

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEMEC

**ERIC SARTINI GODOY
HUGO MORAES DE FRIAS CARVALHO**

**PÓRTICO ROLANTE PARA MONTAGEM DE UMA ÁRVORE DE
NATAL MOLHADA EM GALPÃO: CONCEPÇÃO E
DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2025

ERIC SARTINI GODOY
HUGO MORAES DE FRIAS CARVALHO

**PÓRTICO ROLANTE PARA MONTAGEM DE UMA ÁRVORE DE
NATAL MOLHADA EM GALPÃO: CONCEPÇÃO E
DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, do Departamento de
Engenharia Mecânica, do Centro Federal de
Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alexandre Amar de
Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Leydervan de Souza
Xavier

RIO DE JANEIRO

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G589 Godoy, Eric Sartini

Pórtico rolante para montagem de uma árvore de natal molhada em galpão: concepção e dimensionamento estrutural / Eric Sartini Godoy [e] Hugo Moraes de Frias Carvalho. — 2025.
157f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia : f. 154-157

Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Coorientador: Leydervan de Souza Xavier

1. Engenharia mecânica. 2. Petróleo – Equipamento mecânico. 3. 4. Análise estrutural (Engenharia). I. Carvalho, Hugo Moraes de Frias. II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de. (Orient.). III. Xavier, Leydervan de Souza. (Coorient.). IV. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

Cientistas estudam o mundo como ele é;
Engenheiros criam o mundo que nunca existiu.

Theodore von Kármán

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos orientadores, Prof. Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar e Prof. Dr. Leydervan de Souza Xavier, por toda a orientação, paciência e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Estendemos nossos agradecimentos aos professores e colaboradores do CEFET/RJ, que foram fundamentais em nossa formação acadêmica e nos forneceram a base de conhecimento necessária para chegar até aqui.

Agradecemos profundamente às nossas famílias, que nos apoiaram de forma incondicional durante toda a trajetória da graduação. Sua compreensão nos momentos de ausência, incentivo constante e apoio emocional foram determinantes para que pudéssemos concluir esta etapa com êxito, materializada na entrega e defesa deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradecemos também aos amigos e colegas de curso, cuja parceria foi essencial ao longo dessa jornada. As conversas, o compartilhamento de ideias e o apoio mútuo contribuíram significativamente para nosso crescimento acadêmico e para que esta trajetória fosse mais leve e prazerosa.

RESUMO

GODOY, Eric. FRIAS, Hugo. **Pórtico rolante para montagem de uma árvore de natal molhada em galpão: concepção e dimensionamento estrutural**. 2025. 168 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

A expansão do mercado de óleo e gás e a demanda por equipamentos submarinos levaram uma empresa fabricante de sistemas *subsea* a desenvolver um novo modelo de árvore de natal molhada (ANM), exigindo a criação de uma infraestrutura interna capaz de manipular seus componentes mais pesados durante a montagem. Para atender a essa necessidade, este trabalho apresenta o dimensionamento estrutural de um pórtico rolante de viga dupla com capacidade nominal de 10 toneladas, projetado para o içamento do *composite valve block* (CVB) e demais módulos da ANM em um galpão industrial dedicado ao projeto. O dimensionamento foi conduzido conforme a ABNT NBR 8400, incluindo análises de carregamento, flechas, tensões equivalentes, flambagem e verificação das soldas e ligações. Além das verificações analíticas, foi realizada uma análise computacional por meio de simulações numéricas para avaliar o comportamento estrutural sob as condições críticas de carregamento. Os resultados confirmaram que a configuração proposta atende aos requisitos operacionais e de segurança, mantendo tensões e deslocamentos dentro dos limites admissíveis da norma e garantindo desempenho estrutural confiável para as operações de montagem da nova ANM.

Palavras-chave: pórtico rolante, árvore de natal molhada, dimensionamento estrutural, elevação de carga.

ABSTRACT

GODOY, Eric. FRIAS, Hugo. **Gantry crane for wet christmas tree assembly in an industrial facility: concept and structural design.** 2025. 168 pages. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education - Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

The expansion of the oil and gas market and the increasing demand for subsea equipment have led a manufacturer of subsea systems to develop a new model of wet christmas tree (WCT), requiring the creation of internal infrastructure capable of handling its heaviest components during assembly. To meet this need, this work presents the structural design of a double-girder overhead crane with a nominal capacity of 10 tonnes, intended for lifting the composite valve block (CVB) and other modules of the Christmas Tree inside an industrial facility dedicated to the project. The design was carried out in accordance with the ABNT NBR 8400 standard, including load analyses, deflection limits, equivalent stress evaluation, buckling verification, and assessment of welds and structural connections. In addition to the analytical procedures, a computational analysis based on numerical simulations was performed to evaluate the structural behavior under critical loading conditions. The results confirmed that the proposed configuration meets the operational and safety requirements, maintaining stresses and displacements within normative limits and ensuring reliable structural performance for the assembly operations of the new Christmas Tree.

