

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

BRUNO MARTINS AMARAL TUDEIA

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PIPE RACK

BELO HORIZONTE

2017

BRUNO MARTINS AMARAL TUDEIA

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PIPE RACK

Curso de Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço

Trabalho de Conclusão de Curso de Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço apresentado ao Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para aprovação na disciplina TFE000 – Trabalho Final de Conclusão de Curso.
Orientador: Prof. Dr. Hermes Carvalho

BELO HORIZONTE

2017

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico da estrutura de um Pipe Rack utilizado para sustentação de tubulações de água e instalado em uma siderúrgica de grande porte.

Procedimentos de elementos finitos para determinação dos esforços solicitantes na estrutura foram desenvolvidos para esse estudo, sendo os carregamentos calculados conforme ABNT NBR 6123 e ABNT NBR 6120. A estrutura foi analisada considerando a adição de 4 tubulações que não foram consideradas no projeto, sendo considerada a norma ABNT NBR 8800:2008.

A análise da estrutura permitiu a identificação dos pontos mais críticos e modificações estruturais foram elaboradas para a garantia da segurança da estrutura na nova condição de trabalho decorrente da instalação de novas tubulações.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVO	8
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1. PIPE RACK.....	9
2.2. DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS	10
2.2.1. CÁLCULO DE CARREGAMENTOS ATUANTES.....	11
2.2.1.1. FORÇAS DE VENTO.....	11
2.2.1.2. COMBINAÇÕES DE AÇÕES	14
2.2.1.3. COMBINAÇÕES PARA ESTADO LIMITE ÚLTIMO	15
2.2.1.4. COMBINAÇÕES PARA ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO	16
2.2.2. VERIFICAÇÃO DOS PERFIS ESTRUTURAIS	17
2.2.3. VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS	18
3. METODOLOGIA.....	20
3.1. CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS ATUANTES NA ESTRUTURA	20
3.1.1. AÇÕES PERMANENTES.....	20
3.1.1.1. PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA	20
3.1.1.2. PESO PRÓPRIO DAS TUBULAÇÕES	20
3.1.1.3. PESO PRÓPRIO DO CONJUNTO CALHAS E CABOS	26
3.1.2. AÇÕES VARIÁVEIS	28
3.1.2.1. FORÇAS DE VENTO.....	28
3.1.2.2. SOBRECARGAS.....	31
3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	31
3.2.1. APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	34
3.2.1.1. PONTOS FIXOS DA ESTRUTURA.....	34
3.2.2. CARREGAMENTOS APLICADOS NA ESTRUTURA.....	35
3.2.2.1. AÇÕES VARIÁVEIS.....	35
3.2.2.2. CARGAS PERMANENTES	37
3.3. VERIFICAÇÃO DOS PERFIS DA ESTRUTURA	38
3.4. VERIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES.....	38
4. RESULTADOS	39
4.1. CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA QUANTO À DESLOCABILIDADE	39

4.2. VERIFICAÇÃO DOS PERFIS	41
4.3. VERIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES.....	43
4.4. MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS	45
5. CONCLUSÕES	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXO A – VERIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES METÁLICAS	50
A.1 VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO 01	50
A.2 VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO 02	63
A.3 VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO 03	78
A.4 VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO 04	93
A.5 VERIFICAÇÃO COLUNA PRINCIPAL.....	108
ANEXO B – VERIFICAÇÃO CHAPA DE LIGAÇÃO ADICIONAL	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pipe Rack composto por uma estrutura metálica (Fonte: www.setxind.com).	9
Figura 2: Fluxograma dimensionamento estruturas metálicas.	11
Figura 3: Coeficiente de arrasto (C_a) para reticulados planos formados por barras prismáticas de cantos vivo ou levemente arredondados. (Fonte: Figura 6 ABNT NBR 6123:1988).	13
Figura 4: Determinação do fator η para dois ou mais reticulados planos igualmente afastados (Fonte: Figura 8 ABNT NBR 6123 1988).	14
Figura 5: Fluxograma simplificado para dimensionamento de barras prismáticas. ..	18
Figura 6: Indicação das seções – Posicionamento das tubulações.	21
Figura 7: Tubulações seção A-A.....	21
Figura 8: Tubulações seção B-B.	22
Figura 9: Tubulações seção C-C.....	22
Figura 10: Tubulações seção D-D.	23
Figura 11: Posicionamentos dos conjuntos calha e cabos nas seções A-A (a), B-B (b), C-C (c) e D-D (d).....	27
Figura 12: Mapa de isopetas ABNT NBR 6123.	28
Figura 13: Identificação dos reticulados superiores.	29
Figura 14: Identificação das estruturas de sustentação.	30
Figura 15: Modelo da estrutura do Pipe Rack elaborado no Metálicas 3D.....	32
Figura 16: Indicação dos perfis da estrutura.	32
Figura 17: Ligação das vigas dos reticulados com as colunas.....	33
Figura 18 : Ligação das vigas intermediárias dos reticulados com as colunas.	33
Figura 19: Ligação dos contraventamentos dos reticulados.	34
Figura 20 : Indicação do tipo de ligação parafusada das vigas e dos contraventamentos presentes nas colunas.	34
Figura 21: Aplicação de engastamento nas bases da estrutura.....	35
Figura 22: Pontos de aplicação das cargas devido ao conjunto calha e cabos.....	38
Figura 23: Obtenção do deslocamento lateral da estrutura para determinação da classificação da estrutura.....	40

Figura 24: Vigas com alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01.....	41
Figura 25: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01.....	42
Figura 26: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02.....	42
Figura 27: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02.....	42
Figura 28: Ligações que apresentaram aumento significativo de solicitação para a nova condição de operação.	43
Figura 29: Chapa adicional de ligação.	45
Figura 30: Configurações da chapa adicional de ligação.	46
Figura 31: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02 após modificações dos perfis.	46
Figura 32: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02 após modificações dos perfis.	47
Figura 33: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01 após modificações dos perfis.	47
Figura 34: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01 após modificações dos perfis.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção A-A.	24
Tabela 2: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção B-B.	25
Tabela 3: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção C-C.	25
Tabela 4: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção D-D.	26
Tabela 5: Determinação dos coeficientes de arrasto para o vento na direção X.	30
Tabela 6: Determinação dos coeficientes de arrasto para o vento na direção Y.	31
Tabela 7: Sobrecargas devido à passagem de fluidos nas tubulações.	35
Tabela 8: Resultados da ação do vento nos reticulados.	36
Tabela 9: Cargas devido ao peso próprio das tubulações.	37
Tabela 10: Carregamentos e coeficientes para determinação de B2.	39
Tabela 11: Verificação das ligações mais solicitadas indicadas na Figura 28.	44

1. INTRODUÇÃO

O Pipe Rack é uma estrutura metálica como objetivo sustentar tubulações, presente principalmente em plantas industriais. Novas demandas em processos industriais podem exigir a instalação de tubulações adicionais na estrutura, as quais não foram consideradas no projeto original.

A análise computacional pelo método dos elementos finitos permite a identificação dos esforços solicitantes nos elementos estruturais e deslocamentos da estrutura. Na elaboração do modelo computacional são aplicadas condições de contorno, carregamentos e a rigidez presente na ligação entre os perfis. Os esforços resistentes dos elementos estruturais são calculados conforme a ABNT NBR 8800:2008.

A análise estrutural do Pipe Rack torna possível a identificação de pontos críticos, indicando as modificações que devem ser realizadas para a adequação da estrutura à nova condição de operação.

1.1. Objetivo

A análise estrutural do Pipe Rack em estudo visa a verificação da segurança de operação considerando as cargas adicionais. Caso os níveis de segurança não sejam atendidos, modificações estruturais serão propostas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Pipe Rack

Pipe Rack é uma estrutura utilizada para sustentar tubulações sendo normalmente encontrada em plantas industriais. Os Pipe Racks são normalmente compostos por estruturas metálicas, sendo um exemplo apresentado na Figura 1.



Figura 1: Pipe Rack composto por uma estrutura metálica (Fonte: www.setxind.com).

A estrutura do PipeRack é submetida principalmente às cargas permanentes decorrentes dos pesos próprios das tubulações, calhas elétricas e às cargas variáveis devido aos fluidos transportados pelas tubulações e força do vento. Grande parte das estruturas não apresenta passadiços ou coberturas.

O dimensionamento da estrutura do Pipe Rack Pipe Rack consiste basicamente na avaliação dos estados limites últimos e dos estados limites de serviço dos elementos estruturais. Neste trabalho foram consideradas as recomendações da norma ABNT NBR 8800:2008.

2.2. Dimensionamento de Estruturas Metálicas

Durante o projeto ou avaliação de uma estrutura metálica, realiza-se inicialmente um estudo da estrutura para a determinação dos carregamentos atuantes, os quais são divididos em ações permanentes e ações variáveis.

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, as ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção, sendo estas divididas em diretas e indiretas. As ações diretas correspondem ao peso próprio da estrutura ou de equipamentos a ela fixados. As ações indiretas correspondem aos deslocamentos de apoios ou imperfeições geométricas. As ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da construção, como as ações devidas ao vento, variação de temperatura e sobrecargas em passadiços, coberturas ou provocadas por equipamentos.

Após a determinação das combinações de ações, é realizada uma pré-seleção dos elementos estruturais, com os quais realiza-se uma análise estrutural para a determinação dos esforços solicitantes. Com os esforços solicitantes verificam-se inicialmente as condições usuais de segurança referentes aos estados-limites últimos. Nesta etapa deve-se também verificar a classificação da estrutura quanto ao seu deslocamento, sendo esta realizada por meio de uma razão entre deslocamentos laterais interpavimento obtido na análise de 1ª ordem e de 2ª ordem. A norma ABNT NBR 8800:2008 especifica a seguinte classificação:

- Pequena deslocabilidade: razão menor que 1,1
- Média deslocabilidade: razão entre 1,1 e 1,4
- Grande deslocabilidade: razão superior a 1,4

Para estruturas de média e grande deslocabilidade, os deslocamentos dos elementos estruturais afetam de forma significativa os esforços internos dentro da estrutura, sendo necessária uma análise de segunda ordem. Para esta análise, métodos que consideram de maneira direta ou indiretamente a influência da geometria deformada da estrutura devem ser considerados.

Após a verificação quanto aos estados limites últimos, realiza-se a avaliação com relação aos estados-limites de serviços, sendo nesta etapa avaliados os

deslocamentos da estrutura. Caso a estrutura não atenda aos estados-limites, aplica-se uma modificação nos elementos estruturais pré-selecionados. Na Figura 2 é apresentado um fluxograma que resume a avaliação de uma estrutura metálica.

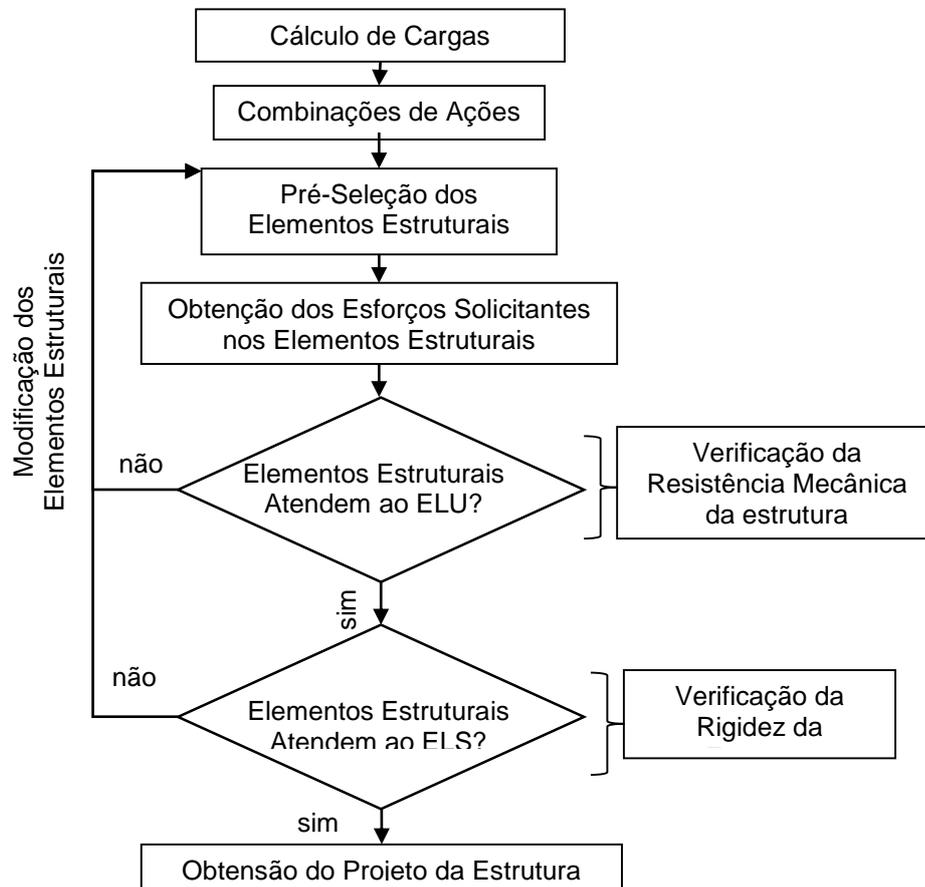


Figura 2: Fluxograma dimensionamento estruturas metálicas.

2.2.1. Cálculo de Carregamentos Atuantes

2.2.1.1. Forças de Vento

A Norma ABNT NBR 6123:1988 [2] apresenta a metodologia a ser aplicada durante o cálculo da carga de vento atuante em estruturas. Inicialmente determina-se a velocidade básica do vento, correspondente a uma rajada de duração igual a 3 segundos excedida em média um vez a cada 50 anos. Na figura 1 da ABNT NBR 6123 é apresentada um gráfico de isopetas de velocidade básica do vento para o território brasileiro. Posteriormente determinam-se os valores apropriados para os seguintes fatores:

S1: Fator topográfico, leva em consideração a influência das variações do relevo do terreno;

S2: Fator rugosidade do terreno, sendo função das dimensões e elevações da edificação;

S3: Fator estatístico, o qual considera o grau de segurança requerido para a edificação e sua vida útil.

Multiplicando-se a velocidade básica do vento pelos fatores S1, S2 e S3 obtém-se a velocidade característica do vento V_k , com a qual determina-se a pressão dinâmica exercida pelo vento q :

$$V_k = V * S1 * S2 * S3$$

Sendo:

V : Velocidade básica do vento.

$$q = 0,613 * V_k^2$$

A ação do vento na estrutura é obtida pela multiplicação da pressão dinâmica do vento pela área frontal da estrutura, coeficiente aerodinâmico e pressão dinâmica do vento. O coeficiente aerodinâmico de uma estrutura reticulada pode ser determinado pela metodologia apresentada no item 7.6 da ABNT NBR 6123, através da seguinte equação:

$$C_{an} = C_{a1} * (1 + (n - 1) * \eta)$$

Sendo:

C_{a1} : coeficiente de arrasto de um reticulado isolado;

n : número de reticulados paralelos e igualmente distantes entre si;

η : fator de proteção para dois ou mais reticulados paralelos afastados.

A força de atuação do vento no reticulado pode então ser obtida por:

$$F_{an} = C_{an} * q * Ae$$

Sendo:

A_e : área frontal efetiva do reticulado.

O cálculo do coeficiente de arrasto de um reticulado plano isolado é calculado conforme o item 7.5 da norma ABNT NBR 6123. Para reticulados formados por barras prismáticas de cantos vivos, pode-se utilizar o gráfico apresentado na Figura 3.

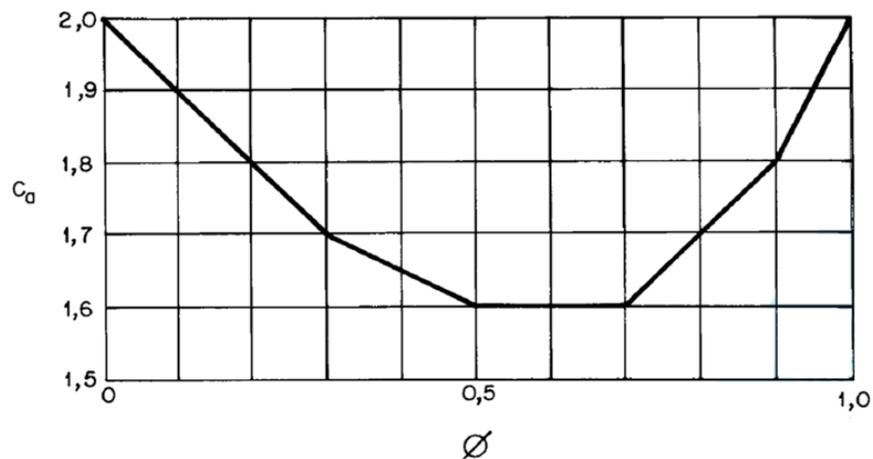


Figura 3: Coeficiente de arrasto (C_a) para reticulados planos formados por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados. (Fonte: Figura 6 ABNT NBR 6123:1988).

O índice de área exposta ϕ , é calculado dividindo-se a área frontal efetiva do reticulado pela área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado. Com o valor de ϕ , o valor do coeficiente de arrasto C_{a1} , pode ser determinado. Para reticulados planos, paralelos e igualmente afastados, aplica-se uma redução do esforço do vento nos planos subsequentes η , podendo-se para tanto utilizar o gráfico apresentado na Figura 4.

γ_{f3} : coeficiente que considera possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações

O produto $\gamma_{f1} * \gamma_{f3}$ é representado pelos fatores γ_g e γ_q utilizados durante a avaliação das ações permanentes e variáveis respectivamente. O coeficiente γ_{f2} , o qual considerada a probabilidade de ocorrência simultânea dos valores característicos de duas ou mais ações, corresponde aos seguintes fatores de combinações:

- Ψ_0 : aplicado para a combinação de ação que atua juntamente com a ação principal durante a verificação de estados-limites últimos;
- Ψ_1 : aplicado para a combinação de ação frequente que atua juntamente com a ação principal durante a verificação de estados-limites de serviço;
- Ψ_2 : aplicado para a combinação de ação quase permanente que atua juntamente com a ação principal durante a verificação de estados-limites de serviço;

As Tabelas 1 e 2 da norma ABNT NBR 8800:2008 apresentam os valores recomendados para os fatores de ponderação e de combinações de ações.

2.2.1.3. Combinações para Estado Limite Último

Uma combinação última de ações pode ser classificadas em:

- Normal: carregamentos atuantes durante o uso previsto da edificação.
- Especial: carregamentos transitórios de curta duração que superam os carregamentos normais;
- Construção: aplicado durante a etapa de construção da estrutura, durante este período a estrutura pode não apresentar todos os elementos estruturais fazendo com que partes da edificação estejam sujeitas a esforços excessivos;
- Excepcionais: ações com duração extremamente curta consideradas em determinados tipos de construções que podem provocar efeitos catastróficos.

Para as combinações, as seguintes equações devem ser utilizadas:

- Combinação última normal:

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

$F_{Gi,k}$: ação permanente;

$F_{Q1,k}$: ação variável considerada como principal;

$F_{Qj,k}$: ações variáveis que atuam concomitantemente com a ação variável principal.

- Combinação última especial:

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

$F_{Q1,k}$: ação variável especial;

$\Psi_{0j,ef}$: fator de combinação ELU para as ações variáveis que atuam juntamente com a ação especial.

- Combinação última excepcional:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} * F_{Gi,k}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} * \Psi_{0j,ef} * F_{Qj,k})$$

$F_{Q,exc}$: ação excepcional;

$\Psi_{0j,ef}$: fator de combinação ELU para as ações variáveis que atuam juntamente com a ação excepcional.

2.2.1.4. Combinações para Estados Limites de Serviço

As combinações relacionadas ao estado limite de serviço podem ser classificadas de acordo com o período de permanência na estrutura em quase permanentes, frequentes e raras. As combinações permanentes atuam durante grande parte da vida útil da edificação, as combinações frequentes se repetem diversas vezes na ordem em um período de 50 anos, enquanto as combinações raras atuam durante algumas horas ao longo da vida útil da estrutura. Para a aplicação destas combinações são utilizadas as seguintes equações:

- Quase permanentes:

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

Ψ_{2j} : fator de combinação ELS para as ações variáveis;

- Frequentes:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi,k}) + \Psi_1 * F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{2j} * F_{Qj,k})$$

Ψ_1 : fator combinação ELS para a ação frequente;

- Raras:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi,k}) + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} * F_{Qj,k})$$

Ψ_{1j} : fator combinação ELS para as ações variáveis que atuam juntamente com a ação rara.

2.2.2. Verificação dos Perfis Estruturais

Os perfis estruturais devem ser verificados quanto a resistência aos esforços:

- Tração;
- Compressão;
- Flexão;
- Cisalhamento.

O capítulo 5 da norma ABNT NBR 8800:2008 apresenta a metodologia a ser aplicada durante a avaliação de perfis estruturais. A Figura 5 apresenta um fluxograma simplificado da verificação de barras prismáticas.

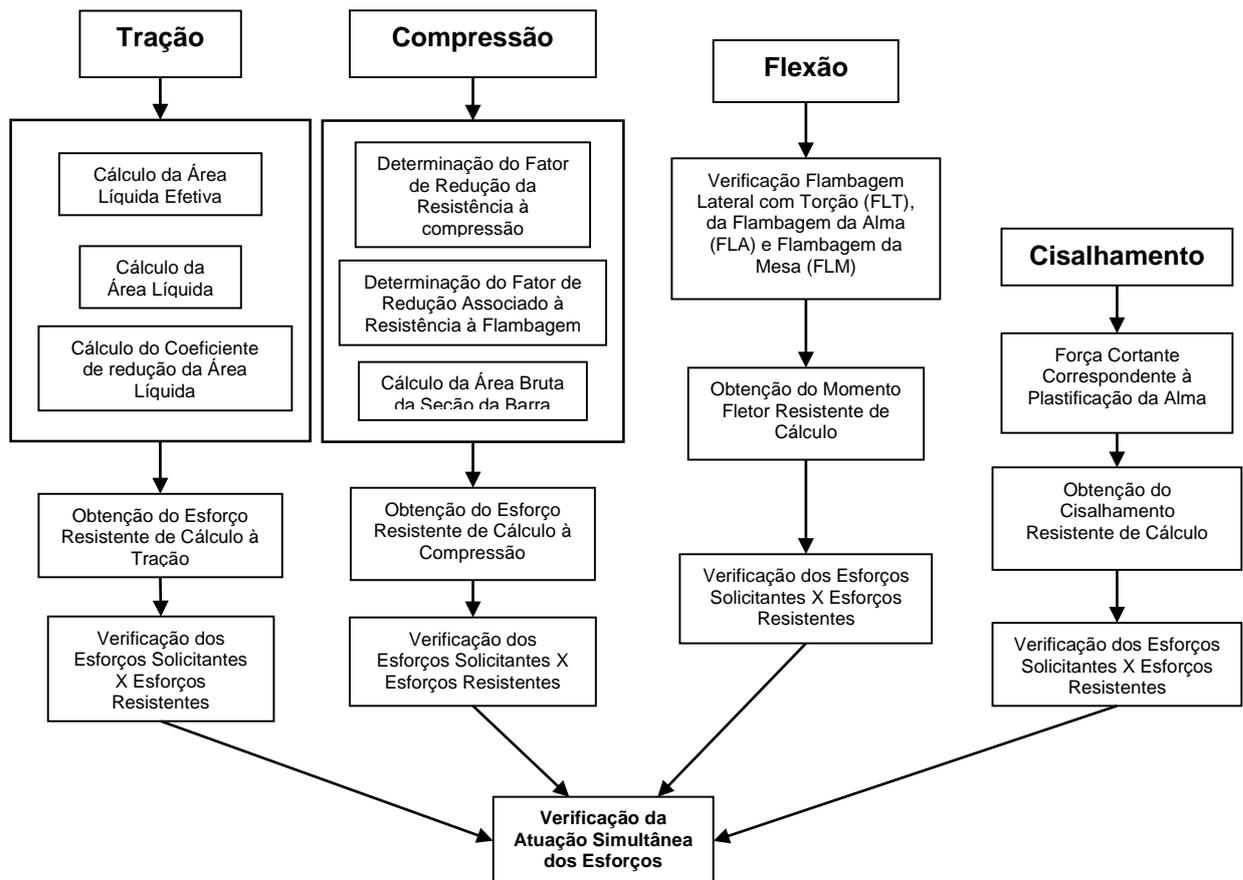


Figura 5: Fluxograma simplificado para dimensionamento de barras prismáticas.

