, também para esta hipótese, todas as verificações são satisfeitas. Assim, perfil adotado para as colunas, VS 400 x 49, atende.

### 3.9. Dimensionamento da ligação Viga X Pilar

Para o cálculo da ligação viga-pilar serão adotadas conexões parafusadas, conforme ilustrado na Figura 28. A solução consiste na utilização de uma chapa soldada no perfil da viga, realizando a fixação através de transfixações de parafusos na aba do perfil do pilar.

Será admitida ligação do tipo contato, com os parafusos uniformemente distribuídos, conforme ilustrado na Figura 29 a seguir.



**Figura 28.** Ligação viga x pilar  
Fonte: Autor, 2025

Resumo de dados:

Será adotado parafuso de aço ASTM A307 com diâmetro nominal de 16mm, área bruta de 1,98 cm<sup>2</sup> e resistência última à tração de (f<sub>u</sub>) de 415 Mpa. A chapa de fixação será confeccionada em aço ASTM A36 com dimensões de 625 x 200 x 12,7mm e resistência última à tração de (f<sub>u</sub>) de 400Mpa. Os esforços atuantes são M<sub>d</sub> = 134,5 kN e V<sub>d</sub> = 50,1 kN, conforme Tabela 1.



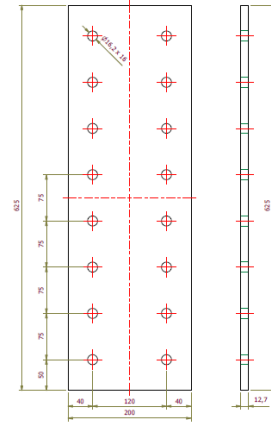
Primeira verificação: Análise considerando a influência da cha

- Espessura da área equivalente

$$t = \frac{m \cdot A_b}{p} \rightarrow \frac{2 \cdot 1,98}{7,5} = 0,53 \text{ cm} \quad (15)$$

- Força nos parafusos devido à cortante:

$$F_v = \frac{V}{n} \rightarrow \frac{50,1}{16} = 3,13 \text{ kN (por parafuso)} \quad (16)$$



**Figura 29.** Chapa 625x200x12,7  
Fonte: Autor, 2025

$$\left(\frac{b}{1} - 1\right) \cdot y_c^2 + 2 \cdot y_c \cdot h - h^2 = 0 \quad (17)$$

$$\left(\frac{20}{0,53} - 1\right) \cdot y_c^2 + 2 \cdot y_c \cdot 62,5 - 62,5^2 = 0 \rightarrow y_c = 8,75$$

- Cálculo do momento de inércia:

$$I = \frac{b \cdot y_c^3}{3} + \frac{t \cdot (h - y_c)^3}{3} \quad (18)$$

$$I = \frac{20 \cdot 8,75^3}{3} + \frac{0,53 \cdot (62,5 - 8,75)^3}{3} = 31.900 \text{ cm}^4$$

- Cálculo da força nos parafusos mais solicitados:

Parafusos mais tracionados:

$$F_t = \frac{M}{I} \cdot (d_i - y_c) \cdot A_b \rightarrow \frac{13450}{31900} \cdot (57,5 - 8,75) \cdot 1,98; F_t = 40,70 \text{ kN} \quad (19)$$

Parafusos mais comprimidos:

$$F_c = \frac{M}{I} \cdot (d_i - y_c) \cdot A_b \rightarrow \frac{13450}{31900} \cdot (5 - 8,75) \cdot 1,98 = -3,13 \text{ kN} \quad (20)$$

- Verificação ao esforço de tração:

$$A_{b\epsilon} = 0,75 \cdot A_b \rightarrow 0,75 \cdot 1,98 = 1,49 \text{ cm}^2 \quad (21)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{b\epsilon} \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \rightarrow \frac{1,49 \cdot 41,50}{1,35} = 45,80 \text{ kN (por parafuso)} \quad (22)$$

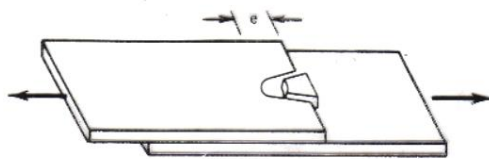
$$R_{t,d} > S_{t,d} \rightarrow ok!$$

- Verificação ao esforço de cisalhamento:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,45 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \rightarrow \frac{0,45 \cdot 1,98 \cdot 41,50}{1,35} \quad (23)$$

$$F_{v,Rd} = 27,4 \text{ kN (por parafuso)} \rightarrow R_{v,d} > S_{v,d} \rightarrow \text{ok!}$$