Keywords: gantry crane, wet christmas tree, structural design, load lifting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção da produção de óleo e gás no Brasil até 2050	20
Figura 2 – Árvore de natal molhada vertical	22
Figura 3 – Pórtico rolante monoviga	25
Figura 4 – Pórtico rolante dupla viga	26
Figura 5 – Componentes de um pórtico rolante	27
Figura 6 – Sistema de produção submarino.....	29
Figura 7 – Conjunto ANM + <i>tubing hanger</i> + <i>wellhead</i>	30
Figura 8 – Árvore de natal molhada	32
Figura 9 – Diagrama de fluxo de uma ANM de produção.	33
Figura 10 – ANM destacando o CVB	35
Figura 11 – Pórtico rolante de viga dupla.....	38
Figura 12 – Valor de Ψh	53
Figura 13 – Valores do coeficiente λ	55
Figura 14 – Valores de K para diferentes condições de vínculos	60
Figura 15 – Comparação de flambagem global (à esquerda) e flambagem local (à direita)	62
Figura 16 – Modelo do pórtico	67
Figura 17 – Proporções das vigas	68
Figura 18 – Diagrama de corpo livre do pórtico	71
Figura 19 – Vigas principais.....	79
Figura 20 – Diagrama de corpo livre da viga principal.....	80
Figura 21 – Esforço cortante VV devido a cargas verticais ao longo da viga principal	81
Figura 22 – Momento fletor MV devido a cargas verticais ao longo da viga principal	81
Figura 23 – Esforço cortante VH devido a cargas horizontais ao longo da viga principal	82
Figura 24 – Momento fletor MH devido a cargas horizontais ao longo da viga principal	82
Figura 25 – Viga de fechamento.....	88
Figura 26 – Especificações técnicas do <i>trolley</i> motorizado YALE Global King	89
Figura 27 – Informações dimensionais do <i>trolley</i> motorizado YALE Global King	90
Figura 28 – Dimensões do trilho ASCE 60	90
Figura 29 – Fixação dos trilhos por meio de presilhas	91

Figura 30 – Vigas de apoio.....	92
Figura 31 – Diagrama de corpo livre da viga de apoio	93
Figura 32 – Esforço cortante VH devido a cargas horizontais ao longo da viga de apoio.....	94
Figura 33 – Momento fletor MH devido a cargas horizontais ao longo da viga de apoio.....	94
Figura 34 – Viga de cabeceira	100
Figura 35 – Diagrama de corpo livre da viga de cabeceira	101
Figura 36 – Esforço cortante VV devido a cargas verticais ao longo da viga de cabeceira	102
Figura 37 – Momento fletor MV devido a cargas verticais ao longo da viga de cabeceira	102
Figura 38 – Disposição das soldas ao longo das vigas.....	111
Figura 39 – Disposição da solda nas interfaces viga-flange.....	116
Figura 40 – Furos de folga para parafusos do sistema imperial	123
Figura 41 – Limites dimensionais para roscas da série padrão	124
Figura 42 – Distâncias mínimas e máximas entre fixadores, distâncias à borda e às extremidades	125
Figura 43 – Geometria do flange e posicionamento dos fixadores	126
Figura 44 – Área de contato entre a cabeça do fixador com o flange	129
Figura 45 – Condições de contorno para simulação computacional	134
Figura 46 – Contatos tipo <i>separating</i> (verde) e <i>bonding</i> (vermelho).....	134
Figura 47 – Exemplo de cargas aplicadas	136
Figura 48 – Resultado de tensões nas vigas com carga posicionada à 1 m da extremidade	137
Figura 49 – Resultado de tensões nas vigas com carga posicionada no centro.....	137
Figura 50 – Tensões nos flanges para o caso de carga a 1 m da extremidade.....	138
Figura 51 – Flange mais crítico para o caso de carga a 1 m da extremidade	139
Figura 52 – Tensões nos flanges para o caso de carga centralizada.....	139
Figura 53 – Flange mais crítico para o caso de carga centralizada	140
Figura 54 – Simulação intermediária sem furos roscados (com pré-carga máxima de 109,35 kN)	141
Figura 55 – Resultado de tensões na solda	142
Figura 56 – Resultado global dos fixadores	143
Figura 57 – Resultado de tensões na união aparafusada	144
Figura 58 – Deslizamento na junta entre flanges	145