2.2.3. Verificação de Ligações Metálicas

Conforme a norma ABNT ABNT NBR8800:2008, as ligações metálicas consistem em elementos de conexão, como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras, e meios de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos. Estes componentes devem ser dimensionados de maneira que a resistência ao cálculo seja superior à solicitação, determinada a partir das combinações últimas de serviço.

As ligações são classificadas conforme a sua rigidez em ligações flexíveis, semi-rígidas e rígidas. O grau de rigidez das ligações deve ser considerado no modelo computacional, uma vez que esta característica afeta as respostas de uma estrutura quando submetida aos esforços solicitantes.

As ligações são também classificadas quanto aos meios de ligação em soldadas e parafusadas. Nas ligações parafusadas os parafusos estão submetidos

aos esforços de tração e/ou cisalhamento, enquanto nas ligações soldadas as soldas estão sujeitas aos esforços de compressão, tração e cisalhamento.

O cálculo das ligações soldadas é baseado na verificação do escoamento do metal base e verificação da ruptura da solda na seção efetiva. O cálculo das ligações parafusadas é baseado na verificação do parafuso quanto aos esforços de cisalhamento e/ou tração e na verificação da chapa de ligação quanto a tensão de contato dos parafusos, escoamento, efeito alavanca e rasgamento da chapa.

3. METODOLOGIA

A metodologia está dividida em:

- Cálculo dos carregamentos atuantes na estrutura;
- Elaboração do modelo computacional em Elementos Finitos utilizando o programa Metálicas 3D;
- Verificação ELU dos perfis estruturais;
- Verificação das ligações;
- Elaboração de modificações estruturais.

3.1. Cálculo dos Carregamentos Atuantes na Estrutura

As ações que atuam na estrutura estão divididas em:

- Ações Permanentes:
 - Peso próprio da estrutura;
 - Peso próprio das tubulações fixadas na estrutura;
 - Peso próprio do conjunto calhas e cabos.
- Ações Variáveis:
 - Ação do vento;
 - Sobrecarga devido aos fluidos transportados pelas tubulações

3.1.1. Ações Permanentes

3.1.1.1. Peso Próprio da Estrutura

Uma vez inseridos os perfis da estrutura, o peso próprio dos elementos são calculados automaticamente pelo programa de elementos finitos.

3.1.1.2. Peso Próprio das Tubulações

As Figuras 6 a 10 apresentam esquematicamente a estrutura em estudo bem como as tubulações presentes sobre esta.

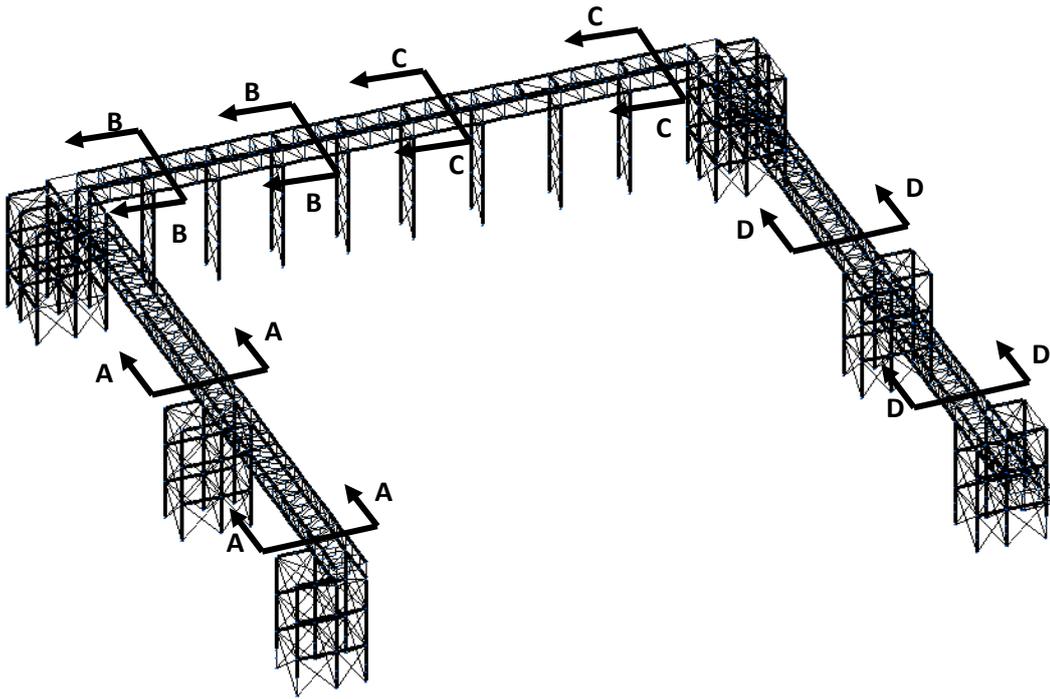


Figura 6: Indicação das seções – Posicionamento das tubulações.

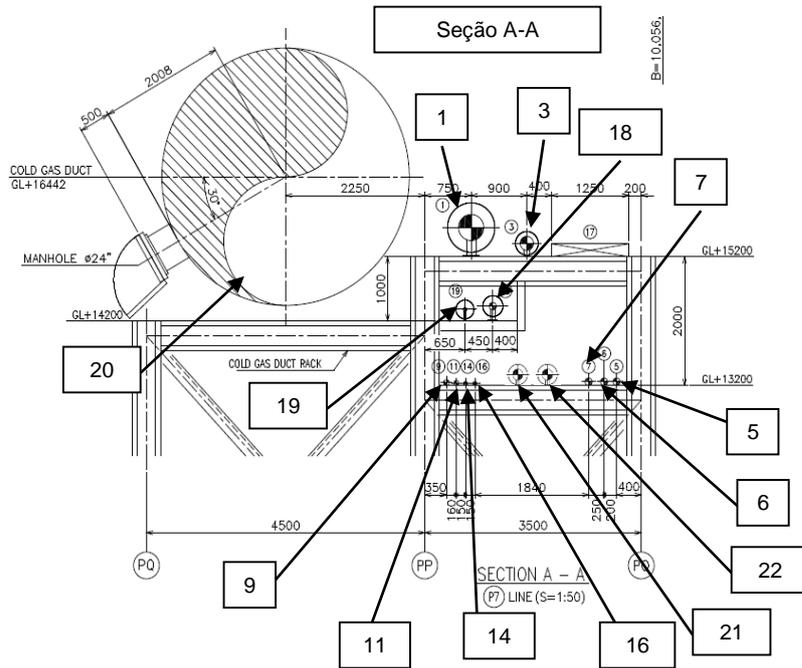


Figura 7: Tubulações seção A-A.

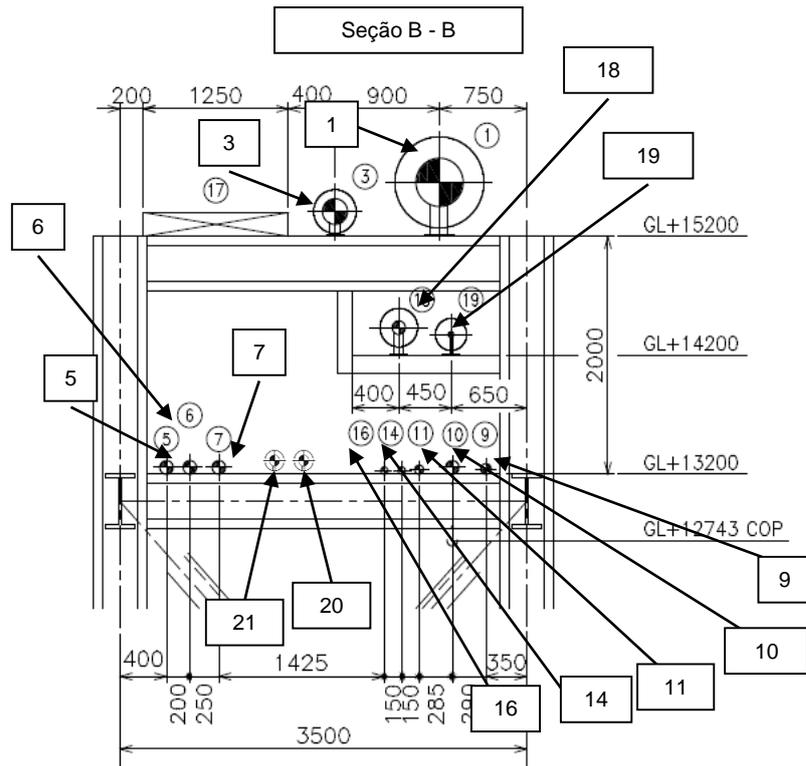


Figura 8: Tubulações seção B-B.

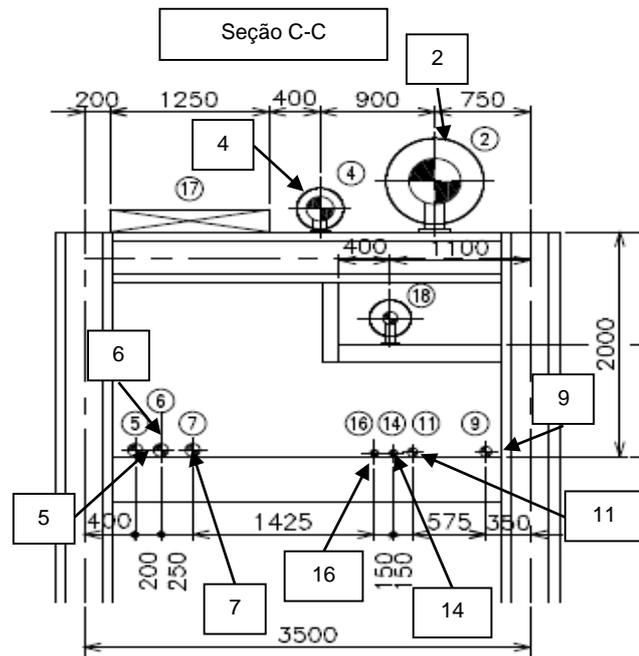


Figura 9: Tubulações seção C-C.

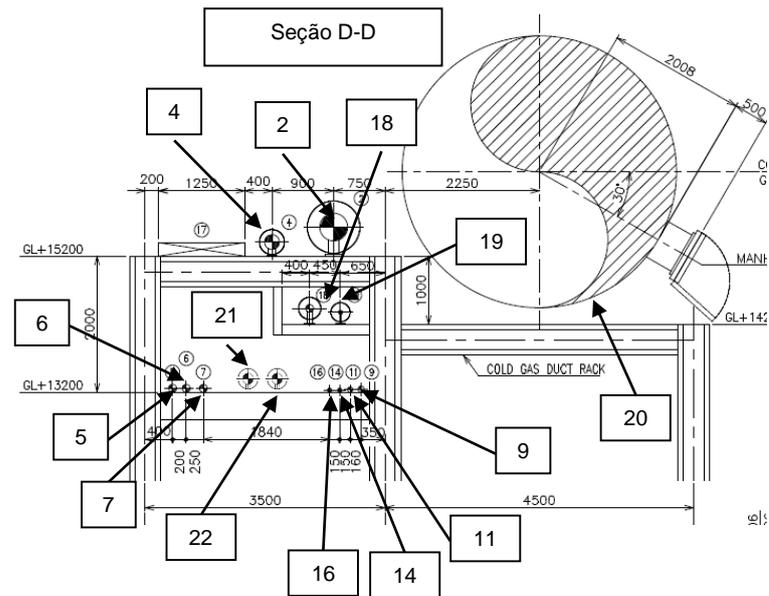


Figura 10: Tubulações seção D-D.

As tubulações são de aço, sendo assim utilizada uma densidade de 7850kg/m^3 na determinação do peso próprio. Na Tabela 1 à Tabela 4 estão apresentados os diâmetros, espessuras, comprimentos e pesos próprios encontrados para as tubulações.

Tabela 1: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção A-A.

Seção A-A				
Tubulação	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Peso Próprio (kgf)
1	9,52	406,40	80200.00	7473
3	8,18	219,07	80200.00	3412
5	6,02	114,30	80200.00	1289
6	6,02	114,30	80200.00	1289
7	6,02	114,30	80200.00	1290
9	5,49	88,90	80200.00	906
11	5,16	73,02	80200.00	693
14	5,16	60,36	80200.00	563
16	5,16	60,36	80200.00	563
18	6,02	114,30	80200.00	1289
19	3,91	60,36	80200.00	437
20	8,00	4000,00	80200.00	-
21	9,52	406,40	80200.00	9451
22	8,18	219,07	80200.00	2588

Tabela 2: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção B-B.

Seção B-B				
Tubulação	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Peso Próprio (kgf)
1	9,52	406,40	58101.00	6847
3	8,18	219,07	58101.00	1875
5	6,02	114,30	58101.00	477
6	6,02	114,30	58101.00	477
7	6,02	114,30	58101.00	477
9	5,49	88,90	58101.00	277
10	5,49	88,90	58101.00	277
11	5,16	73,02	58101.00	179
14	5,16	60,36	58101.00	114
16	5,16	60,36	58101.00	114
18	6,02	114,30	58101.00	477
19	3,91	60,36	58101.00	126
20	9,52	406,40	58101.00	6847
21	8,18	219,07	58101.00	1875

Tabela 3: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção C-C.

Seção C-C				
Tubulação	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Peso Próprio (kgf)
2	9,52	406,40	58101.00	6847
4	8,18	219,07	58101.00	1875
5	6,02	114,30	58101.00	477
6	6,02	114,30	58101.00	477
7	6,02	114,30	58101.00	477
9	5,49	88,90	58101.00	277
11	5,16	73,02	58101.00	179
14	5,16	60,36	58101.00	114
16	5,16	60,36	58101.00	114
18	6,02	114,30	58101.00	477
19	9,52	355,00	58101.00	5150
20	8,18	219,07	58101.00	1875

Tabela 4: Sobrecarga devido à passagem de água nas tubulações seção D-D.

Seção D-D				
Tubulação	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Peso Próprio (kgf)
2	9,52	406,40	84700.00	9982
4	8,18	219,07	84701.00	2734
5	6,02	114,30	84702.00	696
6	6,02	114,30	84703.00	696
7	6,02	114,30	84704.00	696
9	5,49	88,90	84705.00	404
11	5,16	73,02	84706.00	262
14	5,16	60,36	84707.00	167
16	5,16	60,36	84708.00	167
18	6,02	114,30	84709.00	696
19	3,68	60,36	84710.00	187
20	8,00	4000,00	84712.00	-
21	9,52	355,00	84709.00	7509
22	8,18	219,07	84710.00	2734

3.1.1.3. Peso Próprio do Conjunto Calhas e Cabos

Estão fixados na região superior da estrutura do Pipe Rack cabos, sustentados por calhas metálicas. Na Figura 11 estão apresentadas as posições destes componentes, sendo consideradas as seções indicadas na Figura 6.

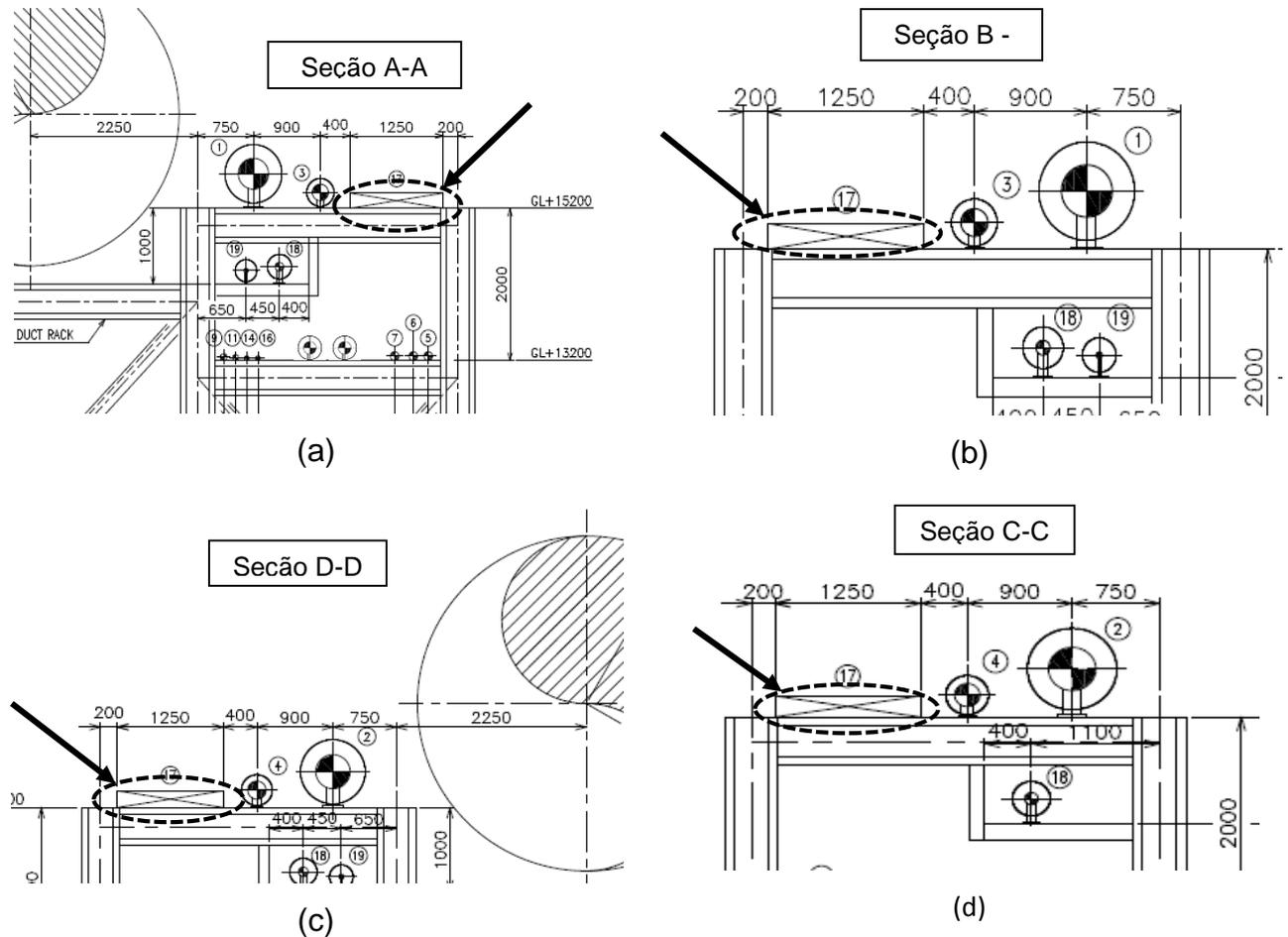


Figura 11: Posicionamentos dos conjuntos calha e cabos nas seções A-A (a), B-B (b), C-C (c) e D-D (d).

Nos desenhos disponibilizados da estrutura não estão apresentadas informações detalhadas sobre o tipo de calha, a quantidade e a seção dos cabos. O peso próprio destes componentes foram então estimadas de forma conservativa, sendo os seguintes valores considerados:

- Calhas: 73 kg/m;
- Cabos: 140 kg/m.

3.1.2. Ações Variáveis

3.1.2.1. Ação do Vento

O cálculo da ação do vento foi baseado na norma ABNT NBR 6123:1988, sendo a pressão dinâmica do vento atuante na estrutura e nas tubulações determinada pela seguinte equação:

$$q = 0,613 * V_k^2 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Sendo V_k a velocidade característica do vento, determinada por:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \text{ [m/s]}$$

A estrutura está localizada na cidade de Vitória, ES, segundo o mapa de isopetas da norma ABNT NBR 6123:1988, deve-se considerar uma velocidade básica do vento igual a 35m/s, como indicado na Figura 12.

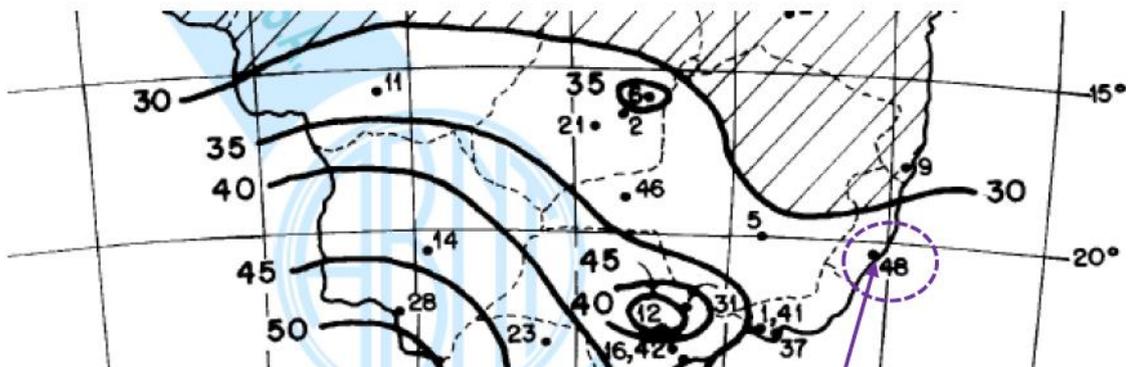


Figura 12: Mapa de isopetas ABNT NBR 6123.

Os índices S_1 , S_2 e S_3 foram determinados conforme abaixo:

- S_1 - Fator topográfico: Terreno considerado como plano ou fracamente acidentado, portanto $S_1=1$.
- S_2 - Fator da rugosidade do terreno combinado com a altura da edificação: Estrutura classificada como Classe C e categoria IV (zona industrial) como elevação de 15m, $S_2=0,84$.
- S_3 - Fator estatístico:

Estrutura pertence ao grupo estatístico 3 (edificação industrial com baixo fator de ocupação), portanto apresenta um fator estatístico, $S_3=0,95$.

Como resultado, obteve-se:

$$V_k=27,93 \text{ [m/s]}$$

$$q=478,19 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Na Figura 13 e na Figura 14 estão apresentadas as definições das regiões da estrutura utilizadas durante o cálculo das forças devidas vento, sendo apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6 os coeficientes de arrasto encontrados.

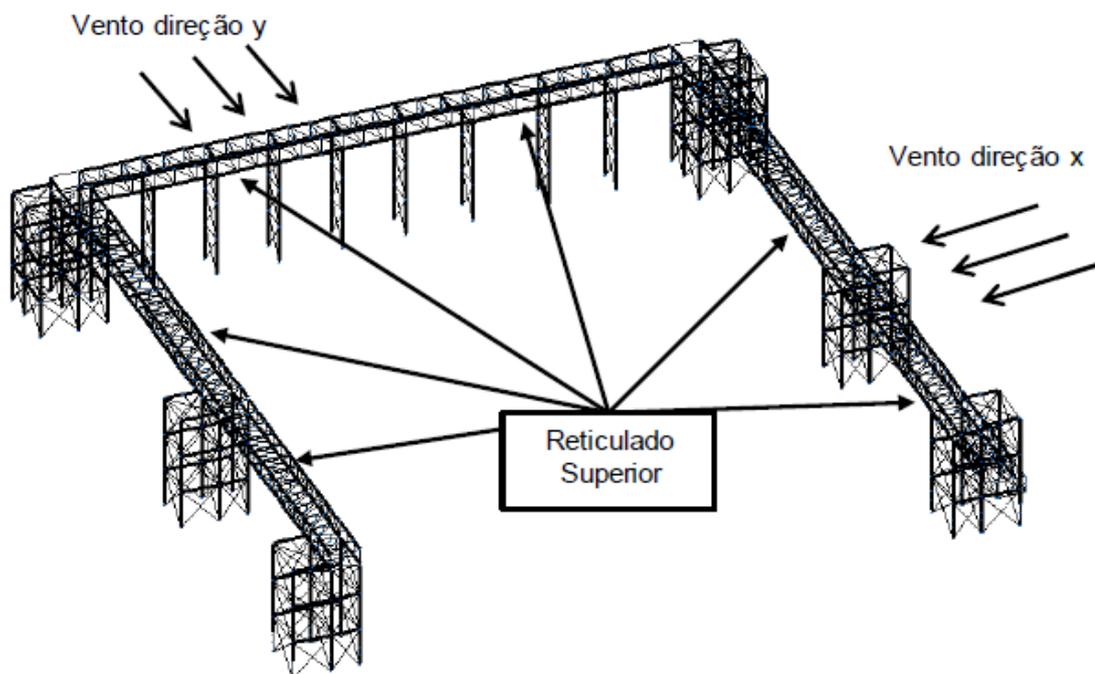


Figura 13: Identificação dos reticulados superiores.