- Verificação da pressão de contato em furos:



**Figura 30.** Rasgamento  
Fonte: Adaptado de Silva

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \ell_f t f_u}{\gamma_{a2}}$$



**Figura 31.** Esmagamento  
Fonte: Adaptado de Silva

$$F_{c,Rd} = \frac{2,4 d_b t f_u}{\gamma_{a2}}$$

Rasgamento entre furo e borda

$$d_f = d_b + 1,5 \text{ mm} + 2,0 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm} \quad (24)$$

$$l_{f1} = d_{fb1} - \frac{d_f}{2} \rightarrow 50 - \frac{19,5}{2} = 40,25 \text{ mm} \quad (25)$$

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_{f1} \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \rightarrow \begin{cases} t = 12,7 \text{ mm} \\ l_{f1} = 40,25 \text{ mm} \\ f_u = 400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (26)$$

Rasgamento entre furos

$$l_{f2} = s - d_f \rightarrow 75 - 19,5 = 55,5 \text{ mm} \quad (27)$$

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_{f2} \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \rightarrow \begin{cases} t = 12,7 \text{ mm} \\ l_{f2} = 55,50 \text{ mm} \\ f_u = 400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (28)$$

Modo crítico: Rasgamento entre furo e borda

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot 40,25 \cdot 1,27 \cdot 40}{1,35} = 181,75 \text{ kN (por parafuso)}$$

$$R_{c,d} > S_{v,d} \rightarrow \text{ok!}$$

No entanto, será verificado o esmagamento entre furos e entre, furo e borda.

$$F_{c,Rd} = \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \rightarrow \begin{cases} t = 12,7 \text{ mm} \\ d_b = 16 \text{ mm} \\ f_u = 400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (29)$$

$$F_{c,Rd} = \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 1,27 \cdot 40}{1,35} = 144,50 \text{ kN (por parafuso)}$$

Logo,  $F_{c,Rd} = 144,50 \text{ kN}$

- Verificação ao esforço de tração e cisalhamento combinados:

$$\left( \frac{F_{t,sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{v,sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (30)$$

$$F_{t,sd} = 40,70 \text{ kN}; F_{t,Rd} = 45,80 \text{ kN}; F_{v,sd} = 3,13 \text{ kN}; F_{v,Rd} = 27,4 \text{ kN}$$

$$\left( \frac{40,70}{45,80} \right)^2 + \left( \frac{3,13}{27,4} \right)^2 \leq 1,0 \rightarrow 0,80 \leq 1,0 \rightarrow ok!$$

Segunda verificação: Análise sem a influência da chapa

- Cálculo da força nos parafusos

$$F_c = F_t = \frac{M}{z} \rightarrow \frac{134,5}{0,525} = 256,2 \text{ kN} \quad (31)$$

$$F_{paraf.} = \frac{F_t}{n} \rightarrow \frac{256,2}{16} = 16,01 \text{ kN (por parafuso)}$$

Com base nos cálculos desenvolvidos anteriormente, constata-se que a resistência de cálculo dos parafusos apresenta valores superiores às solicitações atuantes de tração e cisalhamento. Logo,

$$R_{t,d} > S_{t,d} \rightarrow ok! ; R_{v,d} > S_{v,d} \rightarrow ok!$$

Terceira verificação: Análise sem a influência da chapa e com a influência da normal simplificada

- Cálculo da força nos parafusos

$$F_{paraf.} = \frac{F_t}{n} + \frac{N}{n} \rightarrow \frac{256,2}{16} + \frac{18,5}{16} = 17,17 \text{ kN (por parafuso)} \quad (32)$$

Com base nos cálculos desenvolvidos anteriormente, ainda com a influência da normal a resistência de cálculo dos parafusos apresenta valores superiores às solicitações atuantes de tração e cisalhamento. Logo,

$$R_{t,d} > S_{t,d} \rightarrow ok! ; R_{v,d} > S_{v,d} \rightarrow ok!$$

No entanto, nem a combinações que tem o maior momento é o pior caso, por isso serão verificadas as outras combinações.