Figura 59 – Abertura na junta entre flanges	145
Figura 60 – Resultado das tensões na viga principal.....	146
Figura 61 – Resultado da deflexão na viga principal	147
Figura 62 – Resultado das tensões na viga de fechamento.....	148
Figura 63 – Resultado das tensões na viga de apoio	149
Figura 64 – Resultado das tensões na viga de cabeceira	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do projeto	37
Tabela 2 – Classes de utilização de equipamentos	40
Tabela 3 – Classes de espectro de equipamentos	42
Tabela 4 – Grupos de equipamentos.....	42
Tabela 5 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupo	43
Tabela 6 – Valores de β_2 e $\Psi_{\min}$	45
Tabela 7 – Valores de V_h para estimativa de Ψ	46
Tabela 8 – Valores de aceleração recomendados pela NBR 8400-1	49
Tabela 9 – Tensões admissíveis à tração (ou compressão) simples	57
Tabela 10 – Valores do coeficiente de amplificação M_x	58
Tabela 11 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ para perfis laminados em aço $\sigma_e = 240 \text{ N/mm}^2$	61
Tabela 12 – Valores dos coeficientes de flambagem K_σ e K_τ	63
Tabela 13 – Coeficiente de segurança de flambagem $\nu\nu$	65
Tabela 14 – Propriedades do aço ASTM A36.....	69
Tabela 15 – Dimensões máximas das vigas do projeto	70
Tabela 16 – Forças peso da estrutura.....	72
Tabela 17 – Forças de inércia da estrutura	78
Tabela 18 – Propriedades da seção transversal das vigas principais	83
Tabela 19 – Propriedades da seção transversal das vigas de apoio	95
Tabela 20 – Propriedades da seção transversal das vigas de cabeceira.....	105
Tabela 21 – Propriedades do eletrodo E7018	110
Tabela 22 – Tamanhos mínimos dos cordões de solda	111
Tabela 23 – Propriedades torcionais de soldas de filete	117
Tabela 24 – Valores nominais de tensão de escoamento f_{yb} e de resistência última à tração f_{ub} para parafusos	122

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Árvore de Natal Molhada
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOP	<i>Blowout Preventer</i>
CEFET/RJ	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
CVB	<i>Composite Valve Block</i>
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
PMV	<i>Production Master Valve</i>
PSDVB	<i>Production Shut Down Valve Block</i>
PWV	<i>Production Wing Valve</i>
PSV	<i>Production Swab Valve</i>
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
XO	<i>Cross-Over Valve</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$n_{máx.}$	Número total de ciclos de elevação
k_p	Fator de espectro
S_G	Cargas devido ao peso próprio
S_L	Cargas devido à carga de trabalho
n_i	Número de ciclos associados
ψ	Coeficiente dinâmico
m	Massa equivalente do sistema
F_H	Força horizontal
I_m	Aceleração média do sistema
T_m	Duração média de aceleração
F_{CM}	Força de inércia média
T_1	Período de oscilação da carga suspensa
μ	Razão carga-massa
ψ_h	Coeficiente dinâmico horizontal
$F_{c.máx.}$	Força de inércia máxima da carga
$F_{IN.V}$	Força de inércia das vigas
$F_{IN.P}$	Força de inércia do pórtico
F_{RT}	Força de reação transversal nas rodas
σ_a	Tensão normal admissível do material
τ_a	Tensão cisalhante admissível do material
M_x	Coeficiente de amplificação
σ	Tensão normal
σ_n	Tensão axial
τ	Tensão cisalhante

σ_{eq}	Tensão equivalente
λ	Índice de esbeltez
ω	Coeficiente de flambagem global
l	Comprimento de flambagem equivalente
r	Raio de giração da seção
K	Coeficiente de flambagem local
S_b	Tensão de dobra
σ_{cr}^v	Tensão crítica de flambagem
$\sigma_{cr.c}^v$	Tensão crítica combinada
σ_p	Limite de proporcionalidade
$\sigma_{cr.cr}^v$	Tensão crítica combinada reduzida
σ_{cp}	Tensão de comparação
f_G	Flecha devido ao peso próprio
f_L	Flecha devido à carga de trabalho
f_c	Contraflecha
F_P	Força peso
F_{AT}	Força de atrito
ρ	Massa específica do material
σ_e	Limite de escoamento do material
σ_r	Limite de ruptura do material
E	Módulo de elasticidade do material
ν	Coeficiente de Poisson do material
t	Espessura de chapa
A	Área da seção transversal
I	Momento de inércia
Q	Primeiro momento de área