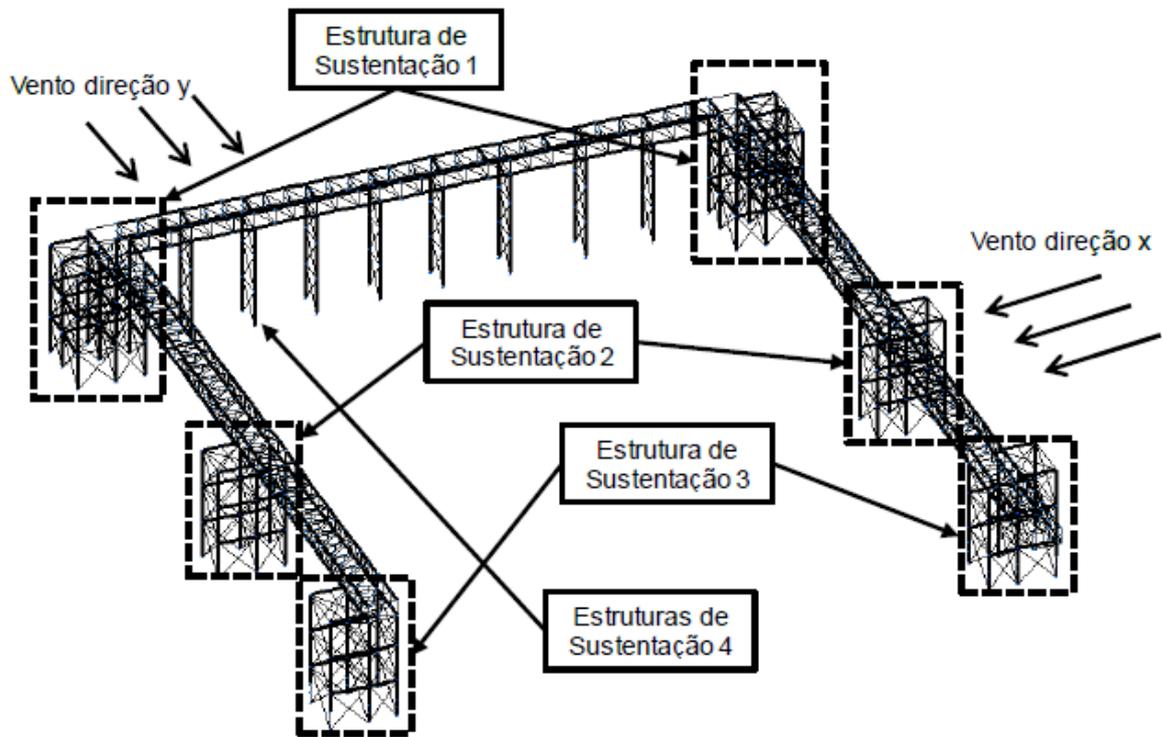


Figura 14: Identificação das estruturas de sustentação.

Tabela 5: Determinação dos coeficientes de arrasto para o vento na direção X.

Vento Direção X					
Região	Área de Contorno do Reticulado	Área Frontal Efetiva	Índice de Área Exposta (ϕ)	Coeficiente de Arrasto (C_a)	Coeficiente de Arrasto Conjunto (C_{an})
Reticulado Superior	22,36	8,1	0,36	1,67	2,79
Estrutura de Sustentação 1	88,0	14,7	0,17	1,8	4,7
Estrutura de Sustentação 2	71,0	13,5	0,19	1,8	4,7
Estrutura de Sustentação 3	120,7	22,3	0,18	1,8	4,7
Estrutura de Sustentação 4	49,8	12,1	0,24	1,8	1,8

Tabela 6: Determinação dos coeficientes de arrasto para o vento na direção Y.

Vento Direção Y					
Região	Área de Contorno do Reticulado	Área Frontal Efetiva	Índice de Área Exposta (ϕ)	Coeficiente de Arrasto (C_a)	Coeficiente de Arrasto Conjunto (C_{an})
Reticulado Superior	22,36	8,1	0,36	1,67	2,79
Estrutura de Sustentação 1	117,2	23,5	0,2	1,8	4,7
Estrutura de Sustentação 2	117,2	23,5	0,2	1,8	3,24
Estrutura de Sustentação 3	117,2	23,5	0,2	1,8	3,24
Estrutura de Sustentação 4	-	-	-	-	-

3.1.2.2. Sobrecargas

A estrutura está submetida à sobrecarga devido à passagem dos fluidos nas tubulações. As tubulações são utilizadas para transporte de água, exceto para a tubulação de 4 metros de diâmetro, indicada com numeração 20 na Figura 7 e na Figura 10, que realiza o transporte de CO₂ à pressão ambiente. Para a água considerou-se uma densidade de 1000kg/m³ e a sobrecarga devido ao CO₂ foi desconsiderada.

3.2. Elaboração do Modelo Computacional

Um modelo em elementos finitos foi elaborado no programa Metálicas 3D, sendo utilizados como referência os desenhos de projeto da estrutura. Na Figura 15 está apresentada uma vista isométrica do modelo elaborado.

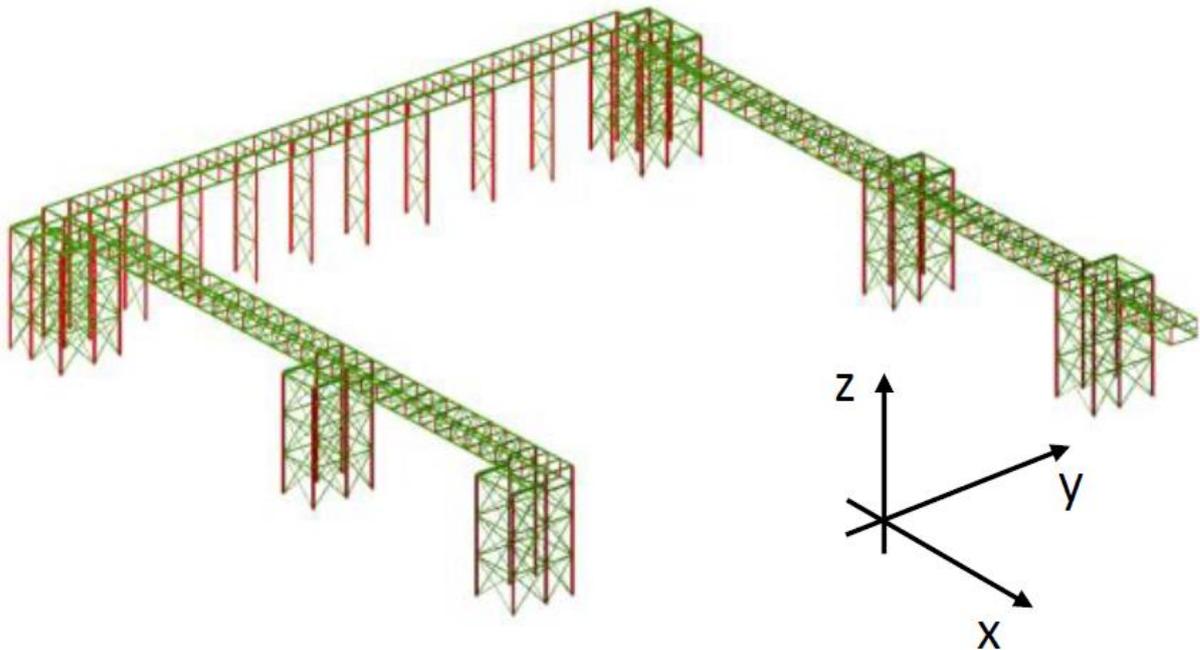


Figura 15: Modelo da estrutura do Pipe Rack elaborado no Metálicas 3D.

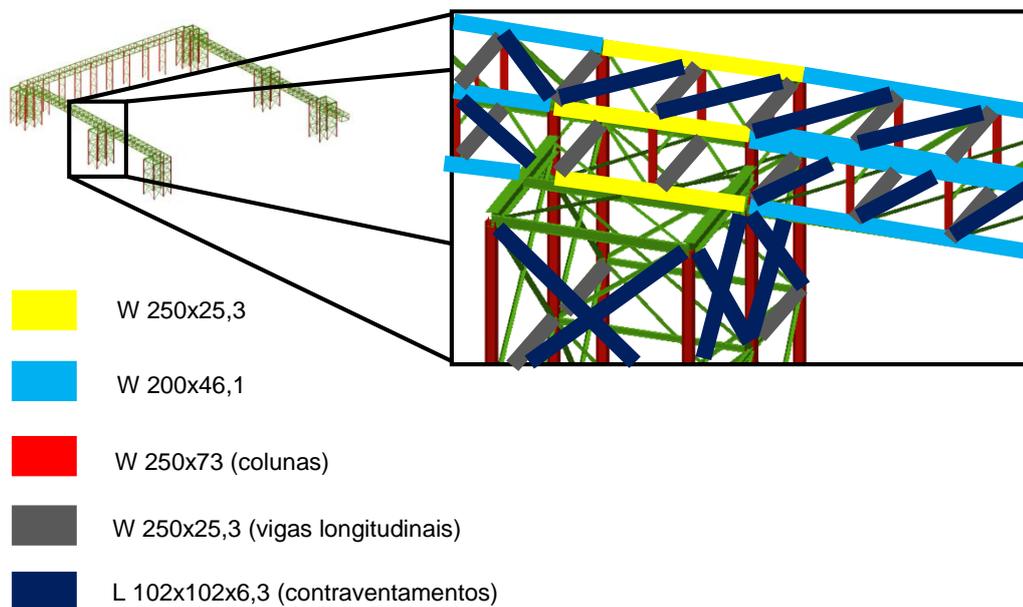


Figura 16: Indicação dos perfis da estrutura.

Exceto para as ligações dos contraventamentos e montantes, todas as ligações entre os perfis da estrutura são rígidas e parafusadas. Na Figura 16 e na Figura 17 estão apresentadas as ligações entre as vigas dos reticulados superiores com as colunas da estrutura.

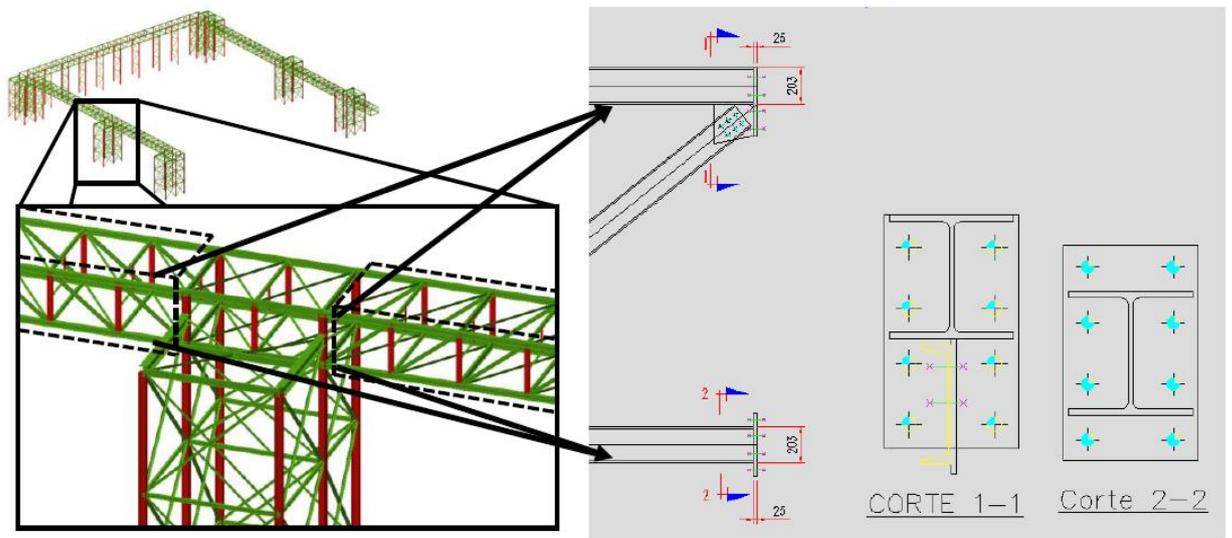


Figura 17: Ligação das vigas dos reticulados com as colunas.

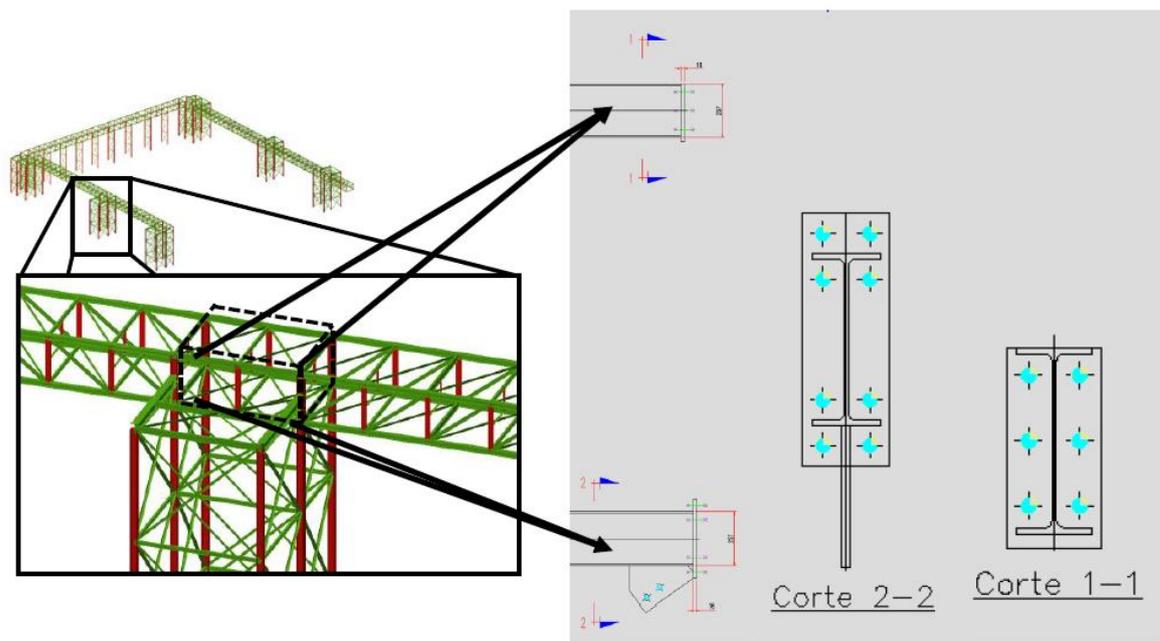


Figura 18 : Ligação das vigas intermediárias dos reticulados com as colunas.

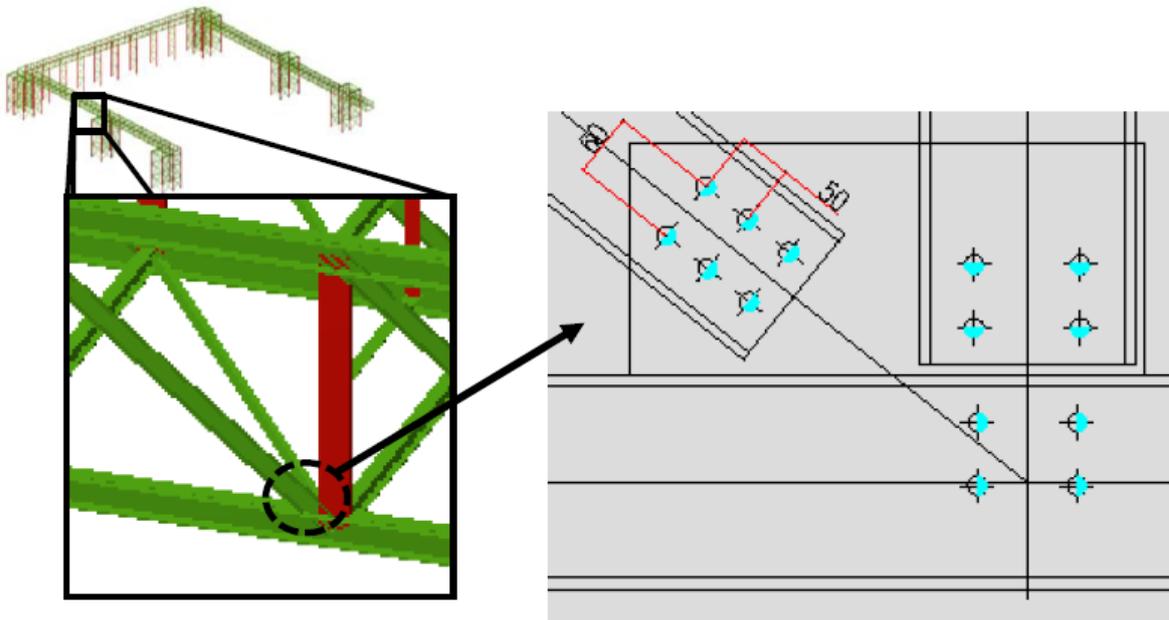


Figura 19: Ligação dos contraventamentos dos reticulados.

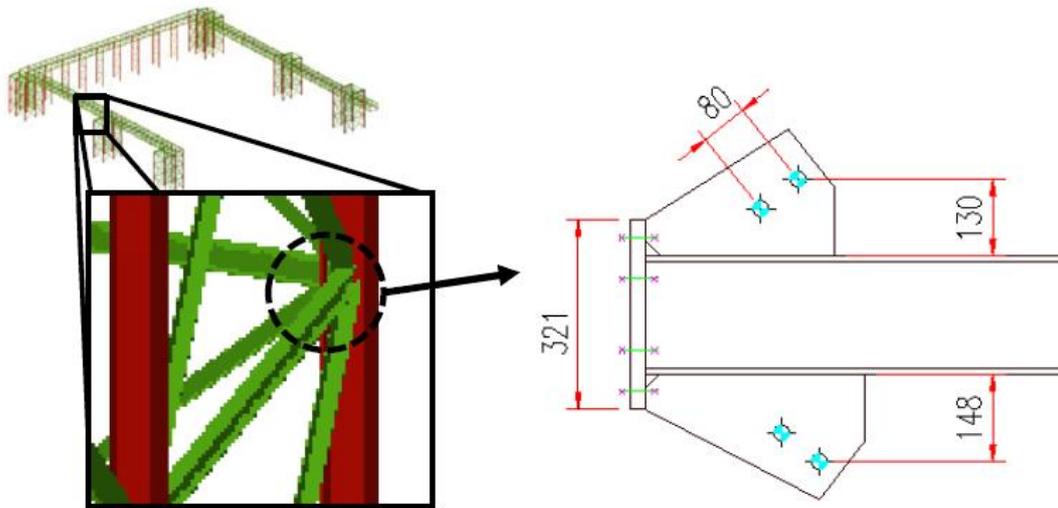


Figura 20 : Indicação do tipo de ligação parafusada das vigas e dos contraventamentos presentes nas colunas.

3.2.1. Aplicação das Condições de Contorno

3.2.1.1. Pontos Fixos da Estrutura

Todas as fixações da estrutura com o solo foram consideradas como engastadas.

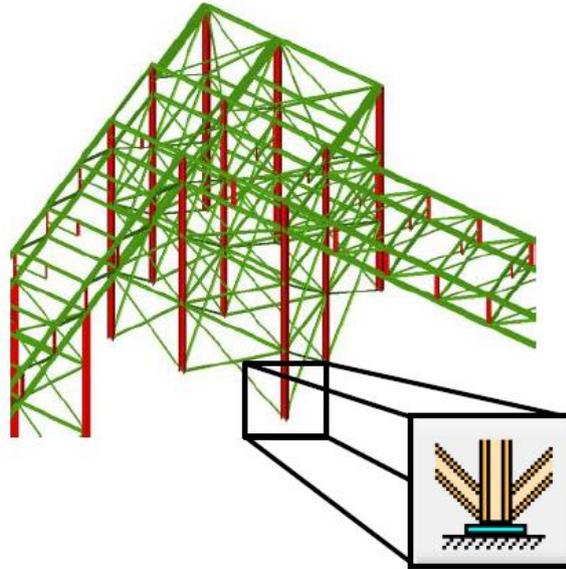


Figura 21: Aplicação de engastamento nas bases da estrutura.

3.2.2. Carregamentos Aplicados na Estrutura

3.2.2.1. Ações Variáveis

As sobrecargas devido à passagem dos fluidos foram aplicadas nos pontos de ligação das tubulações com a estrutura. As tubulações estão fixadas nas vigas transversais dispostas ao longo da estrutura, seguindo as posições apresentadas na Figura 7 à Figura 10. Para simplificar o modelo, algumas tubulações foram agrupadas, sendo criados nós nas regiões centrais de posicionamento dos grupos. Na Tabela 7 estão apresentadas as sobrecargas das tubulações.

Tabela 7: Sobrecargas devido à passagem de fluidos nas tubulações.

Grupos de Tubulações	Tubulação	Número de Nós de Aplicação de Carga na Estrutura	Sobrecarga (kgf)
Grupo 1	1	32	295,4
Grupo 2	3	32	80,9
Grupo 3	5, 6 e 7	32	61,8
Grupo 4	9, 11, 14 e 16	32	29,6
Grupo 5	18 e 19	32	26,1
Grupo 6	21 e 22	32	376,2

Para a aplicação das cargas de vento foi utilizada a ferramenta de Carga Superficial disponível no Metálicas 3D. Nesta ferramenta a carga de vento por unidade de área frontal do reticulado é aplicada nas faces dos reticulados. O programa realiza o cálculo e a aplicação das cargas atuantes nos perfis do reticulado. Utilizando-se os coeficientes de arrasto apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, a equação abaixo pode ser utilizada para determinação o valor da força devido ao vento por unidade de área frontal dos reticulados:

$$Q = C_{an} \cdot q \cdot A_e / A \quad [\text{kgf/m}^2]$$

Na Tabela 8 estão apresentadas as cargas de vento encontradas, para as regiões identificadas na Figura 13 e na Figura 14, considerando vento atuando nas direções X e Y.

Tabela 8: Resultados da ação do vento nos reticulados.

Carga de Vento [kgf/m ²]		
Região	Vento Direção X	Vento Direção Y
Estrutura de Sustentação 1	71,9	86,1
Estrutura de Sustentação 2	81,7	59,6
Estrutura de Sustentação 3	19,1	86,1
Estrutura de Sustentação 4	40,1	-
Região	Vento Perpendicular	Vento Paralelo
Reticulado Superior	92,2	-

3.2.2.2. Cargas Permanentes

A carga permanente devido ao peso próprio dos perfis da estrutura é calculada e aplicada automaticamente pelo programa Metálicas 3D, sendo esta carga inserida como carga distribuída.

A carga permanente devido ao peso das tubulações foi aplicada nos pontos de ligação das tubulações com a estrutura, seguindo as posições apresentadas na Figura 7 à Figura 10. Assim como na aplicação das sobrecargas, grupos de tubulações foram criados para simplificar o modelo. Na Tabela 9 estão apresentadas as cargas permanentes das tubulações.

Tabela 9: Cargas devido ao peso próprio das tubulações.