$$F_{paraf.} = \frac{F_t}{n} + \frac{N}{n} \rightarrow \frac{99}{0,525} + \frac{-46,3}{16} = 8,89 \text{ kN (por parafuso)} \quad (32)$$

$$F_{paraf.} = \frac{F_t}{n} + \frac{N}{n} \rightarrow \frac{99}{0,525} + \frac{-22,9}{16} = -13,22 \text{ kN (por parafuso)}$$

#### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos na primeira verificação, calculados a partir dos diagramas apresentados nas Figuras 15 a 26 e consolidados na Tabela 1, observou-se que a distribuição de esforços entre os parafusos não ocorre de forma linear, evidenciando a presença de concentrações de tensões em pontos específicos da ligação. Essa não linearidade está associada à rigidez diferenciada dos elementos conectados, às imperfeições geométricas e à própria configuração do conjunto estrutural. Diante disso, torna-se essencial identificar os valores máximos de tração e compressão atuantes, de modo a avaliar adequadamente o comportamento global da ligação e garantir a segurança e eficiência do sistema.

Ao comparar as três verificações realizadas – “*Análise considerando a influência da chapa, Análise sem a influência da chapa e Análise sem a influência da chapa e com a influência da normal simplificada*” – constatou-se que a consideração da influência da chapa exerce papel significativo no dimensionamento. Os resultados indicaram que o aumento da espessura da chapa não necessariamente resulta em uma ligação mais segura, uma vez que a rigidez adicional tende a atrair maiores esforços para o elemento mais rígido. Esse comportamento é característico de estruturas hiperestáticas, nos quais a distribuição dos esforços é governada pela rigidez dos elementos.

Com base nos resultados numéricos apresentados no item 3.9, constatou-se que, ao desconsiderar a influência da chapa, o esforço de tração máximo nos parafusos foi de 16,01 kN, enquanto, ao considerar a rigidez da chapa, esse valor elevou-se para 40,70 kN. Esse aumento expressivo evidencia que a rigidez adicional da chapa concentrou parte significativa dos esforços no conjunto, alterando o equilíbrio interno da ligação. Assim, o resultado confirma a importância de se considerar adequadamente a influência da espessura e rigidez dos elementos no modelo de cálculo, para realizar um levantamento conservador nos esforços atuantes nas ligações, sendo que o resultado mais preciso só seria possível por meio de um ensaio experimental e validação numérica.

## 5. CONSIDERAÇÕES

Conclui-se que, em ligações executadas por meio de parafusos, a obtenção de um engastamento perfeito apresenta limitações práticas e teóricas significativas. Embora o aumento da rigidez seja desejável em determinadas situações de projeto, o comportamento real das conexões parafusadas dificilmente atinge as condições ideais de um engaste absoluto. Isso ocorre porque a rigidez da ligação não depende apenas da resistência dos parafusos, mas também da espessura e da rigidez das chapas conectadas, da folga existente entre os furos e do controle do torque aplicado no aperto dos parafusos.

Na prática, não é possível mensurar de forma precisa o grau de aperto que se proporcionaria uma ligação totalmente rígida. O aumento excessivo do torque aplicado aos parafusos, com o objetivo de reduzir folgas e aumentar a rigidez, pode gerar esmagamento localizado das chapas e deformações plásticas nos furos, comprometendo tanto a integridade da ligação quanto o comportamento previsto em projeto. Assim, em vez de se alcançar um engaste perfeito, obtém-se uma rigidez parcial acompanhada de danos locais que reduzem a durabilidade e a segurança da estrutura.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: 2023**. Forças devidas ao evento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: 2003**. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: 2024**. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

CBCA (Centro Brasileiro da Construção em Aço). **Ligações em estruturas metálicas**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBS/CBCA, 2011.

FERREIRA, M. A. **Curso de especialização em estruturas metálicas – EMT**. Vitória: INBEC: Instituto Brasileiro de Educação Continuada, 2021. (Notas de Aula).

GESCHWINDNER, L. F. **Unified design of steel structures**. London: John Wiley & Sons, 2008. p. 3-7.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço – dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

SALES, J. J. *et al.* **Elementos de estruturas de aço: dimensionamento**. São Carlos: EESC USP, Apostila, 1994 (Publ. 006/94).