W	Módulo de resistência
V	Esforço cortante
M	Momento fletor
s	Tamanho do cordão de solda
q	Fluxo de cisalhamento
a	Garganta efetiva
f_{yb}	Tensão de escoamento para parafusos
f_{ub}	Tensão última à tração para parafusos
$F_{p.c}$	Força de pré-carga
A_b	Área resistente do parafuso
d_b	Diâmetro nominal do parafuso
n_b	Número de parafusos
μ_f	Coefficiente de atrito na junta aparafusada
S_a	Tensão de membrana
S_b	Tensão de dobra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivos Específicos	23
1.3	METODOLOGIA	23
1.3.1	Estrutura do Projeto	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	PÓRTICOS ROLANTES	25
2.1.1	Principais Componentes de um Pórtico Rolante	26
2.2	ÁRVORES DE NATAL MOLHADA.....	28
2.2.1	Definição e Função de Árvores de Natal Molhadas no <i>Layout</i> Submarino	28
2.2.2	Composição e Principais Componentes da ANM	31
2.2.3	Definição da Carga de Referência para Dimensionamento do Pórtico	35
2.3	NORMAS	36
3	ESPECIFICAÇÕES DO PÓRTICO	37
3.1	DEFINIÇÕES DO MODELO	37
3.2	CLASSIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	39
3.2.1	Classe de Utilização do Equipamento	40
3.2.2	Espectro de Carga do Equipamento.....	41
3.2.3	Grupo de Equipamentos	42
4	DIMENSIONAMENTO INICIAL.....	44
4.1	SOLICITAÇÕES	44
4.1.1	Solicitações Devido às Cargas Principais.....	44
4.1.2	Solicitações Devido a Movimentações Verticais	45
4.1.2.1	<i>Cargas devido à elevação da carga de trabalho.....</i>	<i>45</i>

4.1.2.2	<i>Cargas devido à aceleração/desaceleração do mecanismo de elevação e cargas de choque vertical durante o deslocamento sobre trilhos</i>	47
4.1.3	Solicitações Devido às Cargas Horizontais	47
4.1.3.1	<i>Cargas de inércia devido aos movimentos transversal e longitudinal</i>	48
4.1.3.2	<i>Reações transversais devido ao movimento do equipamento</i>	54
4.1.3.3	<i>Efeito de choque</i>	56
4.1.4	Solicitações Devido às Cargas por Efeitos Climáticos.....	56
4.2	VERIFICAÇÕES	56
4.2.1	Determinação das Tensões Admissíveis	57
4.2.2	Coeficiente de Amplificação	57
4.2.3	Verificação Contra o Escoamento	58
4.2.3.1	<i>Tensões normais</i>	58
4.2.3.2	<i>Tensões de cisalhamento</i>	59
4.2.3.3	<i>Tensões combinadas</i>	59
4.2.4	Verificação Contra a Flambagem Global	59
4.2.5	Verificação contra Flambagem Local.....	61
4.2.6	Verificação de Contraflecha	66
5	DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA	67
5.1	CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES	70
5.1.1	Forças Peso	72
5.1.2	Forças de Inércia.....	73
5.1.2.1	<i>Força de inércia longitudinal da carga</i>	73
5.1.2.2	<i>Força de inércia transversal da carga</i>	75
5.1.2.3	<i>Força de inércia da estrutura do pórtico</i>	77
5.1.3	Força de Reação Transversal Média.....	78
5.1.4	Cargas Transmitidas ao Piso.....	79
5.2	VIGA PRINCIPAL	79

5.2.1	Verificações na Viga Principal	82
5.2.1.1	<i>Verificação contra o escoamento</i>	<i>83</i>
5.2.1.2	<i>Verificação contra a flambagem local</i>	<i>84</i>
5.2.1.3	<i>Verificação de contraflecha.....</i>	<i>87</i>
5.3	VIGA DE FECHAMENTO	88
5.4	VIGA DE APOIO	92
5.4.1	Verificações na Viga de Apoio.....	95
5.4.1.1	<i>Verificação contra o escoamento</i>	<i>95</i>
5.4.1.2	<i>Verificação contra a flambagem global</i>	<i>96</i>
5.4.1.3	<i>Verificação contra a flambagem local</i>	<i>97</i>
5.5	VIGA DE CABECEIRA.....	100
5.5.1	Forças Normais nas Rodas	102
5.5.2	Forças de Atrito nas Rodas	103
5.5.3	Verificações na Viga de Cabeceira.....	104
5.5.3.1	<i>Verificação contra o escoamento</i>	<i>105</i>
5.5.3.2	<i>Verificação contra a flambagem local</i>	<i>106</i>
5.5.3.3	<i>Verificação de contraflecha.....</i>	<i>109</i>
6	DIMENSIONAMENTO COMPLEMENTAR	110
6.1	SOLDAGEM	110
6.1.1	Soldagem para Construção das Vigas	110
6.1.2	Soldagem Viga-Flange	115
6.2	JUNTAS APARAFUSADAS	118
6.2.1	Método de Criação e Avaliação da Conexão.....	119
6.2.2	Especificações e Desenvolvimento do Projeto da Junta.....	120
6.2.3	Verificação Contra o Escoamento do Flange e dos Fixadores	129
7	ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	132