Grupos de Tubulações	Tubulação	Número de Nós de Aplicação de Carga na Estrutura	Carga (kgf)
Grupo 1	1	32	233,5
Grupo 2	3	32	106,6
Grupo 3	5, 6 e 7	32	120,9
Grupo 4	9, 11, 14 e 16	32	85,2
Grupo 5	18 e 19	32	54,0
Grupo 6	20	7	9023,5
Grupo 7	21 e 22	32	340,2

O peso próprio do conjunto calha e cabos foi aplicado em todas as vigas transversais superiores da estrutura, a Figura 21 apresenta os pontos de aplicação das cargas. Considerando as cargas apresentadas na Tabela 7, uma carga resultante de 532,5 kg foi aplicada em cada viga.

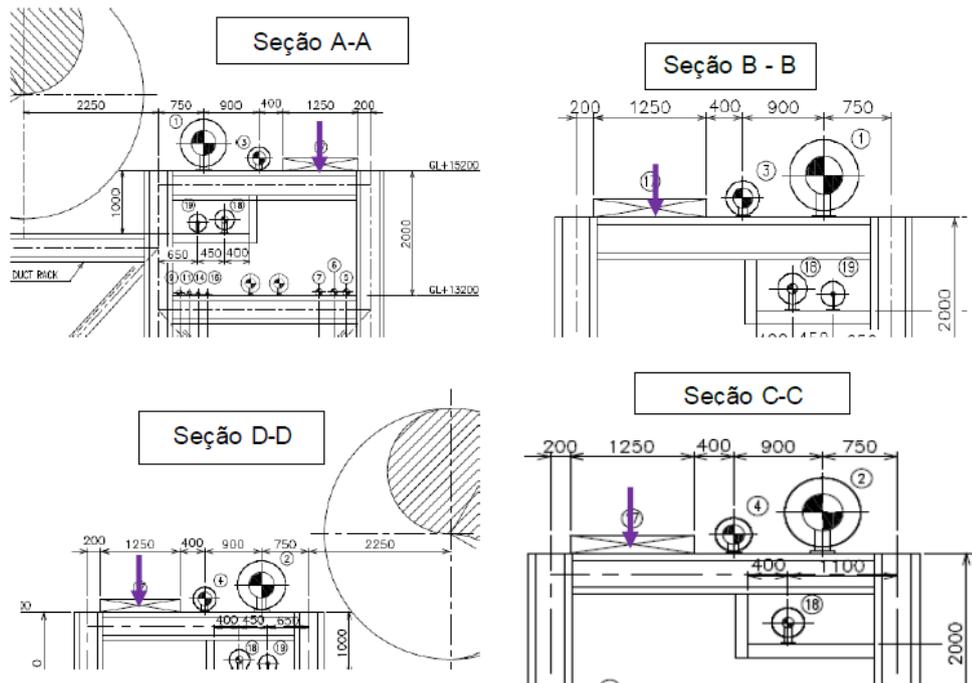


Figura 22: Pontos de aplicação das cargas devido ao conjunto calha e cabos.

3.3. Verificação dos Perfis da Estrutura

Após a introdução das seções transversais dos perfis e definição das condições de contorno, o programa Metálicas 3D realizou o cálculo estrutural para determinação dos esforços solicitantes. Para a análise da estrutura do PipeRack optou-se pela norma ABNT NBR 8800:2008 para a verificação dos perfis estruturais e para os fatores de carga e combinações de ações. Esta escolha foi realizada pela não existência de uma norma específica para este tipo de estrutura metálica.

Após a verificação, o programa Metálicas 3D indicou quais os perfis estruturais não atendem os requisitos de resistência sendo informadas as combinações de ações mais críticas.

3.4. Verificação das Ligações

O programa Metálicas 3D não realiza o cálculo das ligações metálicas, sendo este realizado a parte. Com os resultados obtidos no modelo computacional, foram identificadas as ligações mais solicitadas da estrutura. Para estas ligações

calcularam-se os esforços resistentes de cálculo sendo estes comparados com os esforços solicitantes.

4. RESULTADOS

4.1. Classificação da Estrutura Quanto à Deslocabilidade

A classificação pode ser aproximada de maneira aceitável pelo cálculo do coeficiente B2 da ABNT NBR 8800:2008, o qual pode ser determinado pela seguinte equação:

$$B2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{R_s}\right) * \left(\frac{\Delta h}{h}\right) * \left(\frac{\sum N_{sd}}{\sum H_{sd}}\right)}$$

Na Figura 23 está apresentado um croqui da região onde foi obtido o deslocamento horizontal da estrutura, sendo para este resultado consideradas as ações apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Ações e coeficientes utilizados para determinação de B2.

	Carga Considerada	Coeficiente
$\sum N_{sd}$	Peso Próprio da Estrutura	1,4
	Cargas Permanentes	1,4
	Sobrecargas	0,975
$\sum H_{sd}$	Vento	1,4

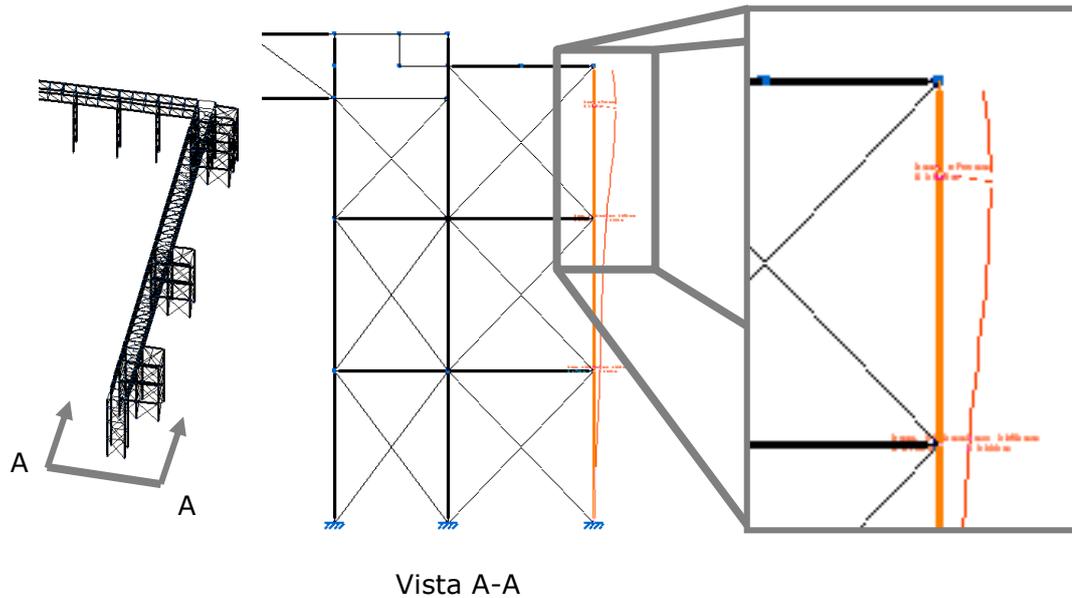


Figura 23: Obtenção do deslocamento lateral da estrutura para determinação da classificação da estrutura.

Para a estrutura em análise, os seguintes resultados foram obtidos:

$$B2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{R_s}\right) * \left(\frac{\Delta h}{h}\right) * \left(\frac{\sum N_{sd}}{\sum H_{sd}}\right)} = 1,002$$

Sendo:

R_s : 1,0

Δh : 9,5 mm

h : 15,2 m

$\sum N_{sd}$: 209,1 tf

$\sum H_{sd}$: 54,1 tf

Conclui-se que a estrutura em análise é classificada como de pequena deslocabilidade. Para esta classificação de estrutura, ao contrário das estruturas de média e grande deslocabilidade, permite-se que o estudo seja realizado por meio de uma análise de primeira ordem desde que as seguintes restrições sejam atendidas:

- Os esforços axiais solicitantes de cálculo que atuam nos perfis que contribuem com rigidez à flexão para a estabilidade lateral da estrutura, em cada uma das combinações últimas de ações não sejam superiores a 50% da força axial correspondente ao escoamento da seção transversal dessas barras;
- As forças normais sejam aplicadas às respectivas combinações, inclusive àquelas em que atuem ações variáveis devidas ao vento.

A rigidez lateral da estrutura em análise é proveniente de colunas treliçadas, com isso não é dependente da rigidez à flexão dos perfis principais de formam as colunas. Como resultado, aplicou-se as forças normais, inclusive nas combinações em que atuem ações horizontais devidas ao vento, e uma análise de 1ª ordem foi realizada para a verificação da estrutura do PipeRack.

4.2. Verificação dos Perfis

Verificou-se que em cinco elementos da estrutura os esforços solicitantes superaram os esforços resistentes de cálculo. Os perfis mais solicitados da estrutura estão indicados na Figura 24 à Figura 27.

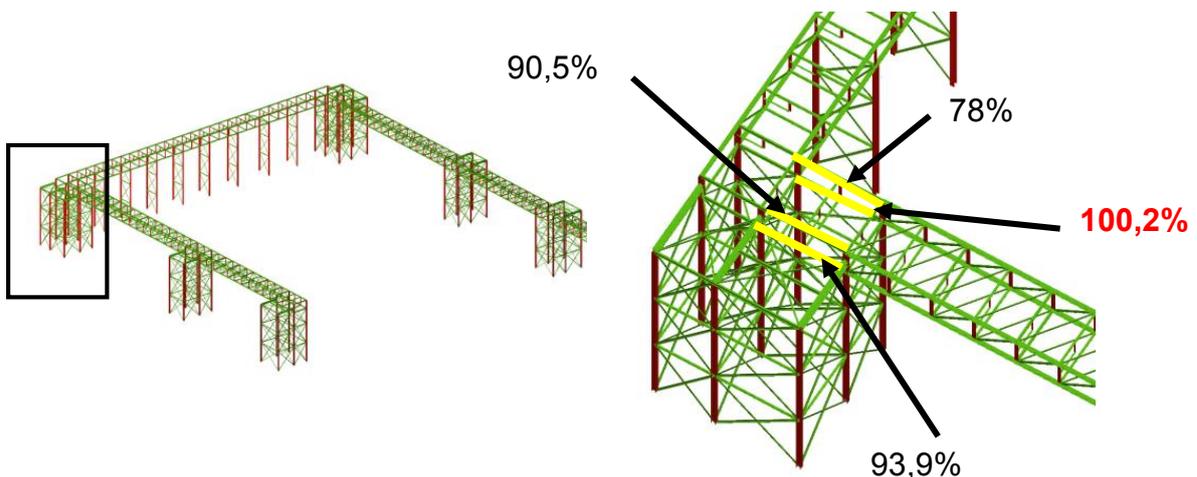


Figura 24: Vigas com alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01.

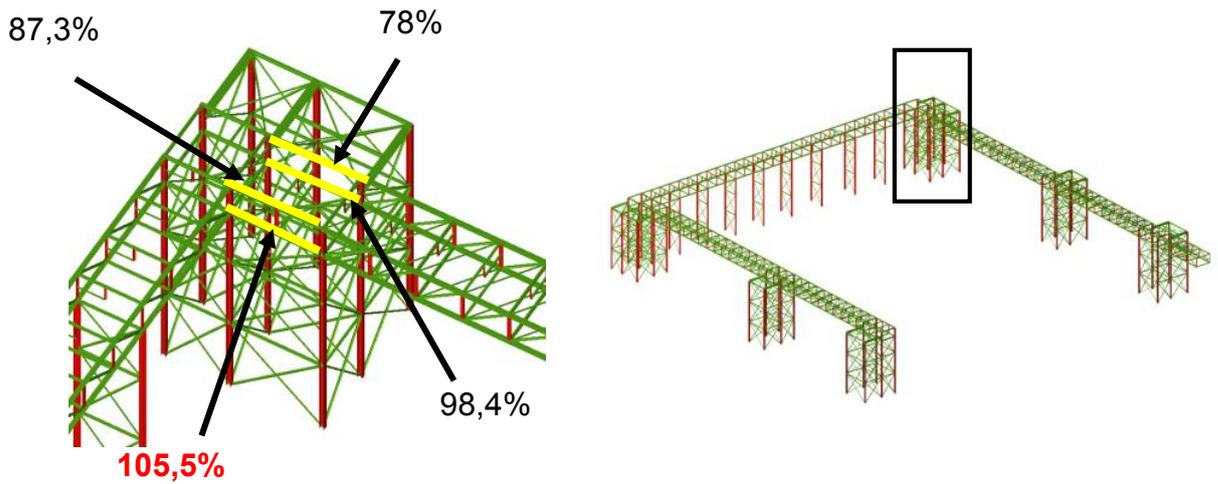


Figura 25: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01.

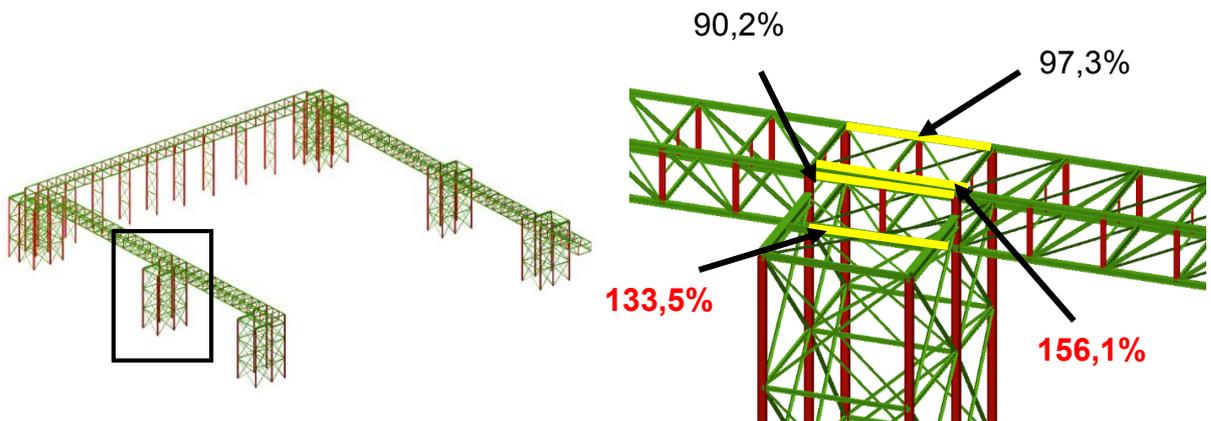


Figura 26: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02.

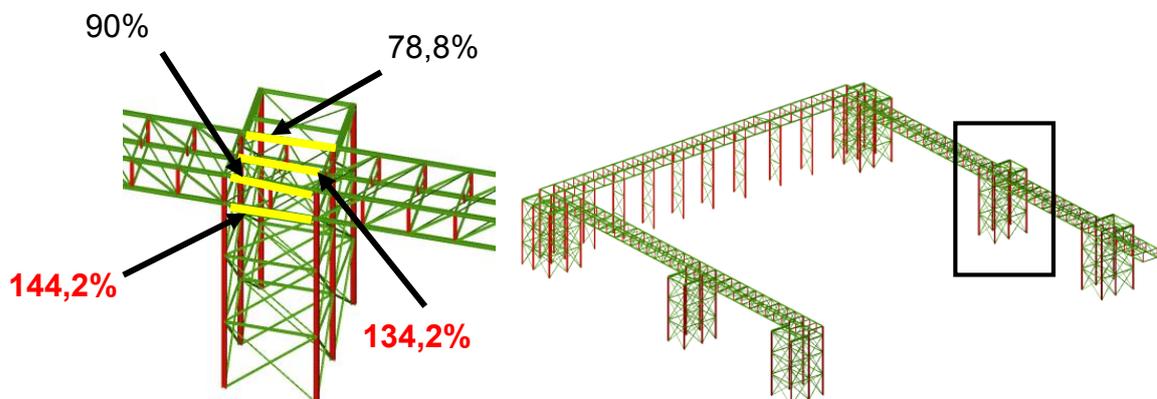


Figura 27: Vigas alto índice de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02.

4.3. Verificação das Ligações

A verificação foi realizada para as ligações dos perfis que apresentaram significativo aumento dos esforços solicitantes para a nova condição de operação. Na Figura 28 estão apresentadas as ligações verificadas.

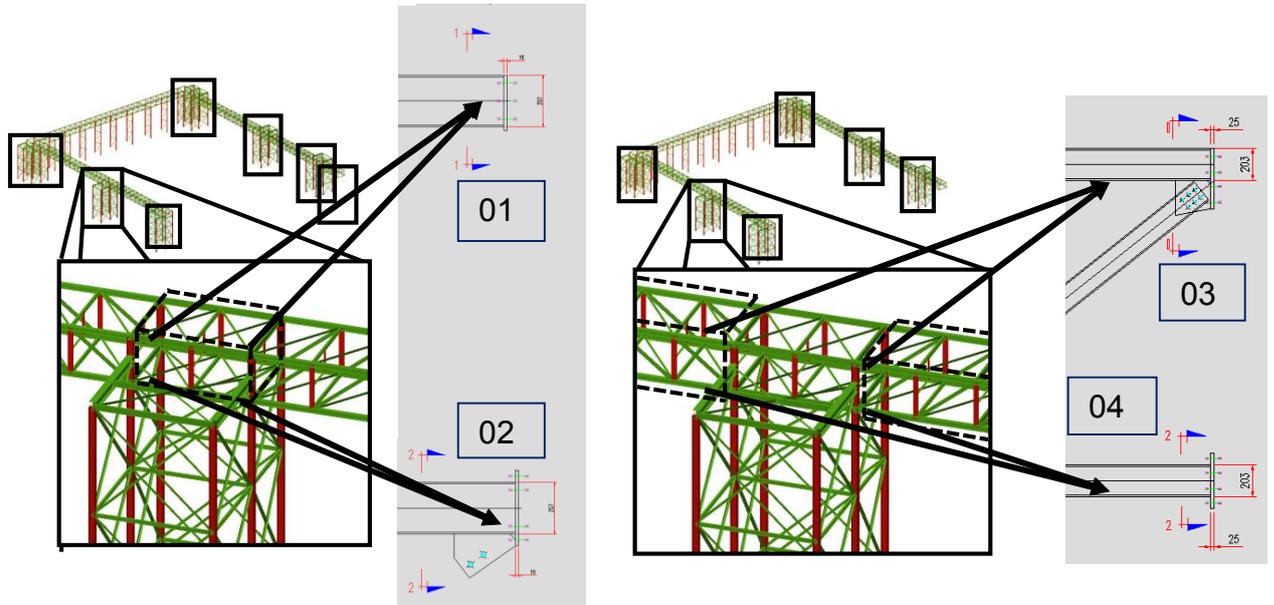


Figura 28: Ligações que apresentaram aumento significativo de solicitação para a nova condição de operação.

Na Tabela 11 estão apresentadas as verificações realizadas nas ligações e os resultados obtidos, sendo apresentados no Anexo A os cálculos realizados.

Tabela 11: Verificação das ligações mais solicitadas indicadas na Figura 28.

Item	Verificação	Ligação			
		01	02	03	04
Parafusos	Cisalhamento	✓	✓	✓	✓
	Tração	X	✓	✓	✓
	Tensão de Contato com a Chapa de Extremidade	✓	✓	✓	✓
	Tensão de Contato com a Mesa da Coluna	✓	✓	✓	✓
Chapa de Extremidade	Rasgamento	✓	✓	✓	✓
	Efeito Alavanca	X	✓	X	✓
Soldas da Viga com a Chapa de Extremidade	Tração da Solda da Mesa	X	✓	X	✓
	Cisalhamento da Solda	✓	✓	✓	✓
	Esforço Combinado de Cisalhamento e Tração	X	✓	X	✓
Coluna	Tração/Compressão dos Enrijecedores	X	✓	X	✓
	Cisalhamento do Painel	✓	✓	✓	✓
Legenda: ✓ : Aprovado X : Reprovado					

Verifica-se que as ligações 03 e 04 estão reprovadas na verificação do efeito alavanca. Este resultado ocorre devido principalmente devido ao incremento de esforço normal de tração nas vigas longitudinais superiores.

4.4. Modificações Estruturais

Tornam-se necessárias modificações para aumento da capacidade portante da estrutura. Recomenda-se a substituição das oito vigas indicadas na Figura 24 à Figura 27. Estas vigas são compostas pelo perfil W 250x25,3, recomendando-se a substituição pelo perfil W200x46,1.

Adicionalmente recomenda-se a adoção de chapas adicionais, como indicado na Figura 29, nas ligações que não atenderam os requisitos mínimos de resistência, apresentados na Tabela 11.

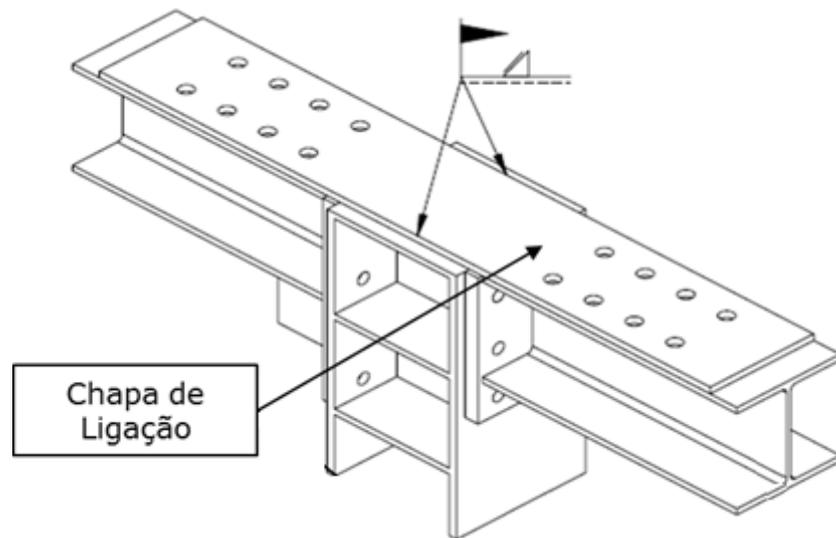


Figura 29: Chapa adicional de ligação.

Verificou-se que as chapas a serem instaladas para reforçar as ligações 01 e 03, apresentadas na Figura 28, deverão apresentar as configurações indicadas na Figura 30.

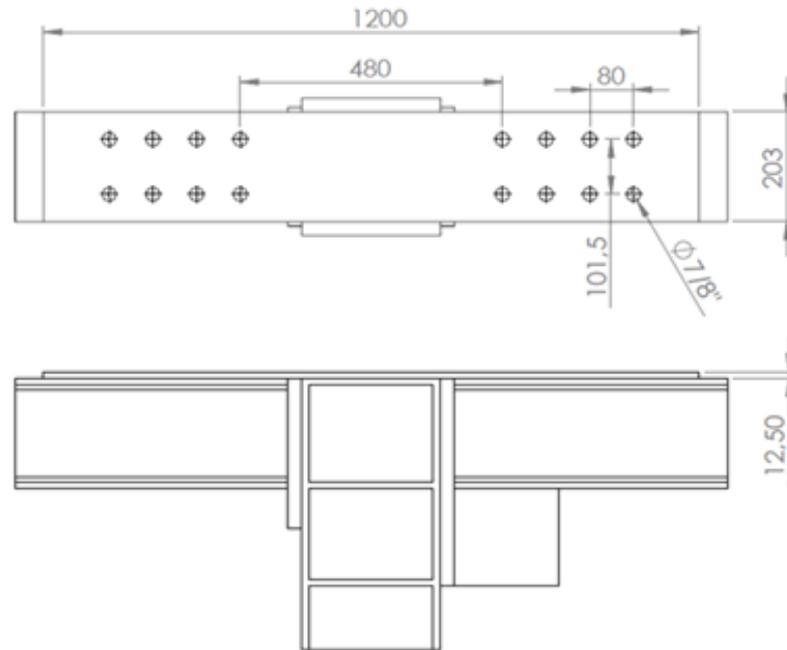


Figura 30: Configurações da chapa adicional de ligação.

Os novos índices de utilização dos perfis modificados estão apresentados na Figura 31 à Figura 34, sendo apresentados no Anexo B os cálculos para a chapa de adicional de ligação.