7.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO	133
7.2	FORÇAS APLICADAS.....	135
7.3	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	136
7.3.1	Avaliação dos Flanges	138
7.3.2	Avaliação das Soldas	141
7.3.3	Avaliação dos Fixadores.....	143
7.3.4	Avaliação das Vigas	146
7.3.4.1	<i>Avaliação da viga principal</i>	<i>146</i>
7.3.4.2	<i>Avaliação da viga de fechamento</i>	<i>147</i>
7.3.4.3	<i>Avaliação da viga de apoio</i>	<i>148</i>
7.3.4.4	<i>Avaliação da viga de cabeceira.....</i>	<i>149</i>
8	CONCLUSÃO.....	151
8.1	SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS.....	152
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS	158

1 INTRODUÇÃO

A indústria de óleo e gás representa uma parcela essencial da economia brasileira, sendo responsável por cerca de 10% do produto interno bruto (PIB) do país (ITA, 2023). O Brasil se destaca como o maior produtor de petróleo da América do Sul e ocupa a sétima colocação entre os maiores produtores no *ranking* global (EIA, 2024). Essa expressiva produção é fortemente concentrada no ambiente *offshore*, que corresponde a cerca de 94,6% do total nacional, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2024).

Essa concentração no ambiente *offshore* está diretamente ligada à exploração de águas profundas e ultraprofundas, especialmente nos campos do pré-sal, reconhecidos por sua alta produtividade e pela excelente qualidade do óleo extraído (ANP, 2024). Esse cenário, aliado a reformas regulatórias e descobertas de novas reservas, tem impulsionado uma crescente onda de investimentos, tanto públicos quanto privados, voltados à expansão da capacidade produtiva nacional, como mostra a Figura 1 (ITA, 2023).

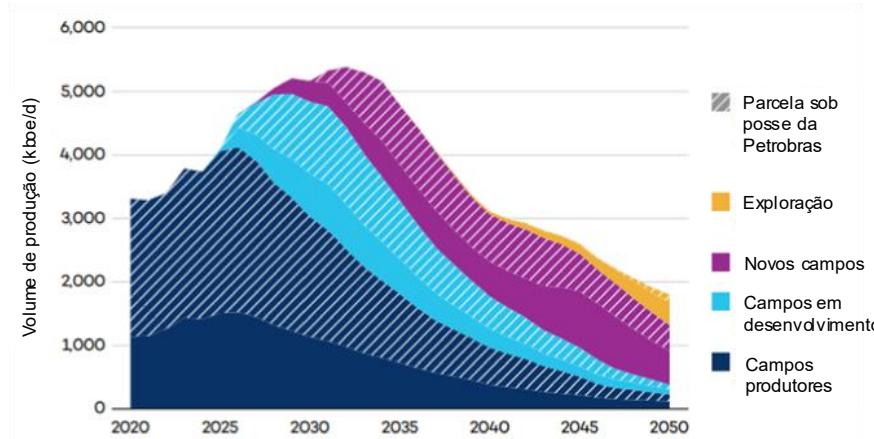


Figura 1 – Projeção da produção de óleo e gás no Brasil até 2050

Fonte: Data Market View (2025)

Para acompanhar os investimentos realizados pelas operadoras em águas brasileiras, os fornecedores precisam desenvolver tecnologias cada vez mais confiáveis, eficientes e integradas. Um exemplo dessa tendência é a atuação da Baker Hughes, que firmou contrato com a Petrobras para fornecer sistemas de completação inteligente para seus campos *offshore*. Entre as soluções entregues estão válvulas de controle intervalar, sensores digitais e sistemas de comunicação contínua entre o poço e a superfície, que permitem o monitoramento em tempo real e o ajuste

remoto do fluxo de produção, contribuindo para o aumento da produtividade e vida útil dos poços (NASDAQ, 2024).

Outro exemplo notável é a tecnologia HISEP[®], desenvolvida pela Petrobras. Aplicada em sistemas de produção de petróleo submarino, essa inovação permite separar o gás do óleo diretamente no fundo do mar. Em vez de enviar o gás até o FPSO (unidade flutuante de produção) para separação, o sistema HISEP[®] faz a separação ainda no leito marinho e reinjeta o gás no próprio poço, o que eleva sua pressão e facilita a extração do petróleo. Isso torna o processo mais eficiente em termos energéticos e reduz a necessidade de transporte do gás e aumenta a produção de óleo do poço. Além disso, contribui para a sustentabilidade, ao evitar a emissão de gases poluentes na atmosfera (Petrobras, 2024).

1.1 MOTIVAÇÃO

Seguindo essa tendência, uma empresa que fabrica equipamentos submarinos para extração de petróleo está em processo de desenvolvimento de um novo modelo de árvore de natal molhada (ANM), mais moderna, confiável e adaptativa para diferentes condições de operação. Uma ANM é um conjunto de válvulas, conexões e dispositivos instalados na cabeça de poços de petróleo ou gás, conforme mostrado na Figura 2, cuja função é controlar a vazão, permitir intervenções e garantir a segurança das operações. É um componente fundamental para o funcionamento de sistemas de produção offshore, especialmente em campos de água profunda e ultraprofunda (BNDES, 2012).



Figura 2 – Árvore de natal molhada vertical
Fonte: You Should Know Ocean Engineering (2016)

Para viabilizar a fabricação da nova geração de árvores, será necessário que a empresa invista na construção de um novo complexo de montagem. O projeto prevê a criação de um galpão com infraestrutura para montagem, manuseio e testes dos componentes da ANM e, dentre os diversos recursos necessários para a instalação, destaca-se a necessidade de um sistema de elevação robusto, seguro e versátil, capaz de movimentar cargas de grande porte.

Considerando as exigências operacionais, definiu-se a utilização de um pórtico rolante como sistema de elevação, que será o objeto de estudo e dimensionamento deste trabalho. O pórtico será dedicado exclusivamente à montagem de árvores de natal, enquanto uma ponte rolante ficará responsável pela movimentação do equipamento já montado. Essa divisão foi adotada com o objetivo de garantir a disponibilidade da ponte rolante para outras atividades, uma vez que as atividades com a ANM podem demandar bastante tempo de carga suspensa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é dimensionar a estrutura de um pórtico rolante dupla viga que será utilizado na movimentação de componentes de árvores de natal molhada (ANM) no interior de um galpão industrial. O projeto visa atender às exigências operacionais de içamento de cargas pesadas com segurança, eficiência e adaptabilidade, considerando as particularidades do ambiente fabril. Ressalta-se que o escopo do estudo está restrito ao dimensionamento estrutural do pórtico, não abrangendo a seleção, o dimensionamento ou o detalhamento de componentes eletromecânicos, como motores, redutores, rodas, freios e sistemas de acionamento, os quais são indicados como objetos de estudo para trabalhos futuros.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Apresentar os conceitos básicos sobre pórticos rolantes.
- Apresentar os conceitos básicos sobre árvores de natal molhadas.
- Levantar e analisar os requisitos operacionais.
- Dimensionar os elementos estruturais do pórtico.
- Discutir acerca dos resultados do projeto.
- Elaborar desenhos técnicos.

1.3 METODOLOGIA

Para o projeto do pórtico rolante, inicialmente foram levantados e analisados os requisitos operacionais do projeto como as características do ambiente, da carga e da operação. O dimensionamento estrutural foi realizado com base em normas técnicas vigentes, com destaque para a NBR 8400:2019, que trata do cálculo de estruturas submetidas a esforços de máquinas e equipamentos. Por fim, os desenhos técnicos e a análise computacional foram realizados através do *software* SIMSOLID®.

1.3.1 Estrutura do Projeto

- Capítulo 1. Introdução: apresenta o contexto do problema, a motivação do estudo, os objetivos do projeto e os procedimentos metodológicos empregados.
- Capítulo 2. Referencial Teórico: reúne o embasamento teórico acerca de pórticos rolantes e árvores de natal molhadas, além da apresentação das principais normas utilizadas ao longo do dimensionamento.
- Capítulo 3. Especificações do Pórtico: define as condições de contorno, requisitos operacionais e a classificação do grupo de equipamentos.
- Capítulo 4. Dimensionamento Inicial: expõe os conceitos fundamentais, equações e critérios de cálculo que servem de base para o desenvolvimento estrutural.
- Capítulo 5. Dimensionamento da Estrutura: apresenta o dimensionamento completo das vigas e do pórtico como um todo, aplicando os conceitos desenvolvidos no capítulo anterior.
- Capítulo 6. Dimensionamento Complementar: aborda o dimensionamento das juntas soldadas e aparafusadas.
- Capítulo 7. Análise Computacional: descreve as simulações numéricas realizadas no *software* SIMSOLID® para validação estrutural do projeto.
- Capítulo 8. Conclusão: sintetiza os principais resultados obtidos e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos, normas e fundamentos técnicos que sustentam o desenvolvimento deste projeto. O capítulo se inicia com uma descrição dos principais componentes e características de um pórtico rolante e, em seguida, são exploradas as particularidades das árvores de natal molhadas (ANMs) e seus componentes, que constituem a carga a ser manipulada. Por fim, são apresentadas as principais normas que regem o dimensionamento do pórtico.