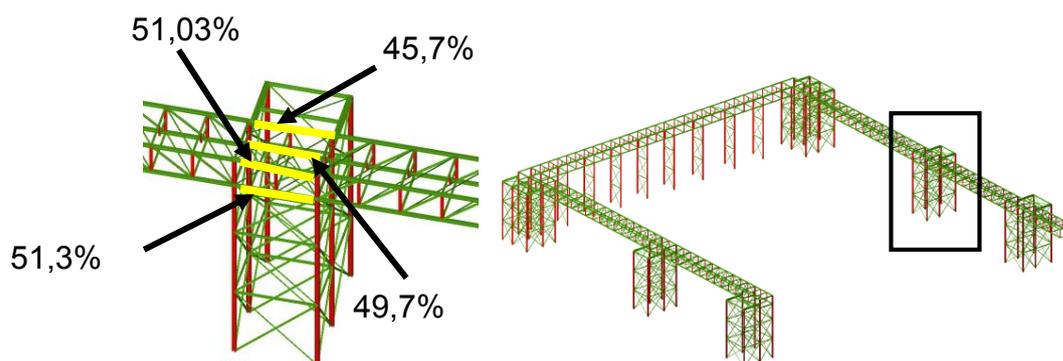


Figura 31: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02 após modificações dos perfis.

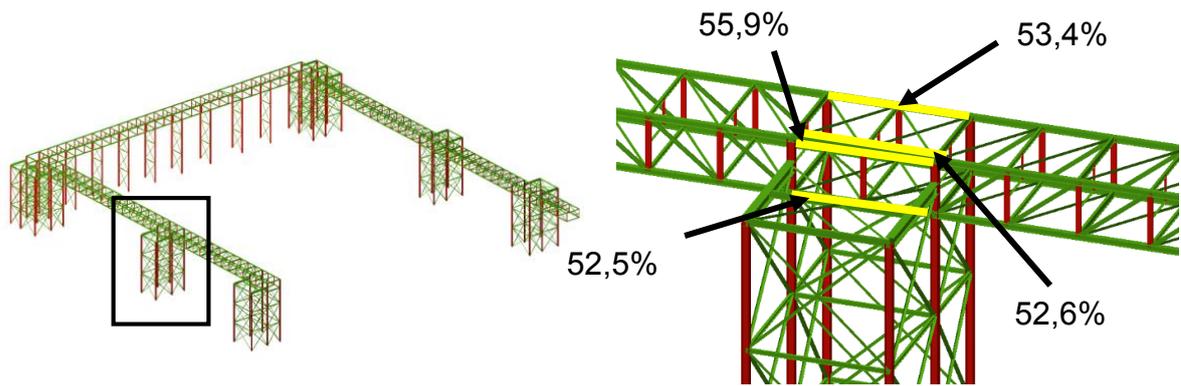


Figura 32: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 02 após modificações dos perfis.

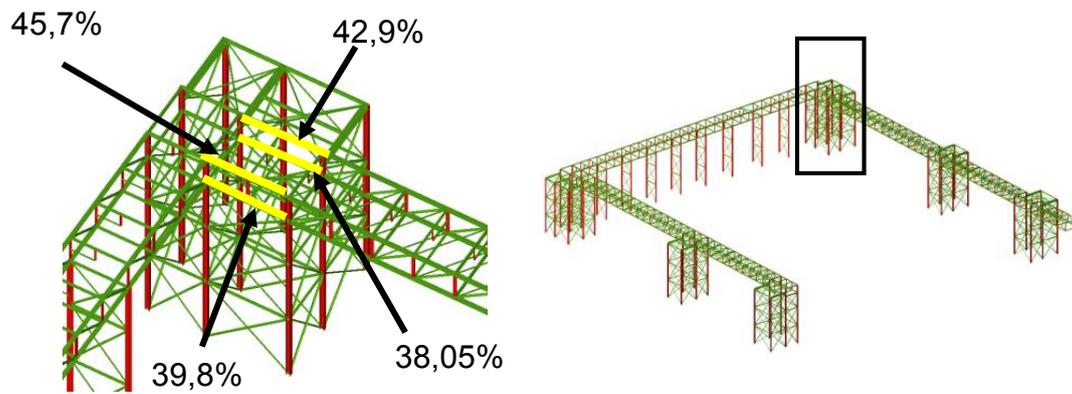


Figura 33: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01 após modificações dos perfis.

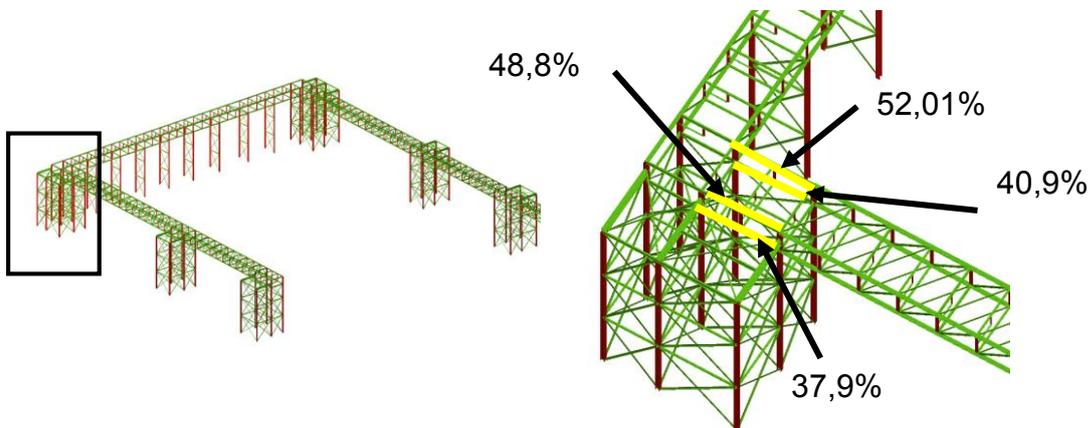


Figura 34: Índices de utilização no reticulado superior entre as colunas da estrutura de sustentação 01 após modificações dos perfis.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a verificação da estrutura de um Pipe Rack face a um acréscimo de cargas de projeto. Diante dos resultados, concluiu-se que a estrutura não atende os requisitos de segurança indicados pela norma ABNT NBR 8800, sendo necessárias modificações estruturais.

Conclui-se que a estrutura do Pipe Rack analisado não está aprovada para operar com segurança na condição de instalação de tubulações adicionais segundo a norma ABNT NBR8800:2008, sendo necessária a realização de modificações estruturais.

Verificou-se que oito vigas longitudinais dos reticulados superiores (W250x25,3), posicionadas entre as colunas, apresentaram esforços resistentes de cálculo inferiores aos esforços solicitantes. Adicionalmente identificou-se que as ligações metálicas das vigas longitudinais superiores com as colunas também apresentaram esforços solicitantes superiores aos esforços resistentes.

O estudo indicou que os perfis reprovados W250x25,3 indicados devem ser substituídos por perfis W200x46,1 e as ligações deverão ser reforçadas com chapas adicionais, como indicado na Figura 30. Após as modificações recomendadas, as tubulações adicionais poderão ser instaladas na estrutura do Pipe Rack.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT NBR 8800, Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, 2008.

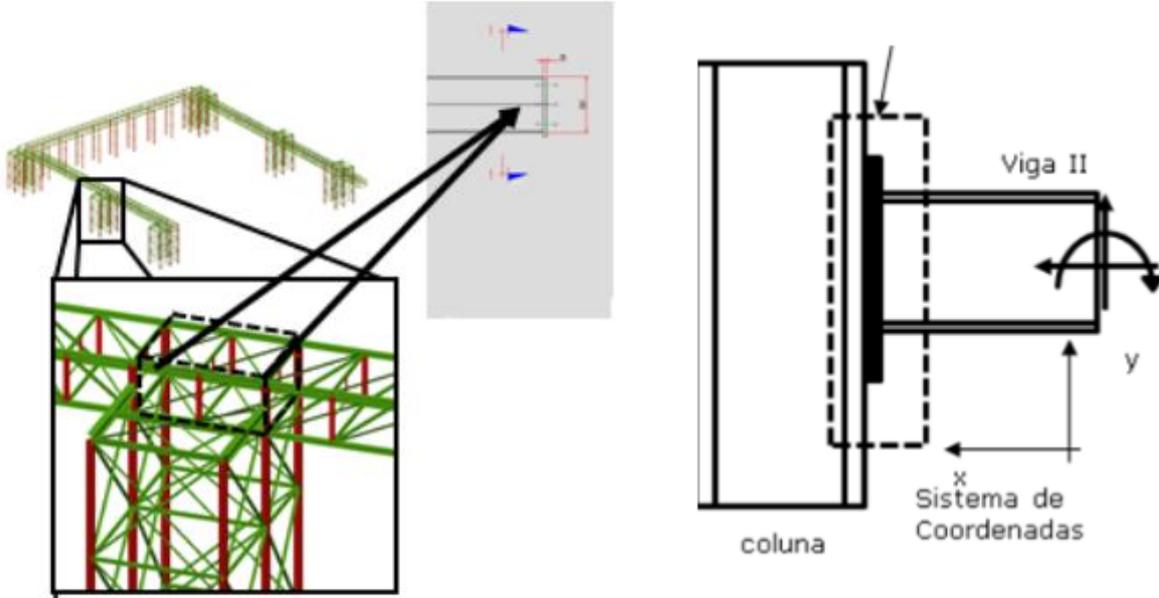
[2] ABNT NBR 6123, Forças Devidas ao Vento em Edificações, 1988.

[3] ABNT NBR 6120, Cargas para o Cálculo de Estruturas e Edificações, 1980.

ANEXO A – VERIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES METÁLICAS

A.1 Verificação da Ligação 01

1. Identificação da ligação avaliada:



Esforços Solicitantes

$$F_{x_{II}} := (-387,97) \text{ kN}$$

$$F_{y_{II}} := (-19,67) \text{ kN}$$

$$F_{z_{II}} := 0,13 \text{ kN}$$

$$M_{z_{II}} := (30,17) \text{ kN m}$$

$$M_{y_{II}} := 0,25 \text{ kN m}$$

2. Verificação dos Parafusos

Material dos parafusos: ASTM A325

Tensão de ruptura dos parafusos:

$$f_{ub} := 825 \text{ MPa}$$

Tensão de escoamento dos parafusos:

$$f_{yb} := 635 \text{ MPa}$$

Número total de parafusos:

$$n_p := 6$$

Diâmetro dos parafusos:

$$D_p := \frac{3}{4} \text{ in} = 19,05 \text{ mm}$$

Área bruta da seção dos parafusos:

$$A_g := \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 = 285,02 \text{ mm}^2$$

Área líquida da seção dos parafusos:

$$A_p := A_g \cdot 0,75 = 213,77 \text{ mm}^2$$

Ceficiente de ponderação da resistência do parafuso:

$$\varphi_a2 := 1,35$$

Força resistente de tração máxima do parafuso:

$$F_{tr_p} := \frac{A_p \cdot f_{ub}}{\varphi_a2} = 130,64 \text{ kN}$$

Força resistente de corte máxima do parafuso:

$$F_{dr_p} := \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_{ub}}{\varphi_a2} = 69,67 \text{ kN}$$

Inércia da seção dos parafusos:

Em relação ao eixo z:

$$I_{z_p} := 4 \cdot A_p \cdot (90 \text{ mm})^2 = 692,61 \text{ cm}^4$$

Em relação ao eixo y:

$$I_{y_p} := 6 \cdot A_p \cdot (35 \text{ mm})^2 = 157,12 \text{ cm}^4$$

Determinação dos esforços de tração solicitantes nos parafusos:

$$\sigma_p := \frac{-F_{x_{II}}}{n_p \cdot A_p} + \frac{M_{z_{II}}}{I_{z_p}} \cdot (90 \text{ mm}) + \frac{M_{y_{II}}}{I_{y_p}} \cdot (35 \text{ mm}) = 700,1 \text{ MPa}$$

Máxima tração atuante no parafuso:

$$F_{ts_p} := \sigma_p \cdot A_p = 149,66 \text{ kN} > F_{tr_p} = 130,64 \text{ kN}$$

Reprovado !

Determinação dos esforços de cisalhamento nos parafusos:

Direção vertical:

$$\tau_{v_p} := \frac{F_{y_{II}}}{n_p \cdot A_p} = -15,34 \text{ MPa}$$

Direção lateral:

$$\tau_{h_p} := \frac{F_{z_{II}}}{n_p \cdot A_p} = 0,1 \text{ MPa}$$

Tensão resultante:

$$\tau_p := \sqrt{\tau_{v_p}^2 + \tau_{h_p}^2} = 15,34 \text{ MPa}$$

Esforço total de corte no parafuso:

$$F_{ds_p} := \tau_p \cdot A_p = 3,28 \text{ kN} \leq F_{dr_p} = 69,67 \text{ kN}$$

Aprovado !

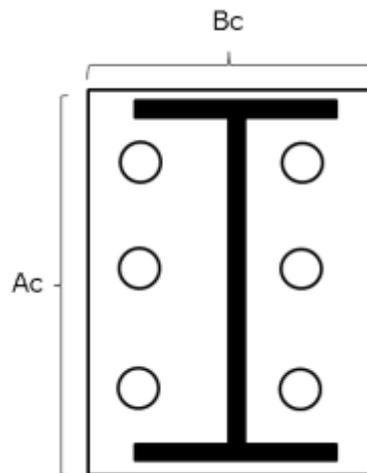
Verificação da tração e cisalhamento combinados:

$$\left(\frac{F_{ts_p}}{F_{tr_p}} \right) + \left(\frac{F_{ds_p}}{F_{dr_p}} \right) = 1,19 > 1,0$$

Reprovado !

2. Verificação da Chapa de Extremidade

Dimensões da Chapa:



Largura:

$$B_c := 130 \text{ mm}$$

Comprimento da chapa:

$$A_c := 277 \text{ mm}$$

Espessura:

$$t_c := 16 \text{ mm}$$

Diâmetro dos furos:

$$D_f := 21 \text{ mm}$$

Material considerado para a chapa: A36

Resistência à ruptura da chapa:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento da chapa:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda lateral da chapa:

$$l_c := 30 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} = 19,5 \text{ mm}$$

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo da chapa de extremidade com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 138,67 \text{ kN}$$

Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 3,28 \text{ kN} \leq R_{dc} = 138,67 \text{ kN}$$

Aprovado !

Máxima carga atuante de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da chapa de extremidade:

Considerando a força de corte vertical (direção y):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot t_c \cdot (38 \text{ mm} + 180 \text{ mm}) = 69,76 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - 2 \cdot 2,5 \cdot D_f \cdot t_c = 52,96 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := t_c \cdot \left(30 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} \right) = 3,12 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Força resistente:

R_{dr} : Menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1033,96 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 867,56 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 867,56 \text{ kN}$$

Força solicitante:

$$R_{dr_s} := |F_{y\ II}| = 19,67 \text{ kN} \leq R_{dr} = 867,56 \text{ kN}$$

Aprovado !

Considerando a força de corte lateral (direção z):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 30 \text{ mm} \cdot t_c = 9,6 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_c = 6,24 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 180 \text{ mm} \cdot t_c - 2 \cdot D_f \cdot t_c = 22,08 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Esforço resistente:

R_{dr} : Menor valor entre:

$$\frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 765,16 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 760,89 \text{ kN}$$

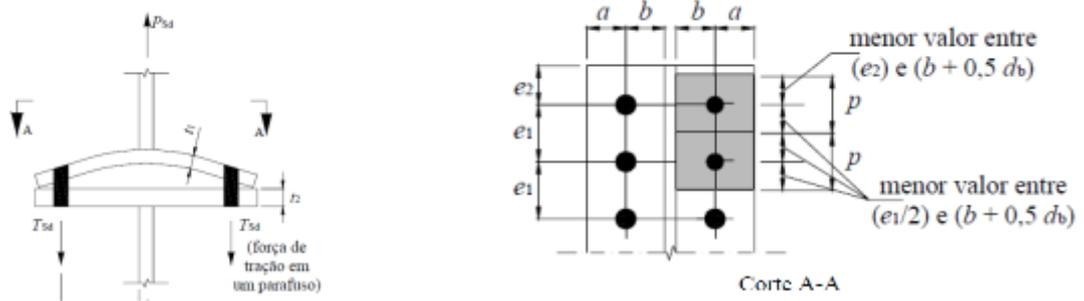
$$R_{dr} := \frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 760,89 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$R_{dr_s} := F_{z\ II} = 0,13 \text{ kN} \leq R_{dr} = 760,89 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da chapa de extremidade considerando efeito alavanca:



Distância do furo da chapa de extremidade à alma da viga:

$$b := 35 \text{ mm}$$

Esforço de tração solicitante no parafuso:

$$T_{sd} := F_{ts} = 149,66 \text{ kN}$$

Momento atuante devido ao efeito alavanca:

$$M_{sd} := T_{sd} \cdot b = 523,8 \text{ kN cm}$$

Distância vertical entre os furos:

$$e1 := 90 \text{ mm}$$

Distância do furo à borda superior da chapa de extremidade:

$$e2 := 38 \text{ mm}$$

Comprimento de ação do efeito alavanca:

$$p := \frac{e1}{2} + e2 = 83 \text{ mm}$$

Momento resistente de cálculo considerando efeito alavanca:

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$M_{rd} := \frac{f_u \cdot p \cdot t_c^2}{4 \cdot \gamma_{a1}} = 193,16 \text{ kN cm}$$

$$M_{sd} = 523,8 \text{ kN cm} \geq M_{rd} = 193,16 \text{ kN cm}$$

Reprovado !

3. Verificação da Coluna na Região de Ligação

Perfil da coluna: W250 X 73

Dimensões da mesa do perfil da coluna:

Largura:

$$B := 254 \text{ mm}$$

Espessura da mesa:

$$t_{\text{f}} := 14,2 \text{ mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_{\text{w}} := 8,6 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d := 253 \text{ mm}$$

Diâmetro do furo:

$$D_{\text{f}} := 21 \text{ mm}$$

Material da coluna: A 36

Resistência à ruptura:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda da mesa do perfil:

lc: menor valor entre:

$$\frac{B - (70 \text{ mm} - D_{\text{f}})}{2} = 102,5 \text{ mm}$$

$$90 \text{ mm} - D_{\text{f}} = 69 \text{ mm}$$

$$l_c := 90 \text{ mm} - D_f = 69 \text{ mm}$$

Máxima carga de cisalhamento considerando escoamento da área de contato do furo da mesa do perfil com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 490,67 \text{ kN}$$

Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 3,28 \text{ kN} \leq R_{dc} = 490,67 \text{ kN}$$

Aprovado!

Máxima carga de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da mesa da coluna:

Considerando a força de corte lateral (direção z):

Área bruta sujeita à cisalhamento

$$A_{gv} := 2 \cdot t_f \cdot \left(\frac{B - 70 \text{ mm}}{2} \right) = 26,13 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à cisalhamento

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_c = 22,77 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração

$$A_{nt} := 180 \text{ mm} \cdot t_c - 3 \cdot D_f \cdot t_c = 18,72 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

R_{dr} : menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 959,43 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 844,98 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 844,98 \text{ kN}$$

Força solicitante considerando rasgamento da mesa da coluna:

$$R_{dr_s} := |F_{y_{II}}| = 19,67 \text{ kN} \leq R_{dr} = 844,98 \text{ kN}$$

Aprovado !

Especificação da viga:

Espessura da mesa:

$$t_{f_viga} := 8,4 \text{ mm}$$

Espessura da alma;

$$t_{w_viga} := 6,1 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d_{viga} := 257 \text{ mm}$$

Largura da mesa da viga:

$$b_{f_viga} := 102 \text{ mm}$$

Especificações do perfil da coluna:

Espessura da alma:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d := 253 \text{ mm}$$

Verificação do Cisalhamento na Zona do Painel de Alma

Esforços na ligação oposta:

$$\varphi := 60$$

$$F_t := 253,03 \text{ kN}$$

Esforços totais na ligação:

$$F_{x_I} := 225,33 \text{ kN} + F_t \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 444,46 \text{ kN}$$

$$F_{y_I} := (-20,18) \text{ kN} + F_t \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 106,34 \text{ kN}$$

$$Fz_I := (-0,25) \text{ kN}$$

$$Mz_I := (-31,28) \text{ kN m}$$

$$My_I := 0,45 \text{ kN m}$$

Força de corte resultante na coluna:

$$Fsd := \left(\frac{Fx_I}{2} + \frac{-Mz_I}{d_{\text{viga}}} \right) - \left(\frac{-Fx_{II}}{2} + \frac{Mz_{II}}{d_{\text{viga}}} \right) = 32,56 \text{ kN}$$

$$Fsd := \left(\frac{Fx_I}{2} + \frac{Mz_I}{d_{\text{viga}}} \right) - \left(\frac{-Fx_{II}}{2} + \frac{-Mz_{II}}{d_{\text{viga}}} \right) = 23,93 \text{ kN}$$

Força resistente para a força cortante:

$$Frd := \frac{0,6 \cdot fy \cdot d \cdot t_w}{\gamma_{a1}} = 296,7 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da Flambagem da Alma da Coluna por Compressão

$$h := d = 253 \text{ mm}$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

$$Frd := \frac{24 \cdot t_w^3 \cdot \sqrt{E \cdot fy}}{\gamma_{a1} \cdot h}$$

$$Fsd := \left(\frac{Fx_I - Fx_{II}}{2} \right) = 416,22 \text{ kN} \leq Frd = 397,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

(Esforço de tração)

(Esforço de compressão)

3. Verificação da Viga na Região de Ligação

Verificação da Solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade

Tensão de ruptura do metal de solda:

$$f_w := 48,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} = 486 \text{ MPa}$$

Coeficiente de ponderação da resistência da solda:

$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Tensão resistente da solda:

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Área da solda:

$$A_w := 2 \cdot 0,707 \cdot (8 \text{ mm}) \cdot (bf_{\text{viga}}) + d_{\text{viga}} \cdot (6 \text{ mm}) \cdot 0,707 \cdot 3 = 44,24 \text{ cm}^2$$

Tensão solicitante:

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{yI}}{A_w} = 24,03 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wsd} = 24,03 \text{ MPa} \leq \tau_{wrd} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

Verificação da solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade

$$\sigma_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Área de trabalho do metal de solda:

$$A_w := 2 \cdot 0,707 \cdot (8 \text{ mm}) \cdot (bf_{\text{viga}}) + d_{\text{viga}} \cdot (6 \text{ mm}) \cdot 0,707 \cdot 3 = 44,24 \text{ cm}^2$$

$$I_{wz} := \left(2 \cdot 0,707 \cdot (8 \text{ mm}) \cdot (bf_{\text{viga}}) \right) \cdot \left(\frac{d_{\text{viga}}}{2} + \frac{t_{f \text{ viga}}}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot 0,707 \cdot (6 \text{ mm}) \cdot d_{\text{viga}}^3}{12} = 3231,91 \text{ cm}^4$$

$$I_{wy} := \frac{2 \cdot 0,707 \cdot (8 \text{ mm}) \cdot bf_{\text{viga}}^3}{12} = 100,04 \text{ cm}^4$$

Força de tração na mesa da viga:

$$\sigma_{wsd} := \frac{F_{xI}}{A_w} + \frac{(-M_{zI}) \cdot \frac{d_{\text{viga}}}{2}}{I_{wz}} + \frac{(M_{yI}) \cdot \frac{bf_{\text{viga}}}{2}}{I_{wy}} = 247,77 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{yI}}{A_w} + \frac{F_{zI}}{A_w} = 23,98 \text{ MPa}$$

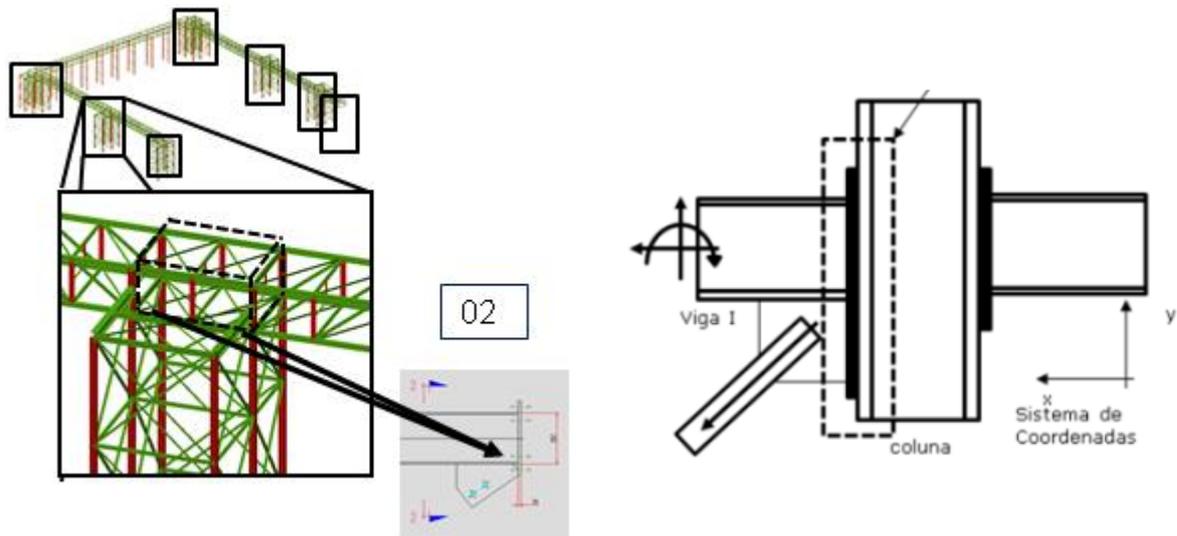
Tensão equivalente solicitante na solda da mesa da viga na chapa de extremidade:

$$\sqrt{\sigma_{wsd}^2 + \tau_{wsd}^2} = 248,92 \text{ MPa} > \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Reprovado !