2.1 PÓRTICOS ROLANTES

O pórtico rolante é um tipo de ponte rolante composto por uma viga principal, que pode ser do tipo simples ou dupla, conforme mostrado na Figura 3 e Figura 4, respectivamente. Sua sustentação é apoiada sobre pernas que se deslocam sobre trilhos ou por meio de rodas. Nesse tipo de equipamento, a movimentação da carga ocorre de maneira longitudinal, pelo movimento do próprio pórtico, e transversal, pelo movimento do *trolley* (Mazzella, 2022).



Figura 3 – Pórtico rolante monoviga
Fonte: Grupo IW8 (2024)



Figura 4 – Pórtico rolante dupla viga

Fonte: CSM Pontes Rolantes (2024)

Uma das principais vantagens dos pórticos em relação às pontes rolantes é que ele dispensa a necessidade de uma estrutura fixa superior, como vigas de rolamento e colunas metálicas integradas à edificação. Além disso, a instalação do pórtico é significativamente mais simples e rápida, reduzindo os custos iniciais de implantação.

2.1.1 Principais Componentes de um Pórtico Rolante

Os pórticos rolantes são constituídos por diversos componentes mecânicos e estruturais, que estão identificados na Figura 5.



Figura 5 – Componentes de um pórtico rolante

Fonte: Adaptado de JustDial (2025)

Cada elemento é responsável por uma função específica na estrutura e operação do equipamento. A seguir, será apresentada a função de cada componente do pórtico (Aicrane, 2024).

- **Viga principal:** é o principal elemento estrutural do pórtico, responsável por suportar o peso da carga movimentada e dos equipamentos de içamento.
- **Viga de fechamento:** é o elemento estrutural que contribui para a estabilidade do pórtico, garantindo o movimento solidário entre as vigas principais.
- **Viga de apoio:** é o elemento que sustenta os componentes superiores do pórtico. Sua altura determina a altura útil de elevação do equipamento.
- **Viga de cabeceira:** é o elemento que conecta e estabiliza as vigas de apoio. É nessa viga que são instaladas as rodas.
- **Trolley (ou carro trole):** é o elemento responsável pela movimentação transversal da carga. É ele que suporta a talha elétrica.
- **Talha elétrica:** é o elemento responsável pela movimentação vertical da carga.
- **Moitão e gancho:** são os elementos responsáveis pela conexão e sustentação da carga.

2.2 ÁRVORES DE NATAL MOLHADA

Para o adequado dimensionamento do pórtico rolante, é fundamental conhecer com precisão as características da carga que será manipulada, no caso a árvore de natal molhada (ANM). Essa compreensão envolve não apenas seu funcionamento e papel no sistema de produção submarina, mas também sua composição estrutural, os principais componentes e as massas associadas.

Esse conhecimento prévio permite identificar o componente mais exigente da ANM, aquele que concentra as maiores demandas em termos de massa, volume, interfaces críticas e sensibilidade estrutural. O dimensionamento do pórtico será realizado com base nesse componente de referência, garantindo que o sistema projetado tenha capacidade suficiente para atender com segurança e eficiência a todas as operações previstas.

Além de embasar tecnicamente o projeto do sistema de içamento, essa análise também contribui para a operação segura do equipamento, permitindo a identificação de pontos sensíveis da estrutura, cuidados específicos que devem ser adotados durante a movimentação e os riscos associados a falhas no manuseio.

Neste subtópico, será apresentada uma visão geral da ANM, abordando sua função no sistema submarino de extração de petróleo e gás. Em seguida, serão descritos os principais componentes que a constituem, com destaque para aqueles que impactam diretamente nas condições de projeto. Por fim, será definida a carga de referência que servirá como base para o dimensionamento do pórtico rolante.

2.2.1 Definição e Função de Árvores de Natal Molhadas no *Layout* Submarino

O *layout* geral de um sistema de extração submarina de petróleo e gás é composto por diversos elementos que desempenham funções variadas, desde a transmissão de energia elétrica e dados, até o controle e transporte do fluido produzido. Evidentemente, sua principal função é o escoamento eficiente e seguro do óleo e gás extraídos do poço até a unidade de produção.

Um típico sistema submarino de produção integra componentes como *wellhead*, *tubing head*, *tubing hanger*, árvore de natal molhada (ANM), sistema de injeção de químicos, *jumper*s,

manifolds, processamento submarino, *risers* e, por fim, a plataforma de produção ou FPSO (API TR 17TR13, 2016). Cada um desses elementos tem papel específico no caminho do fluido desde o poço até a superfície, sendo a árvore de natal uma das interfaces mais críticas entre o reservatório e o restante do sistema. Um exemplo típico de sistema de produção submarino é mostrado na Figura 6.