A.2 Verificação da Ligação 02

1. Identificação da ligação avaliada:



Contraventamento:

$$\varphi := 60$$

$$F_t := 41,68 \text{ kN}$$

Esforços totais na ligação:

$$F_{x_I} := (-339,45) \text{ kN} + F_t \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = -303,35 \text{ kN}$$

$$F_{y_I} := (11,5) \text{ kN} + F_t \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 32,34 \text{ kN}$$

$$F_{z_I} := (0,42) \text{ kN}$$

$$M_{z_I} := (-19,14) \text{ kN m}$$

$$M_{y_I} := 0,67 \text{ kN m}$$

2. Verificação dos Parafusos

Material dos parafusos: ASTM A325

Tensão de ruptura dos parafusos:

$$f_{ub} := 825 \text{ MPa}$$

Tensão de escoamento dos parafusos:

$$f_{yb} := 635 \text{ MPa}$$

Número total de parafusos:

$$n_p := 8$$

Diâmetro dos parafusos:

$$D_p := \frac{3}{4} \text{ in} = 19,05 \text{ mm}$$

Área bruta da seção dos parafusos:

$$A_g := \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 = 285,02 \text{ mm}^2$$

Área líquida da seção dos parafusos:

$$A_p := A_g \cdot 0,75 = 213,77 \text{ mm}^2$$

Ceficiente de ponderação da resistência do parafuso:

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

Força resistente de tração máxima do parafuso:

$$F_{tr_p} := \frac{A_p \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 130,64 \text{ kN}$$

Força resistente de corte máxima do parafuso:

$$F_{dr_p} := \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 69,67 \text{ kN}$$

Inércia da seção dos parafusos:

Em relação ao eixo z:

$$I_{z_p} := 4 \cdot A_p \cdot (158 \text{ mm})^2 + 4 \cdot A_p \cdot (100 \text{ mm})^2 = 2989,66 \text{ cm}^4$$

Em relação ao eixo y:

$$I_{y_p} := 8 \cdot A_p \cdot (35 \text{ mm})^2 = 209,49 \text{ cm}^4$$

Determinação dos esforços de tração solicitantes nos parafusos:

$$\sigma_p := \frac{F_x I}{n_p \cdot A_p} + \frac{-Mz I}{Iz_p} \cdot (158 \text{ mm}) + \frac{My I}{Iy_p} \cdot (35 \text{ mm}) = -65,04 \text{ MPa}$$

Máxima tração atuante no parafuso:

$$Fts_p := \sigma_p \cdot A_p = -13,9 \text{ kN} \leq Ftr_p = 130,64 \text{ kN}$$

Aprovado !

Determinação dos esforços de cisalhamento nos parafusos:

Direção vertical:

$$\tau_{vp} := \frac{Fy I}{n_p \cdot A_p} = 18,91 \text{ MPa}$$

Direção lateral:

$$\tau_{hp} := \frac{Fz I}{n_p \cdot A_p} = 0,25 \text{ MPa}$$

Tensão resultante:

$$\tau_p := \sqrt{\tau_{vp}^2 + \tau_{hp}^2} = 18,91 \text{ MPa}$$

Esforço total de corte no parafuso:

$$Fds_p := \tau_p \cdot A_p = 4,04 \text{ kN} \leq Fdr_p = 69,67 \text{ kN}$$

Aprovado !

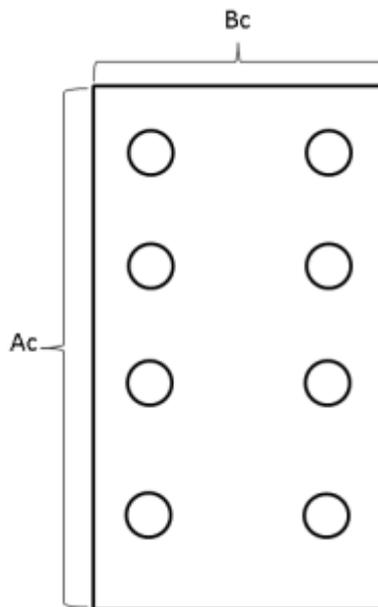
Verificação da tração e cisalhamento combinados:

$$\left(\frac{Fts_p}{Ftr_p} \right) + \left(\frac{Fds_p}{Fdr_p} \right) = 0,05 \leq 1,0$$

Aprovado !

2. Verificação da Chapa de Ligação

Dimensões da Chapa:



Largura:

$$B_c := 220 \text{ mm}$$

Comprimento da chapa:

$$A_c := 377 \text{ mm}$$

Espessura:

$$t_c := 16 \text{ mm}$$

Diâmetro dos furos:

$$D_f := 21 \text{ mm}$$

Material considerado para a chapa: A36

Resistência à ruptura da chapa:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento da chapa:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda lateral da chapa:

$$l_c := 40 \text{ mm} - D_f = 19 \text{ mm}$$

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo da chapa de extremidade com o parafuso:

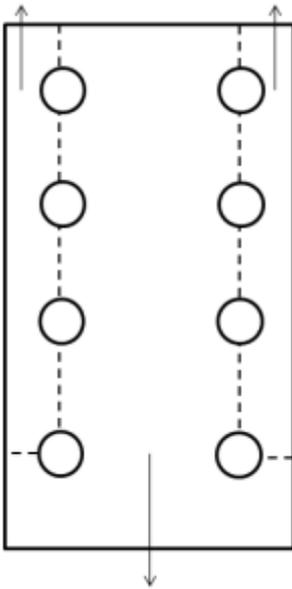
$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 135,11 \text{ kN}$$

Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 4,04 \text{ kN} \leq R_{dc} = 135,11 \text{ kN}$$

Aprovado !

Máxima carga atuante de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da chapa de extremidade:



Considerando a força de corte vertical (direção y):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot t_c \cdot (347 \text{ mm}) = 111,04 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - 2 \cdot 3,5 \cdot D_f \cdot t_c = 87,52 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 2 \cdot t_c \cdot \left(30 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} \right) = 6,24 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Força resistente:

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1740,8 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1418,67 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1418,67 \text{ kN}$$

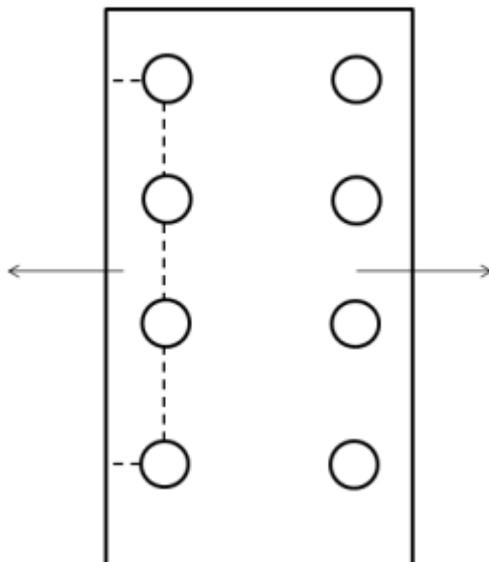
Força solicitante:

$$R_{dr_s} := F_{y_I} = 32,34 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1418,67 \text{ kN}$$

Aprovado !

Considerando a força de corte lateral (direção z):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:



$$A_{gv} := 2 \cdot 30 \text{ mm} \cdot t_c = 9,6 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_c = 6,24 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 317 \text{ mm} \cdot t_c - 3 \cdot D_f \cdot t_c = 40,64 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Esforço resistente:

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1315,08 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1310,81 \text{ kN}$$

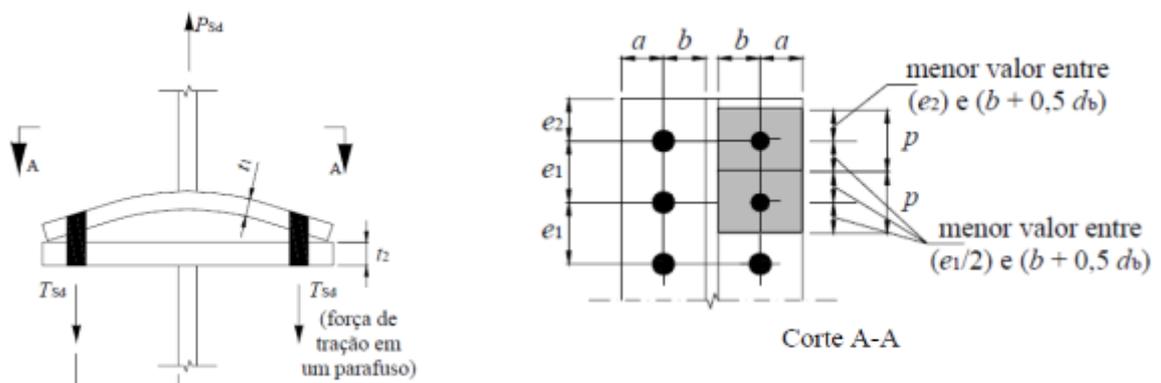
$$R_{dr} := \frac{1}{\sqrt{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1310,81 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$R_{dr_s} := |F_{zI}| = 0,42 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1310,81 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da chapa de extremidade considerando efeito alavanca:



Distância do furo da chapa de extremidade à alma da viga:

$$b := 30 \text{ mm}$$

Esforço de tração solicitante no parafuso:

$$T_{sd} := F_{ts_p} = -13,9 \text{ kN}$$

Momento atuante devido ao efeito alavanca:

$$M_{sd} := T_{sd} \cdot (b) = -41,71 \text{ kN cm}$$

Distância vertical entre os furos:

$$e_1 := 70 \text{ mm}$$

Distância do furo à borda superior da chapa de extremidade:

$$e_2 := 30 \text{ mm}$$

Comprimento de ação do efeito alavanca:

$$p := \frac{e_1}{2} + e_2 = 65 \text{ mm}$$

Momento resistente de cálculo considerando efeito alavanca:

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$M_{rd} := \frac{f_y \cdot p \cdot t_c^2}{4 \cdot \gamma_{a1}} = 94,55 \text{ kN cm}$$

$$M_{sd} = -41,71 \text{ kN cm} \leq M_{rd} = 94,55 \text{ kN cm}$$

Aprovado!

3. Verificação da Coluna na Região de Ligação

Perfil da coluna: W250 X 73

Dimensões da mesa do perfil da coluna:

Largura:

$$B := 254 \text{ mm}$$

Espessura da mesa:

$$t_f := 14,2 \text{ mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d := 253 \text{ mm}$$

Diâmetro do furo:

$$D_f := 24 \text{ mm}$$

Material da coluna: A 36

Resistência à ruptura:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda da mesa do perfil:

Menor valor entre:

$$\frac{B - (70 \text{ mm} - D_f)}{2} = 104 \text{ mm}$$

$$68 \text{ mm} - D_f = 44 \text{ mm}$$

$$l_c := 68 \text{ mm} - D_f = 44 \text{ mm}$$

Máxima carga de cisalhamento considerando escoamento da área de contato do furo da mesa do perfil com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_a 2} = 312,89 \text{ kN}$$

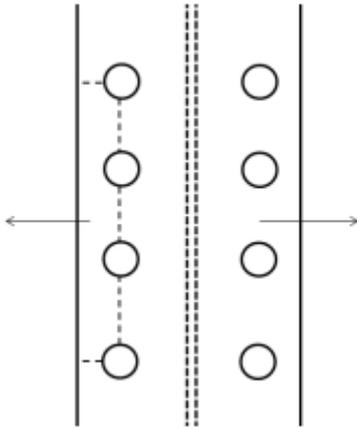
Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 4,04 \text{ kN} \leq R_{dc} = 312,89 \text{ kN}$$

Aprovado!

Máxima carga de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da mesa da coluna:

Considerando a força de corte lateral (direção z):



Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 30 \text{ mm} \cdot t_f = 8,52 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_f = 5,11 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 317 \text{ mm} \cdot t_f - 3 \cdot D_f \cdot t_f = 34,79 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Esforço resistente menor valor entre:

$$\frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1121,69 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1125,48 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1121,69 \text{ kN}$$

Força solicitante considerando rasgamento da mesa da coluna:

$$R_{dr_s} := F_{yI} = 32,34 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1121,69 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação dos Esforços Concentrados Alma da Coluna:

Especificação da viga:

Espessura da mesa:

$$t_{f_viga} := 8,4 \text{ mm}$$

Espessura da alma;

$$t_{w_viga} := 6,1 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d_{viga} := 254 \text{ mm}$$

Largura da mesa da viga:

$$bf_{viga} := 102 \text{ mm}$$

Verificação do enrugamento da alma da coluna:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

$$d := 253 \text{ mm}$$

$$l_n := \frac{d_{viga}}{2} = 127 \text{ mm}$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$F_{rd} := \frac{-\left(0,33 \cdot t_w^2\right)}{\gamma_{a1}} \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(\frac{l_n}{d}\right) \cdot \left(\frac{t_w}{t_f}\right)\right) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} = -394,99 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$F_{sd} := \frac{F_{xI}}{2} + \frac{M_{zI}}{\frac{d}{2}} = -302,98 \text{ kN}$$

Para enrugamento da alma da coluna:

$$|F_{sd}| = 302,98 \text{ kN} \leq |F_{rd}| = 394,99 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação dos enrijecedores:

Especificação dos enrijecedores:

Espessura:

$$t_{en} := 8 \text{ mm}$$

Largura:

$$b_{en} := \frac{B - t_w}{2} = 122,7 \text{ mm}$$

Altura:

$$d_{en} := d - 2 \cdot t_f = 224,6 \text{ mm}$$

$$\chi := 1,0$$

$$Q := 1,0$$

$$A_g := 2 \cdot b_{en} \cdot t_{en} = 19,632 \text{ cm}^2$$

$$F_{trd} := \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 446,18 \text{ kN}$$

$$|F_{sd}| = 302,98 \text{ kN} \leq F_{trd} = 446,18 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação do Cisalhamento na Zona do Painel da Alma da Coluna

Esforços solicitantes na ligação oposta da colua:

$$F_{x_{II}} := 466,39 \text{ kN}$$

$$F_{y_{II}} := 20 \text{ kN}$$

$$F_{z_{II}} := (0,38) \text{ kN}$$

$$M_{z_{II}} := (37,55) \text{ kN m}$$

$$M_{y_{II}} := 0,71 \text{ kN m}$$

Força de corte resultante na coluna:

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{M_{z_I}}{d_{\text{viga}}} \right) + \frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{M_{z_{II}}}{d_{\text{viga}}} = 154 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{-M_{z_I}}{d_{\text{viga}}} \right) + \frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{-M_{z_{II}}}{d_{\text{viga}}} = 9,04 \text{ kN}$$

Força resistente para a força cortante:

$$F_{rd} := \frac{0,6 \cdot f_y \cdot d \cdot t_w}{\gamma_{a1}} = 296,7 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da Flambagem da Alma da Coluna por Compressão

$$h := d = 253 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := \frac{(-24) \cdot t_w^3 \cdot \sqrt{E \cdot f_y}}{\gamma_{a1} \cdot h} = -397,44 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{x_I} - F_{x_{II}}}{2} \right) = -384,87 \text{ kN} < F_{rd} = -397,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

3. Verificação da Viga na Região de Ligação

Verificação da Solda da alma da Viga com a Chapa de Extremidade

Tensão de ruptura do metal de solda:

$$f_w := 48,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Coeficiente de ponderação da resistência da solda:

$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Tensão resistente da solda:

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Largura do filete de solda: 8mm

Área da solda:

$$A_w := 2 \cdot 0,707 \cdot (8 \text{ mm}) \cdot (d_{\text{viga}} - 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}}) = 26,83 \text{ cm}^2$$

Tensão solicitante:

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{yI}}{A_w} = 12,05 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wsd} = 12,05 \text{ MPa} < \tau_{wrd} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

Verificação da solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade:

$$\sigma_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Área de trabalho do metal de solda:

(Solda duplo filete na alma e mesa)

$$A_w := 4 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}} = 34,27 \text{ cm}^2$$

$$I_{w_z} := 4 \cdot t_{f_viga} \cdot bf_{viga} \cdot \left(\frac{d_{viga} + t_{f_viga}}{2} \right)^2 = 5899,39 \text{ cm}^4$$

$$I_{w_y} := \frac{4 \cdot t_{f_viga} \cdot bf_{viga}^3}{12} = 297,14 \text{ cm}^4$$

Tensão atuante nas soldas da mesa:

$$\sigma_{wsd} := \frac{F_{x_I}}{A_w} + \frac{(M_{z_I}) \cdot \frac{d_{viga}}{2}}{I_{w_z}} + \frac{(M_{y_I}) \cdot \frac{bf_{viga}}{2}}{I_{w_y}} = -118,22 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{z_I}}{A_w} = 0,12 \text{ MPa}$$

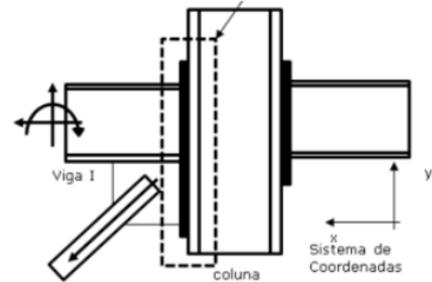
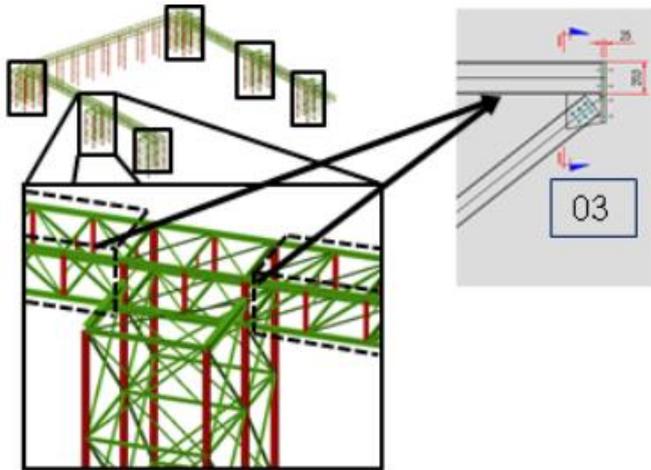
Tensão equivalente solicitante na solda da mesa da viga na chapa de extremidade:

$$\sqrt{\sigma_{wsd}^2 + \tau_{wsd}^2} = 118,22 \text{ MPa} < \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

A.3 Verificação da Ligação 03

Identificação da ligação avaliada:



$$\varphi := 60$$

$$F_t := 253,03 \text{ kN}$$

Esforços totais na ligação:

$$F_{x_I} := 225,33 \text{ kN} + F_t \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 444,46 \text{ kN}$$

$$F_{y_I} := (-20,18) \text{ kN} + F_t \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 106,34 \text{ kN}$$

$$F_{z_I} := (-0,25) \text{ kN}$$

$$M_{z_I} := (-31,28) \text{ kN m}$$

$$M_{y_I} := 0,45 \text{ kN m}$$

2. Verificação dos Parafusos

Material dos parafusos: ASTM A325

Tensão de ruptura dos parafusos:

$$f_{ub} := 825 \text{ MPa}$$

Tensão de escoamento dos parafusos:

$$f_{yb} := 635 \text{ MPa}$$

Número total de parafusos:

$$n_p := 8$$

Diâmetro dos parafusos:

$$D_p := \frac{7}{8} \text{ in} = 22,22 \text{ mm}$$

Área bruta da seção dos parafusos:

$$A_g := \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 = 387,95 \text{ mm}^2$$

Área líquida da seção dos parafusos:

$$A_p := A_g \cdot 0,75 = 290,96 \text{ mm}^2$$

Ceficiente de ponderação da resistência do parafuso:

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

Força resistente de tração máxima do parafuso:

$$F_{tr_p} := \frac{A_p \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 177,81 \text{ kN}$$

Força resistente de corte máxima do parafuso:

$$F_{dr_p} := \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 94,83 \text{ kN}$$

Inércia da seção dos parafusos:

Em relação ao eixo z:

$$I_{z_p} := 4 \cdot A_p \cdot (145 \text{ mm})^2 + 4 \cdot A_p \cdot (45 \text{ mm})^2 = 2682,66 \text{ cm}^4$$

Em relação ao eixo y:

$$I_{y_p} := 8 \cdot A_p \cdot (70 \text{ mm})^2 = 1140,57 \text{ cm}^4$$

Determinação dos esforços de tração solicitantes nos parafusos:

$$\sigma_p := \frac{F_{xI}}{n_p \cdot A_p} + \frac{-M_{zI}}{I_{z_p}} \cdot (145 \text{ mm}) + \frac{M_{yI}}{I_{y_p}} \cdot (70 \text{ mm}) = 362,78 \text{ MPa}$$

Máxima tração atuante no parafuso:

$$F_{ts_p} := \sigma_p \cdot A_p = 105,55 \text{ kN} \leq F_{tr_p} = 177,81 \text{ kN}$$

Aprovado !

Determinação dos esforços de cisalhamento nos parafusos:

Direção vertical:

$$\tau_{v_p} := \frac{F_{yI}}{n_p \cdot A_p} = 45,68 \text{ MPa}$$

Direção lateral:

$$\tau_{h_p} := \frac{F_{zI}}{n_p \cdot A_p} = -0,11 \text{ MPa}$$

Tensão resultante:

$$\tau_p := \sqrt{\tau_{v_p}^2 + \tau_{h_p}^2} = 45,68 \text{ MPa}$$

Esforço total de corte no parafuso:

$$F_{ds_p} := \tau_p \cdot A_p = 13,29 \text{ kN} \leq F_{dr_p} = 94,83 \text{ kN}$$

Aprovado !

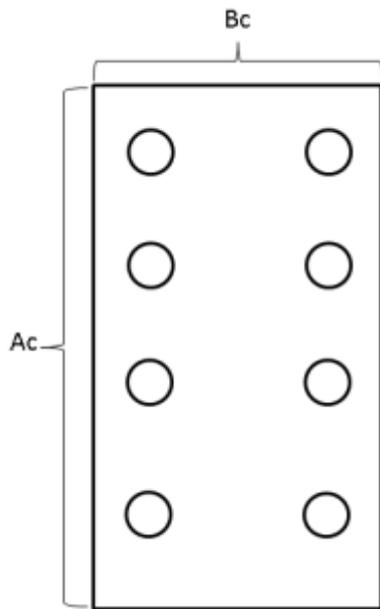
Verificação da tração e cisalhamento combinados:

$$\left(\frac{F_{ts_p}}{F_{tr_p}} \right) + \left(\frac{F_{ds_p}}{F_{dr_p}} \right) = 0,73 \leq 1,0$$

Aprovado !

2. Verificação da Chapa de Ligação

Dimensões da Chapa:



Largura:

$$B_c := 220 \text{ mm}$$

Comprimento da chapa:

$$A_c := 383 \text{ mm}$$

Espessura:

$$t_c := 25,4 \text{ mm}$$

Diâmetro dos furos:

$$D_f := 24 \text{ mm}$$

Material considerado para a chapa: A36

Resistência à ruptura da chapa:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento da chapa:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda lateral da chapa:

$$l_c := 40 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} = 28 \text{ mm}$$

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo da chapa de extremidade com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_a 2} = 316,09 \text{ kN}$$

Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 13,29 \text{ kN} \leq R_{dc} = 316,09 \text{ kN}$$

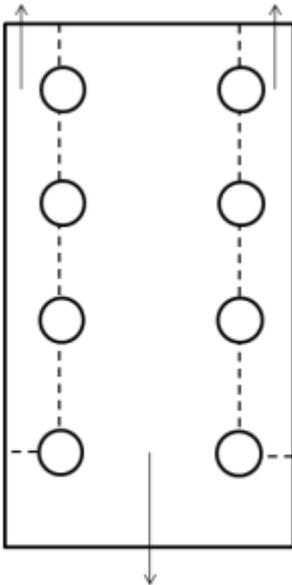
Aprovado !

Máxima carga atuante de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da chapa de extremidade:

Considerando a força de corte vertical (direção y):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot t_c \cdot (343 \text{ mm}) = 174,24 \text{ cm}^2$$



Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - 2 \cdot 3,5 \cdot D_f \cdot t_c = 131,57 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 2 \cdot t_c \cdot \left(40 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} \right) = 14,22 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Força resistente:

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2760,51 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2357,5 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2357,5 \text{ kN}$$

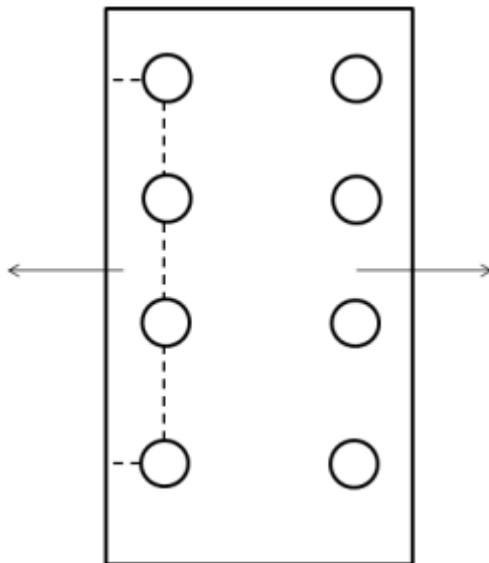
Força solicitante:

$$R_{dr_s} := F_{yI} = 106,34 \text{ kN} \leq R_{dr} = 2357,5 \text{ kN}$$

Aprovado !

Considerando a força de corte lateral (direção z):

Área bruta sujeita ao cisalhamento:



$$A_{gv} := 2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot t_c = 20,32 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_c = 14,22 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 290 \text{ mm} \cdot t_c - 3 \cdot D_f \cdot t_c = 55,37 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Esforço resistente:

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1893,52 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1866,43 \text{ kN}$$

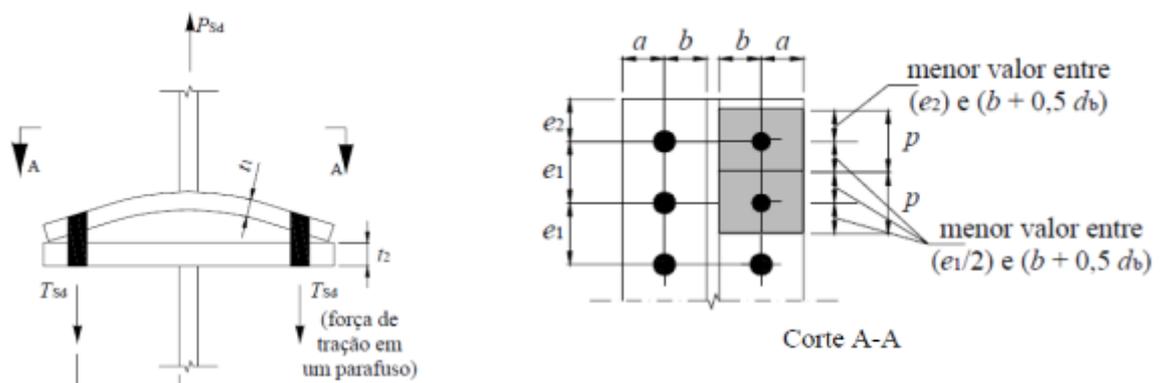
$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1866,43 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$R_{dr_s} := |F_z| = 0,25 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1866,43 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da chapa de extremidade considerando efeito alavanca:



Distância do furo da chapa de extremidade à alma da viga:

$$b := 70 \text{ mm} - 7,2 \text{ mm}$$

Esforço de tração solicitante no parafuso:

$$T_{sd} := F_{ts} = 105,55 \text{ kN}$$

Momento atuante devido ao efeito alavanca:

$$M_{sd} := T_{sd} \cdot (b) = 662,88 \text{ kN cm}$$

Distância vertical entre os furos:

$$e_1 := 100 \text{ mm}$$

Distância do furo à borda superior da chapa de extremidade:

$$e_2 := 53 \text{ mm}$$

Comprimento de ação do efeito alavanca:

$$p := \frac{e_1}{2} + e_2 = 103 \text{ mm}$$

Momento resistente de cálculo considerando efeito alavanca:

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$M_{rd} := \frac{f_y \cdot p \cdot t_c^2}{4 \cdot \gamma_{a1}} = 377,57 \text{ kN cm}$$

$$M_{sd} = 662,88 \text{ kN cm} > M_{rd} = 377,57 \text{ kN cm}$$

Reprovado !

3. Verificação da Coluna na Região de Ligação

Perfil da coluna: W250 X 73

Dimensões da mesa do perfil da coluna:

Largura:

$$B := 254 \text{ mm}$$

Espessura da mesa:

$$t_f := 14,2 \text{ mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d := 253 \text{ mm}$$

Diâmetro do furo:

$$D_f := 24 \text{ mm}$$

Material da coluna: A 36

Resistência à ruptura:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda da mesa do perfil:

Menor valor entre:

$$\frac{B - (140 \text{ mm} - D_f)}{2} = 69 \text{ mm}$$

$$90 \text{ mm} - D_f = 66 \text{ mm}$$

$$l_c := 90 \text{ mm} - D_f = 66 \text{ mm}$$

Máxima carga de cisalhamento considerando escoamento da área de contato do furo da mesa do perfil com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 745,07 \text{ kN}$$

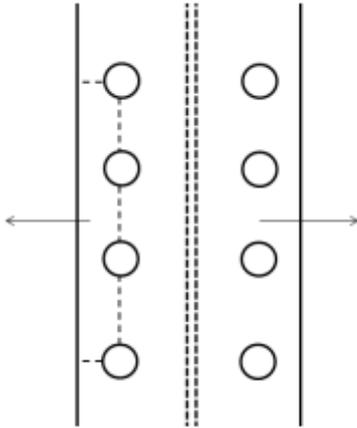
Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 13,29 \text{ kN} \leq R_{dc} = 745,07 \text{ kN}$$

Aprovado!

Máxima carga de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da mesa da coluna:

Considerando a força de corte lateral (direção z):



Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot t_f = 11,36 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D \cdot t_f = 7,95 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 290 \text{ mm} \cdot t_f - 3 \cdot D \cdot t_f = 30,96 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1058,58 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1043,44 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1043,44 \text{ kN}$$

Força solicitante considerando rasgamento da mesa da coluna:

$$R_{dr_s} := F_{yI} = 106,34 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1043,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação dos Esforços Concentrados Alma da Coluna:

Especificação da viga:

Espessura da mesa:

$$t_{f_viga} := 11 \text{ mm}$$

Espessura da alma;

$$t_{w_viga} := 7,2 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d_{viga} := 203 \text{ mm}$$

Largura da mesa da viga:

$$b_{f_viga} := 203 \text{ mm}$$

Enrugamento da alma da coluna:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

$$d := 253 \text{ mm}$$

$$l_n := t_f = 14,2 \text{ mm}$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$F_{rd} := \frac{-\left(0,33 \cdot t_w^2\right)}{\gamma_{a1}} \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(\frac{l_n}{d}\right) \cdot \left(\frac{t_w}{t_f}\right)\right) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} = -227,65 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$F_{sd} := \frac{F_{xI}}{2} + \frac{M_{zI}}{\frac{d}{2}} = -25,04 \text{ kN}$$

Para enrugamento da alma da coluna:

$$|F_{sd}| = 25,04 \text{ kN} \leq |F_{rd}| = 227,65 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação dos enrijecedores:

Especificação dos enrijecedores:

Espessura:

$$t_{en} := 8 \text{ mm}$$

Largura:

$$b_{en} := \frac{B - t_w}{2} = 122,7 \text{ mm}$$

Altura:

$$d_{en} := d - 2 \cdot t_f = 224,6 \text{ mm}$$

$$\chi := 1,0$$

$$Q := 1,0$$

$$A_g := 2 \cdot b_{en} \cdot t_{en} = 19,632 \text{ cm}^2$$

$$F_{trd} := \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 446,18 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := \frac{F_{xI}}{2} + \frac{-M_{zI}}{\frac{d}{2}}$$

$$|F_{sd}| = 469,5 \text{ kN} > F_{trd} = 446,18 \text{ kN}$$

Reprovado !

Verificação do Cisalhamento na Zona do Painel da Alma da Coluna

Esforços solicitantes na ligação oposta da colua:

$$F_{xII} := 387,97 \text{ kN}$$

$$F_{yII} := 19,67 \text{ kN}$$

$$F_{zII} := 0,13 \text{ kN}$$

$$M_{zII} := (30,17) \text{ kN m}$$

$$M_{yII} := 0,25 \text{ kN m}$$

Força de corte resultante na coluna:

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{-M_{z_I}}{d_{viga}} \right) - \left(\frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{M_{z_{II}}}{d_{viga}} \right) = 33,71 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{M_{z_I}}{d_{viga}} \right) - \left(\frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{-M_{z_{II}}}{d_{viga}} \right) = 22,78 \text{ kN}$$

Força resistente para a força cortante:

$$F_{rd} = 296,7 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da Flambagem da Alma da Coluna por Compressão

$$h := d = 253 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := \frac{(-24) \cdot t_w^3 \cdot \sqrt{E \cdot f_y}}{\gamma_{a1} \cdot h} = -397,44 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := (F_{x_I} + F_{x_{II}}) = 832,43 \text{ kN}$$

$$F_{rd} = -397,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

(Tração)

(Compressão)

3. Verificação da Viga na Região de Ligação

Verificação da Solda da alma da Viga com a Chapa de Extremidade

Tensão de ruptura do metal de solda:

$$f_w := 48,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Coeficiente de ponderação da resistência da solda:

$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Tensão resistente da solda:

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 216 \text{ MPa}$$

Largura do filete de solda: 6mm

Área da solda:

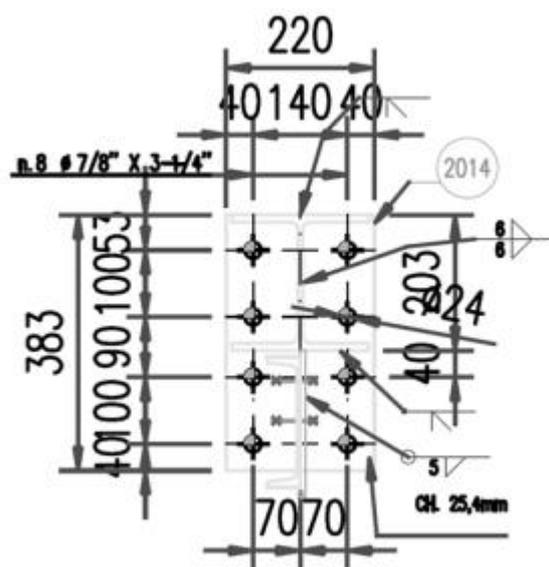
$$A_w := 2 \cdot 0,707 \cdot (6 \text{ mm}) \cdot (d_{\text{viga}} - 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}}) = 15,36 \text{ cm}^2$$

Tensão solicitante:

$$\tau_{\text{wsd}} := \frac{F_{yI}}{A_w} = 69,25 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{wsd}} = 69,25 \text{ MPa} \leq \tau_{\text{wrd}} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !



Verificação da solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade:

$$\sigma_{\text{wrd}} := \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = 227,27 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{wrd}} := \frac{0,6 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 136,36 \text{ MPa}$$

Área de trabalho do metal de solda:

$$A_w := 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}} = 44,66 \text{ cm}^2$$

$$I_{wz} := 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{viga}} + t_{f_{\text{viga}}}}{2} \right)^2 = 5113,12 \text{ cm}^4$$

$$I_{wy} := \frac{2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}}^3}{12} = 1533,66 \text{ cm}^4$$

Força de tração na mesa da viga:

$$\sigma_{wzd} := \frac{F_x I}{A_w} + \frac{(-M_z I) \cdot \frac{d_{\text{viga}}}{2}}{I_{wz}} + \frac{(M_y I) \cdot \frac{bf_{\text{viga}}}{2}}{I_{wy}} = 164,59 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wzd} := \frac{F_z I}{A_w} = -0,06 \text{ MPa}$$

Tensão equivalente solicitante na solda da mesa da viga na chapa de extremidade:

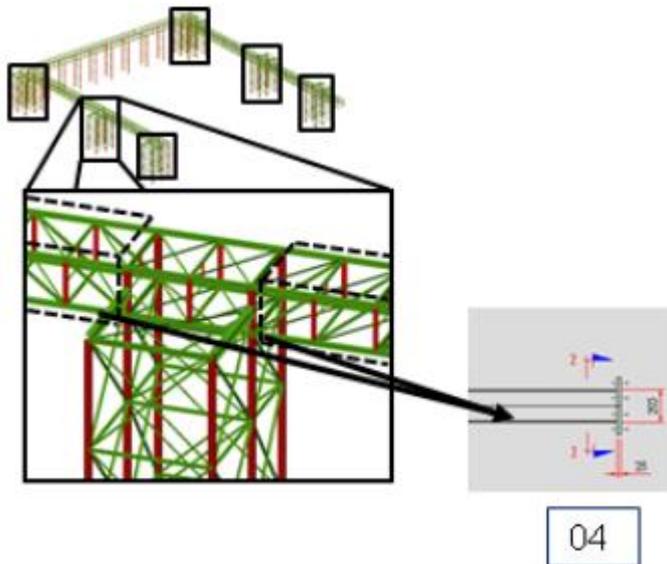
$$\sqrt{\sigma_{wzd}^2 + \tau_{wzd}^2} = 164,59 \text{ MPa} \leq \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_w} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

A.4 Verificação da Ligação 04

1. Esforços Solicitantes

Identificação da ligação avaliada:



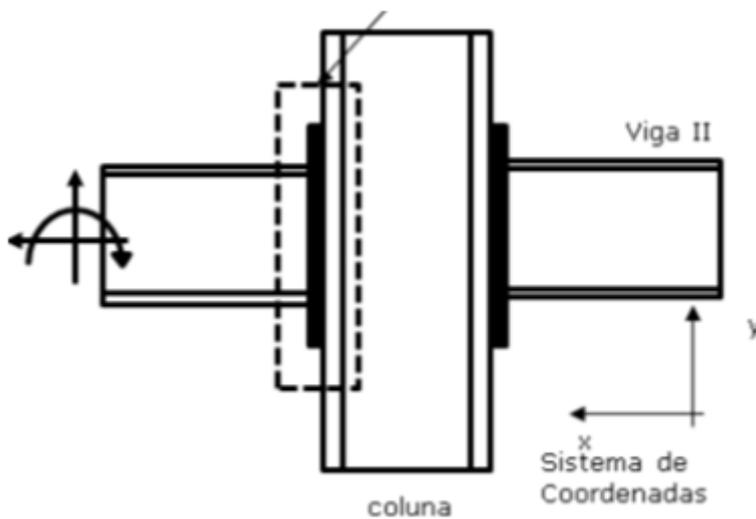
$$F_{x_I} := (-466,39) \text{ kN}$$

$$F_{y_I} := (-20) \text{ kN}$$

$$F_{z_I} := 0,38 \text{ kN}$$

$$M_{z_I} := (-37,55) \text{ kN m}$$

$$M_{y_I} := (-0,71) \text{ kN m}$$



2. Verificação dos Parafusos

Material dos parafusos: ASTM A325

Tensão de ruptura dos parafusos:

$$f_{ub} := 825 \text{ MPa}$$

Tensão de escoamento dos parafusos:

$$f_{yb} := 635 \text{ MPa}$$

Número total de parafusos:

$$n_p := 8$$

Diâmetro dos parafusos:

$$D_p := \frac{3}{4} \text{ in} = 19,05 \text{ mm}$$

Área bruta da seção dos parafusos:

$$A_g := \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 = 285,02 \text{ mm}^2$$

Área líquida da seção dos parafusos:

$$A_p := A_g \cdot 0,75 = 213,77 \text{ mm}^2$$

Ceficiente de ponderação da resistência do parafuso:

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

Força resistente de tração máxima do parafuso:

$$F_{tr_p} := \frac{A_p \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 130,64 \text{ kN}$$

Força resistente de corte máxima do parafuso:

$$F_{dr_p} := \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_{yb}}{\gamma_{a2}} = 69,67 \text{ kN}$$

Inércia da seção dos parafusos:

Em relação ao eixo z:

$$I_{z_p} := 4 \cdot A_p \cdot (145 \text{ mm})^2 + 4 \cdot A_p \cdot (55 \text{ mm})^2 = 2056,44 \text{ cm}^4$$

Em relação ao eixo y:

$$I_{y_p} := 8 \cdot A_p \cdot (70 \text{ mm})^2 = 837,97 \text{ cm}^4$$

Determinação dos esforços de tração solicitantes nos parafusos:

$$\sigma_p := \frac{F_{x_I}}{n_p \cdot A_p} + \frac{-M_{z_I}}{I_{z_p}} \cdot (145 \text{ mm}) + \frac{-M_{y_I}}{I_{y_p}} \cdot (70 \text{ mm}) = -2,02 \text{ MPa}$$

Máxima tração atuante no parafuso:

$$F_{ts_p} := \sigma_p \cdot A_p = -0,43 \text{ kN} \leq F_{tr_p} = 130,64 \text{ kN}$$

Aprovado !

Determinação dos esforços de cisalhamento nos parafusos:

Direção vertical:

$$\tau_{v_p} := \frac{F_{y_I}}{n_p \cdot A_p} = -11,69 \text{ MPa}$$

Direção lateral:

$$\tau_{h_p} := \frac{F_{z_I}}{n_p \cdot A_p} = 0,22 \text{ MPa}$$

Tensão resultante:

$$\tau_p := \sqrt{\tau_{v_p}^2 + \tau_{h_p}^2} = 11,7 \text{ MPa}$$

Esforço total de corte no parafuso:

$$F_{ds_p} := \tau_p \cdot A_p = 2,5 \text{ kN} \leq F_{dr_p} = 69,67 \text{ kN}$$

Aprovado !

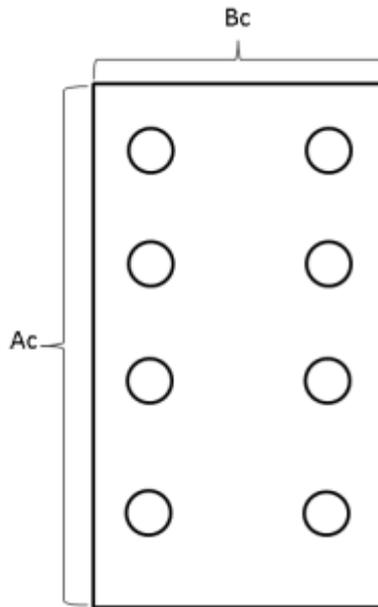
Verificação da tração e cisalhamento combinados:

$$\left(\frac{F_{ts_p}}{F_{tr_p}} \right) + \left(\frac{F_{ds_p}}{F_{dr_p}} \right) = 0,03 \leq 1,0$$

Aprovado !

2. Verificação da Chapa de Extremidade

Dimensões da Chapa:



Largura:

$$B_c := 220 \text{ mm}$$

Comprimento da chapa:

$$A_c := 353 \text{ mm}$$

Espessura:

$$t_c := 25,4 \text{ mm}$$

Diâmetro dos furos:

$$D_f := 21 \text{ mm}$$

Material considerado para a chapa: A36

Resistência à ruptura da chapa:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento da chapa:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda lateral da chapa:

$$l_c := 40 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} = 29,5 \text{ mm}$$

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo da chapa de extremidade com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 333,02 \text{ kN}$$

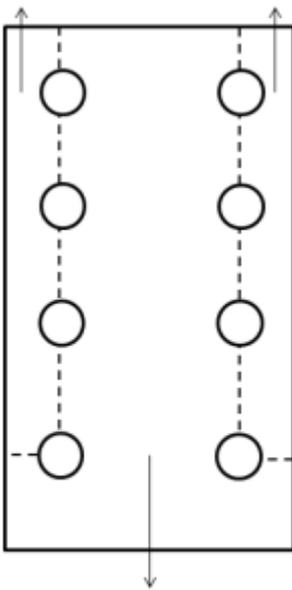
Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 2,5 \text{ kN} \leq R_{dc} = 333,02 \text{ kN}$$

Aprovado !

Máxima carga atuante de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da chapa de extremidade:

Considerando a força de corte vertical (direção y):



Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot t_c \cdot (318 \text{ mm}) = 161,54 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - 2 \cdot 3,5 \cdot D_f \cdot t_c = 124,21 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 2 \cdot t_c \cdot \left(40 \text{ mm} - \frac{D_f}{2} \right) = 14,99 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Força resistente:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2652,14 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2238,96 \text{ kN}$$

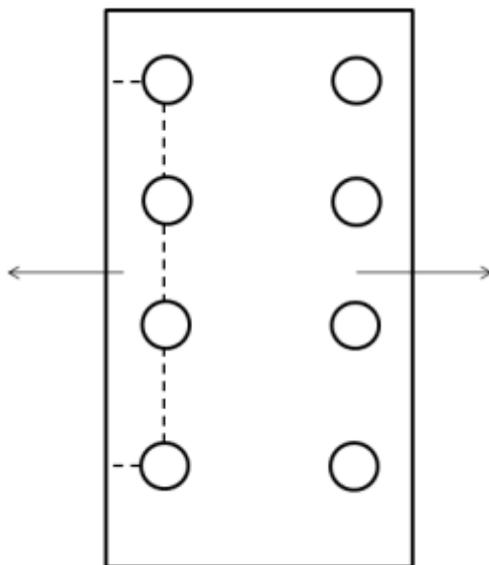
$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 2238,96 \text{ kN}$$

Força solicitante:

$$R_{dr_s} := |F_{yI}| = 20 \text{ kN} \leq R_{dr} = 2238,96 \text{ kN}$$

Aprovado !

Considerando a força de corte lateral (direção z):



Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot t_c = 20,32 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_c = 14,99 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 293 \text{ mm} \cdot t_c - 3 \cdot D_f \cdot t_c = 58,42 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Esforço resistente:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1997,38 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1956,74 \text{ kN}$$

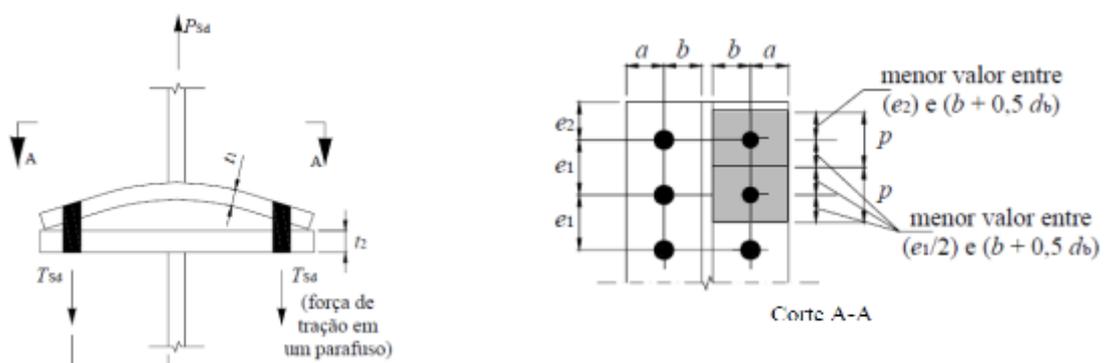
$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1956,74 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$R_{dr_s} := |F_{zI}| = 0,38 \text{ kN} \leq R_{dr} = 1956,74 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da chapa de extremidade considerando efeito alavanca:



Distância do furo da chapa de extremidade à alma da viga:

$$b := 70 \text{ mm} - 7,2 \text{ mm}$$

Esforço de tração solicitante no parafuso:

$$T_{sd} := F_{ts} = -0,43 \text{ kN}$$

Momento atuante devido ao efeito alavanca:

$$M_{sd} := T_{sd} \cdot b = -2,72 \text{ kN cm}$$

Distância entre os furos (e2):

$$e_1 := 140 \text{ mm}$$

Distância do furo à borda superior da chapa de extremidade:

$$e_2 := 35 \text{ mm}$$

Comprimento de ação do efeito alavanca:

$$p := \frac{e_1}{2} + e_2 = 105 \text{ mm}$$

Momento resistente de cálculo considerando efeito alavanca:

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$M_{rd} := \frac{f_y \cdot p \cdot t_c^2}{4 \cdot \gamma_{a1}} = 384,9 \text{ kN cm}$$

$$M_{sd} = -2,72 \text{ kN cm} \leq M_{rd} = 384,9 \text{ kN cm}$$

Aprovado !

3. Verificação da Coluna na Região de Ligação

Perfil da coluna: W250 X 73

Dimensões da mesa do perfil da coluna:

Largura:

$$B := 254 \text{ mm}$$

Espessura da mesa:

$$t_f := 14,2 \text{ mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_w := 8,6 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d := 253 \text{ mm}$$

Diâmetro do furo:

$$D_f := 24 \text{ mm}$$

Material da coluna: A 36

Resistência à ruptura:

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

Limite de escoamento:

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Distância entre a borda do furo e a borda da mesa do perfil:

Menor valor entre:

$$\frac{B - (70 \text{ mm} - D_f)}{2} = 104 \text{ mm}$$

$$90 \text{ mm} - D_f = 66 \text{ mm}$$

$$l_c := 90 \text{ mm} - D_f = 66 \text{ mm}$$

Máxima carga de cisalhamento considerando escoamento da área de contato do furo da mesa do perfil com o parafuso:

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_c \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 745,07 \text{ kN}$$

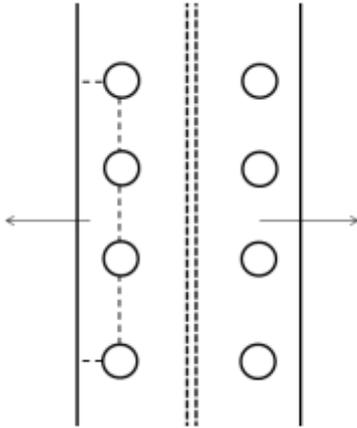
Força de corte atuante no parafuso:

$$F_{ds_p} = 2,5 \text{ kN} \leq R_{dc} = 745,07 \text{ kN}$$

Aprovado!

Máxima carga de cisalhamento no parafuso considerando o rasgamento da mesa da coluna:

Considerando a força de corte lateral (direção z):



Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot t_f = 11,36 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - D_f \cdot t_f = 7,95 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := 290 \text{ mm} \cdot t_f - 3 \cdot D_f \cdot t_f = 30,96 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1058,58 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1043,44 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\sqrt{a_2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1043,44 \text{ kN}$$

Força solicitante considerando rasgamento da mesa da coluna:

$$R_{dr_s} := |F_{y_I}| = 20 \text{ kN} < R_{dr} = 1043,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação dos Enrijecedores da Coluna:

Especificações da viga:

Espessura da mesa:

$$t_{f_viga} := 11 \text{ mm}$$

Espessura da alma;

$$t_{w_viga} := 7,2 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d_{viga} := 203 \text{ mm}$$

Largura da mesa da viga:

$$bf_{viga} := 203 \text{ mm}$$

Especificação dos enrijecedores:

Espessura:

$$t_{en} := 8 \text{ mm}$$

Largura:

$$b_{en} := \frac{B - t_w}{2} = 122,7 \text{ mm}$$

Altura:

$$d_{en} := d - 2 \cdot t_f = 224,6 \text{ mm}$$

Os enrijecedores estão submetidos a esforços de compressão:

$$F_{sd} := \frac{F_{xI}}{2} + \frac{M_{zI}}{2} \cdot \frac{d_{viga}}{d_{en}} = -325,68 \text{ kN}$$

Esforço resistente de cálculo:

$$k_c := \frac{4}{\sqrt{\frac{d_{en}}{t_{en}}}} = 0,7549$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

$$b_{\text{lim}} := 0,64 \cdot \sqrt{\frac{E}{\frac{f_y}{k_c}}} = 16,12$$

$$b/t: \frac{b_{\text{en}}}{t_{\text{en}}} = 15,34$$

$b/t > b_{\text{limite}} \Rightarrow$ não ocorre flambagem do enrijecedor

$$\chi := 1,0$$

$$Q := 1,0$$

$$A_g := 2 \cdot b_{\text{en}} \cdot t_{\text{en}} = 19,632 \text{ cm}^2$$

$$F_{\text{crd}} := \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 446,18 \text{ kN}$$

$$|F_{\text{sd}}| = 325,68 \text{ kN} \leq F_{\text{crd}} = 446,1818 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação do Cisalhamento na Zona do Painel da Alma da Coluna

Esforços solicitantes na ligação oposta da colua:

$$F_{x_{II}} := (-399,45) \text{ kN}$$

$$F_{y_{II}} := 11,5 \text{ kN}$$

$$F_{z_{II}} := 0,42 \text{ kN}$$

$$M_{z_{II}} := (-19,14) \text{ kN m}$$

$$M_{y_{II}} := 0,67 \text{ kN m}$$

Força de corte resultante na coluna:

$$F_{\text{sd}} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{M_{z_I}}{d_{\text{viga}}} \right) - \left(\frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{M_{z_{II}}}{d_{\text{viga}}} \right) = -124,16 \text{ kN}$$

$$F_{\text{sd}} := \left(\frac{F_{x_I}}{2} + \frac{-M_{z_I}}{d_{\text{viga}}} \right) - \left(\frac{F_{x_{II}}}{2} + \frac{-M_{z_{II}}}{d_{\text{viga}}} \right) = 57,22 \text{ kN}$$

$$F_{sd} := \left(\frac{F_{xI}}{2} + \frac{M_{zI}}{d_{viga}} \right) - \left(\frac{F_{xII}}{2} + \frac{M_{zII}}{d_{viga}} \right) = -124,16 \text{ kN}$$

Força resistente para a força cortante:

$$A_{g_c} := 92,7 \text{ cm}^2$$

$$F_{sd} = -124,16 \text{ kN}$$

$$N_{pl} := 0,4 \cdot A_{g_c} \cdot f_y = 927 \text{ kN}$$

$$F_{rd} := \frac{0,6 \cdot f_y \cdot d \cdot t_w}{\gamma_{a1}} = 296,7 \text{ kN}$$

$$|F_{sd}| = 124,16 \text{ kN} \leq F_{rd} = 296,7 \text{ kN}$$

Aprovado !

Verificação da Flambagem da Alma da Coluna por Compressão

$$h := d = 253 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := \frac{(24) \cdot t_w^3 \cdot \sqrt{E \cdot f_y}}{\gamma_{a1} \cdot h}$$

$$F_{sd} := |F_{xI} - F_{xII}| = 66,94 \text{ kN} \leq |F_{rd}| = 397,44 \text{ kN}$$

Aprovado !

3. Verificação da Viga na Região de Ligação

Verificação da Solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade:

Tensão de ruptura do metal de solda:

$$f_w := 48,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Coeficiente de ponderação da resistência da solda:

$$\gamma_{w2} := 1,35$$

Tensão resistente da solda:

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_w} = 216 \text{ MPa}$$

Área da solda:

$$A_w := 2 \cdot 0,707 \cdot (6 \text{ mm}) \cdot (d_{\text{viga}} - 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}}) = 15,36 \text{ cm}^2$$

Tensão solicitante:

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{yI}}{A_w} = -13,02 \text{ MPa}$$

$$|\tau_{wsd}| = 13,02 \text{ MPa} \leq \tau_{wrd} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

Verificação da solda da Mesa da Viga com a Chapa de Extremidade:

$$\sigma_{wrd} := \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = 227,27 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wrd} := \frac{0,6 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 136,36 \text{ MPa}$$

Área de trabalho do metal de solda:

$$A_w := 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}} = 44,66 \text{ cm}^2$$

$$I_{wz} := 2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{viga}} + t_{f_{\text{viga}}}}{2} \right)^2 = 5113,12 \text{ cm}^4$$

$$I_{wy} := \frac{2 \cdot t_{f_{\text{viga}}} \cdot b_{f_{\text{viga}}}^3}{12} = 1533,66 \text{ cm}^4$$

Força de tração/compressão na mesa da viga:

$$\sigma_{wsd} := \frac{F_{xI}}{A_w} + \frac{(M_{zI}) \cdot \frac{d_{\text{viga}}}{2}}{I_{wz}} + \frac{(M_{yI}) \cdot \frac{b_{f_{\text{viga}}}}{2}}{I_{wy}} = -183,67 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wsd} := \frac{F_{zI}}{A_w} = 0,09 \text{ MPa}$$

Tensão equivalente solicitante na solda da mesa da viga na chapa de extremidade:

$$\sqrt{\sigma_{wsd}^2 + \tau_{wsd}^2} = 183,67 \text{ MPa} \leq \frac{0,6 \cdot f_w}{\gamma_w} = 216 \text{ MPa}$$

Aprovado !

A.5 Verificação Coluna Principal

1. Informações do Perfil

Perfil: W 250X 73

Dimensões da seção:

$$A_g := 92,7 \text{ cm}^2 \quad h := 225 \text{ mm}$$

$$b_f := 254 \text{ mm} \quad t_f := 14,2 \text{ mm}$$

$$d := 253 \text{ mm} \quad t_w := 8,6 \text{ mm}$$

Propriedades da seção:

$$C_w := 552,9 \text{ cm}^6 \quad J := 56,94 \text{ cm}^4$$

$$I_x := 11257 \text{ cm}^4 \quad I_y := 3880 \text{ cm}^4$$

$$W_x := 889,9 \text{ cm}^3 \quad W_y := 305,5 \text{ cm}^3$$

$$r_x := 11,02 \text{ cm} \quad r_y := 6,47 \text{ cm}$$

$$Z_x := 983,3 \text{ cm}^3 \quad Z_y := 463,1 \text{ cm}^3$$

Módulo de elasticidade:

$$E := 200 \text{ GPa}$$

Limite de escoamento:

$$f_y := 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 250 \text{ MPa}$$

2. Cálculo do Esforço Resistente à Compressão

2.1 Flambagem Local

2.1.1 Mesas

$$b := \frac{b_f}{2} = 127 \text{ mm}$$

$$t := t_f = 14,2 \text{ mm}$$

$$h = 225 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$k_c := \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = 0,78$$

$$0,64 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_c}{f_y}} = 16,01$$

$$\text{b/t lim: } \frac{b}{t} = 8,94 < \text{b/t lim}$$

$$Q_s = 1,0$$

2.1.2 Alma

$$b = h = 225 \text{ mm}$$

$$t := t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 42,14$$

$$\text{b/t lim: } \frac{b}{t} = 26,16 < \text{b/t lim}$$

$$Q_a = 1,0$$

Fator de redução total:

$$Q := Q_a \cdot Q_s = 1$$

2.2 Estabilidade Global

$$K_x L_x := 4,74 \text{ m}$$

$$N_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x L_x)^2} = 9889,99 \text{ kN}$$

$$\lambda_x := \frac{K_x L_x}{r_x} = 43,01$$

$$K_y L_y := 4,74 \text{ m}$$

$$N_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y L_y)^2} = 3408,83 \text{ kN}$$

$$\lambda_y := \frac{K_y L_y}{r_y} = 73,26$$

$$N_e := N_{ey} = 3408,83 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0,82$$

$$\lambda_0 < 1,5$$

$$\chi := 0,658 \lambda_0^2$$

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$N_{cRd} := \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 1585,07 \text{ kN}$$

Esforço solicitante:

$$N_{cSd} := 10618 \text{ kgf} = 104,13 \text{ kN}$$

Aprovado!

3. Cálculo do Esforço Resistente à Flexão

3.1 Flexão em relação ao eixo de maior inércia:

$$M_{p1} := Z_x \cdot f_y = 245,82 \text{ kN m}$$

FLT

$$L_b := 4,73 \text{ m}$$

$$\lambda := \frac{L_b}{r_y} = 73,11$$

$$\lambda_p := 1,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 49,78$$

$$M_{rk_FLT} := M_{p1}$$

$$\lambda > \lambda_p$$

$$\beta_1 := \frac{0,7 \cdot f_y \cdot W_x}{E \cdot J} = 1,37 \cdot \frac{1}{m}$$

$$\lambda_r := \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} = 182,1$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$$

$$M_r := 0,7 \cdot f_y \cdot W_x = 155,73 \text{ kN m}$$

$$M_r k_{FLT} := M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} = 229,94 \text{ kN m}$$

FLM

$$b := \frac{bf}{2} = 127 \text{ mm}$$

$$t := tf = 14,2 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{b}{t} = 8,94$$

$$\lambda_p := 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10,75$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_r k_{FLM} := M_{pl} = 245,82 \text{ kN m}$$

FLA

$$\lambda := \frac{h}{t_w} = 26,16$$

$$\lambda_p := 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 106,35$$

$$\lambda < \lambda_p \Rightarrow M_r k = M_{pl}$$

$$M_r k_{FLA} := M_{pl} = 245,82 \text{ kN m}$$

$$\varphi_{a1} := 1,1$$

$$M_r k := M_r k_{FLT} = 229,94 \text{ kN m}$$

$$M_r d_x := \frac{M_r k}{\varphi_{a1}} = 209,04 \text{ kN m}$$

Esforço Solicitante:

$$M_{sd_x} := 618 \text{ kgf m} = 6,06 \text{ kN m}$$

Aprovado!

3.2 Flexão em relação ao eixo de menor inércia:

$$M_{p1} := Z_y \cdot f_y = 115,77 \text{ kN m}$$

FLM

$$b := b_f = 254 \text{ mm}$$

$$t := t_f = 14,2 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{b}{t} = 17,89$$

$$\lambda_p := 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10,75$$

$$\lambda > \lambda_p$$

$$\lambda_r := 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{0,7 \cdot f_y}} = 28,06$$

$$M_r := 0,7 \cdot f_y \cdot W_y = 53,46 \text{ kN m}$$

$$M_{rk_{FLM}} := M_{p1} - (M_{p1} - M_r) \cdot \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} = 90,08 \text{ kN m}$$

$$M_{rd_y} := M_{rk_{FLM}} = 9185,26 \text{ kgf m}$$

Esforço Solicitante:

$$M_{sd_y} := 4783 \text{ kgf m} = 46,91 \text{ kN m}$$

Aprovado !

4. Combinação dos esforços solicitantes:

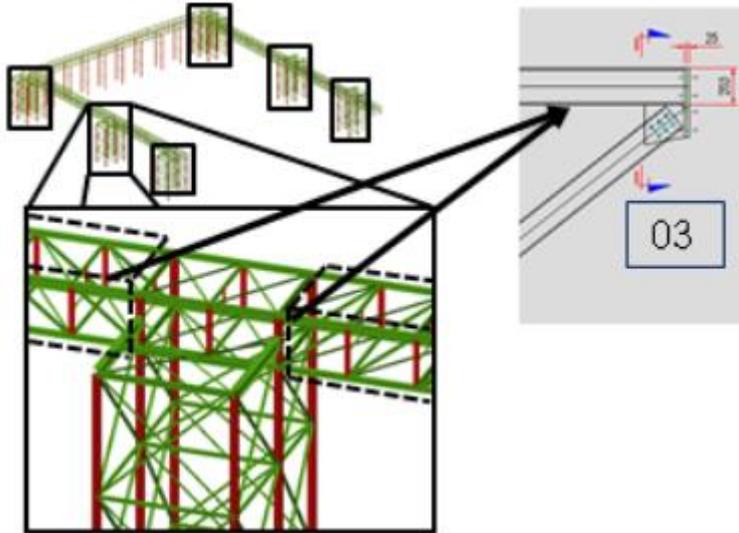
$$\frac{N_c S_d}{2 \cdot N_c R_d} + \frac{M_{sd_x}}{M_{rd_y}} + \frac{M_{sd_y}}{M_{rd_y}} = 0,62$$

Aprovado!

ANEXO B – VERIFICAÇÃO CHAPA DE LIGAÇÃO ADICIONAL

1. Determinação dos Esforços Solicitantes

Identificação da ligação avaliada:



Contraventamento:

$$\varphi := 60$$

$$F_t := 253,03 \text{ kN}$$

Esforços totais na ligação:

$$F_{x_I} := 225,33 \text{ kN} + F_t \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 444,46 \text{ kN}$$

$$F_{y_I} := (-20,18) \text{ kN} + F_t \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 106,34 \text{ kN}$$

$$F_{z_I} := (-0,25) \text{ kN}$$

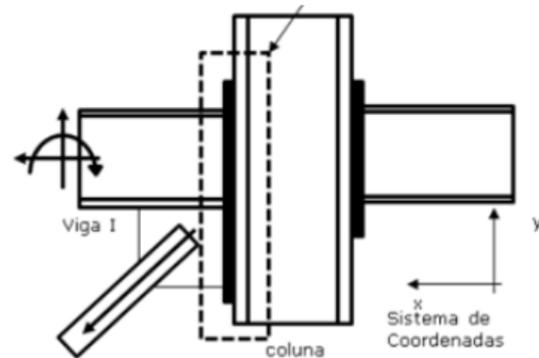
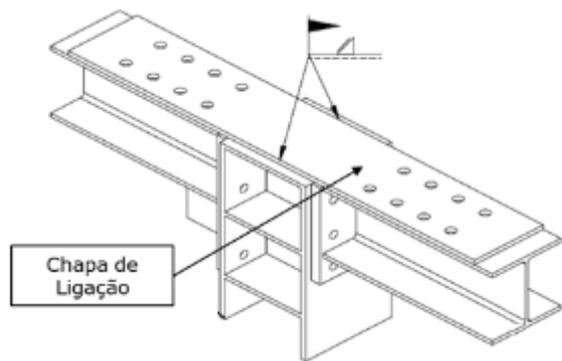
$$M_{z_I} := (-31,28) \text{ kN m}$$

$$M_{y_I} := 0,45 \text{ kN m}$$

2. Verificação da Chapa de Reforço Adicional

Espessura da chapa:

$$t_{\text{ref}} := 12,5 \text{ mm}$$



Largura da chapa:

$$b_{ref} := 203 \text{ mm}$$

Diâmetro dos parafusos:

$$D_{ref} := \frac{7}{8} \text{ in} = 22,22 \text{ mm}$$

Diâmetro dos furos:

$$D_{furo_ref} := D_{ref} + 1,5 \text{ mm} = 23,725 \text{ mm}$$

Número de parafusos:

$$n_{ref} := 8$$

2.1 Verificação do cisalhamento dos parafusos

Especificação da viga:

Espessura da mesa:

$$t_{f_viga} := 11 \text{ mm}$$

Espessura da alma;

$$t_{w_viga} := 7,2 \text{ mm}$$

Altura do perfil:

$$d_{viga} := 203 \text{ mm}$$

Largura da mesa da viga:

$$bf_{\text{viga}} := 203 \text{ mm}$$

Material dos parafusos: ASTM A325

Tensão de ruptura dos parafusos:

$$f_{ub} := 825 \text{ MPa}$$

Tensão de escoamento dos parafusos:

$$f_{yb} := 635 \text{ MPa}$$

Esforço de tração atuante na chapa:

$$F_{tsd} := F_{x_I} + \frac{(-M_{z_I})}{d_{\text{viga}}} = 598,55 \text{ kN}$$

Esforço cisalhante atuante em cada parafuso:

$$F_{tsd_{\text{parafuso}}} := \frac{F_{tsd}}{n_{\text{ref}}} = 74,82 \text{ kN}$$

Área bruta da seção dos parafusos:

$$A_g := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ref}}}{2} \right)^2 = 387,95 \text{ mm}^2$$

Área líquida da seção dos parafusos:

$$A_p := A_g \cdot 0,75 = 290,96 \text{ mm}^2$$

Força resistente de corte máxima do parafuso:

$$\varphi_{a2} := 1,35$$

$$F_{tsd_{\text{parafuso}}} = 74,82 \text{ kN} \leq F_{dr_{\text{ref}}} := \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_{ub}}{\varphi_{a2}} = 94,83 \text{ kN}$$

Aprovado!

2.2 Verificação tensão de contato parafuso - chapa de ligação

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo e a mesa da viga:

Menor valor entre:

$$80 \text{ mm} - D_{\text{furo}_{\text{ref}}} = 56,28 \text{ mm}$$

$$120 \text{ mm} - \frac{D_{\text{furo}}_{\text{ref}}}{2} = 108,14 \text{ mm}$$

$$l_c := 80 \text{ mm} - D_{\text{furo}}_{\text{ref}} = 56,275 \text{ mm}$$

$$f_u := 400 \text{ MPa}$$

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_{\text{ref}} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 312,64 \text{ kN}$$

$$F_{tsd_{\text{parafuso}}} = 74,82 \text{ kN} \leq R_{dc} = 312,64 \text{ kN}$$

Aprovado!

2.3 Verificação do Rasgamento da Chapa de Ligação

Área bruta sujeita ao cisalhamento:

$$A_{gv} := 2 \cdot 240 \text{ mm} \cdot t_{\text{ref}} = 60 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita ao cisalhamento:

$$A_{nv} := A_{gv} - 6 \cdot D_{\text{furo}}_{\text{ref}} \cdot t_{\text{ref}} = 42,21 \text{ cm}^2$$

Área líquida sujeita à tração:

$$A_{nt} := (105,5 \text{ mm} - D_{\text{furo}}_{\text{ref}}) \cdot t_{\text{ref}} = 10,22 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} := 1,0$$

$$f_y := 250 \text{ MPa}$$

Menor valor entre:

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 1053,2 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 969,54 \text{ kN}$$

$$R_{dr} := \frac{1}{\gamma_{a2}} \cdot (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) = 969,54 \text{ kN}$$

Força solicitante considerando rasgamento da chapa de ligação:

$$F_{tsd} = 598,5491 \text{ kN} \leq R_{dr} = 969,537 \text{ kN}$$

Aprovado !

2.4 Verificação Tensão de Contato Parafuso - Mesa da Viga

Máxima carga de corte do parafuso considerando escoamento da área de contato do furo e a mesa da viga:

Menor valor entre:

$$80 \text{ mm} - D_{furo_{ref}} = 56,28 \text{ mm}$$

$$120 \text{ mm} - \frac{D_{furo_{ref}}}{2} = 108,14 \text{ mm}$$

$$l_c := 80 \text{ mm} - D_{furo_{ref}} = 56,275 \text{ mm}$$

$$R_{dc} := \frac{1,5 \cdot l_c \cdot t_f \cdot v_{viga} \cdot f_u}{\gamma_a 2} = 275,12 \text{ kN}$$

$$F_{tsd_{parafuso}} = 74,82 \text{ kN} \leq R_{dc} = 275,12 \text{ kN}$$

Aprovado!