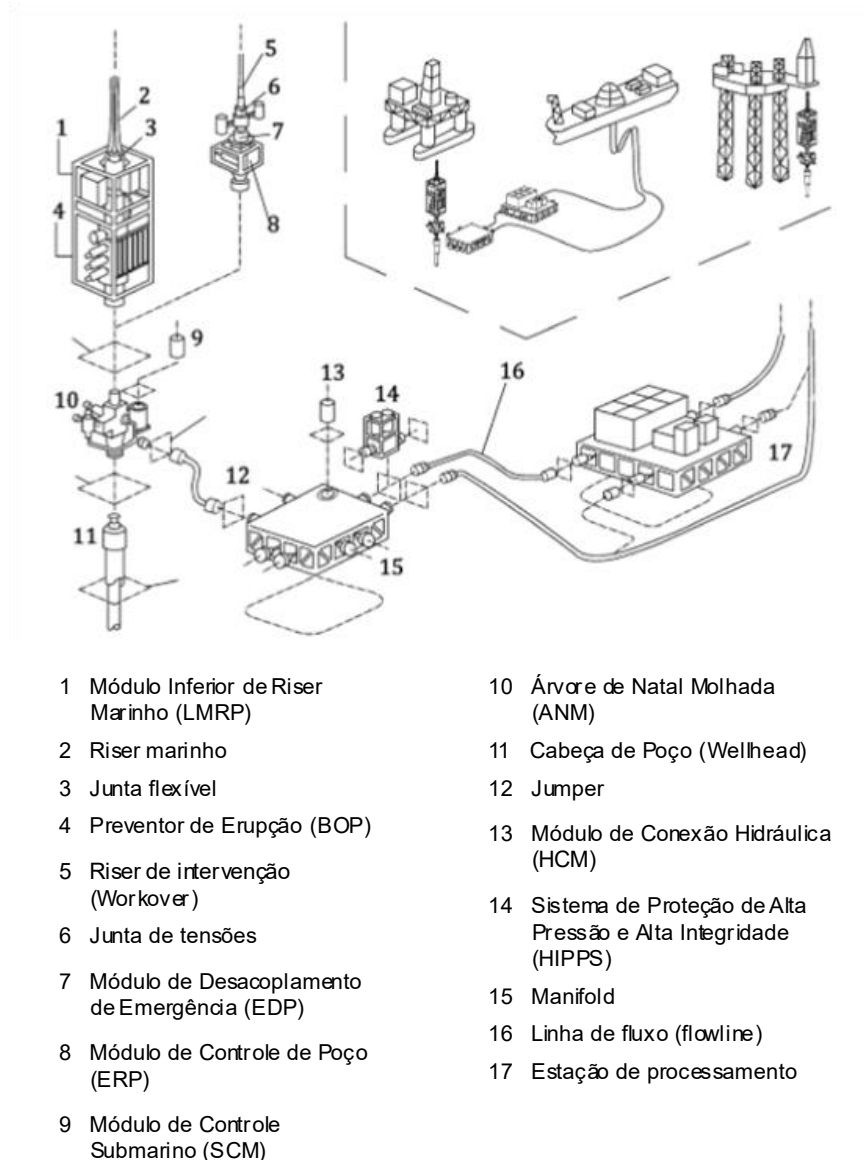


Figura 6 – Sistema de produção submarino

Fonte: BS EN ISO 13628-1 (2025)

Em geral, a árvore de natal molhada é instalada diretamente sobre o conjunto composto pela *wellhead*, *tubing head* e *tubing hanger*, como pode ser visto na Figura 7. Focando apenas nesse

conjunto, pode-se dizer que o *tubing hanger* é o responsável por suportar a coluna de produção, que conecta o fundo do poço ao leito marinho. Esse componente pode ser instalado e apoiado diretamente na ANM, ou necessitar do uso de um intermediário chamado *tubing head*, dependendo da configuração da ANM adotada (API TR 17TR13, 2016).

A *wellhead* é a estrutura principal de sustentação do conjunto. Sua função primária ancorar e vedar as colunas de revestimento do poço, assegurando o isolamento das zonas produtoras e impedindo o contato dos fluidos de produção com o ambiente externo. Além disso, ela também suporta mecanicamente a árvore de natal molhada, a *tubing head* (quando presente), o *tubing hanger* e consequentemente a coluna de produção. A *wellhead* é fixada diretamente no solo, onde sua base é projetada para distribuir as cargas estruturais e de pressão para o leito marinho (API TR 17TR13, 2016).

Além da função estrutural, todos esses componentes são projetados com interfaces de vedação robustas, capazes de conter os diferenciais de pressão entre o interior do poço e o ambiente marinho, garantindo a segurança operacional e do ambiental da instalação (API TR 17TR13, 2016).

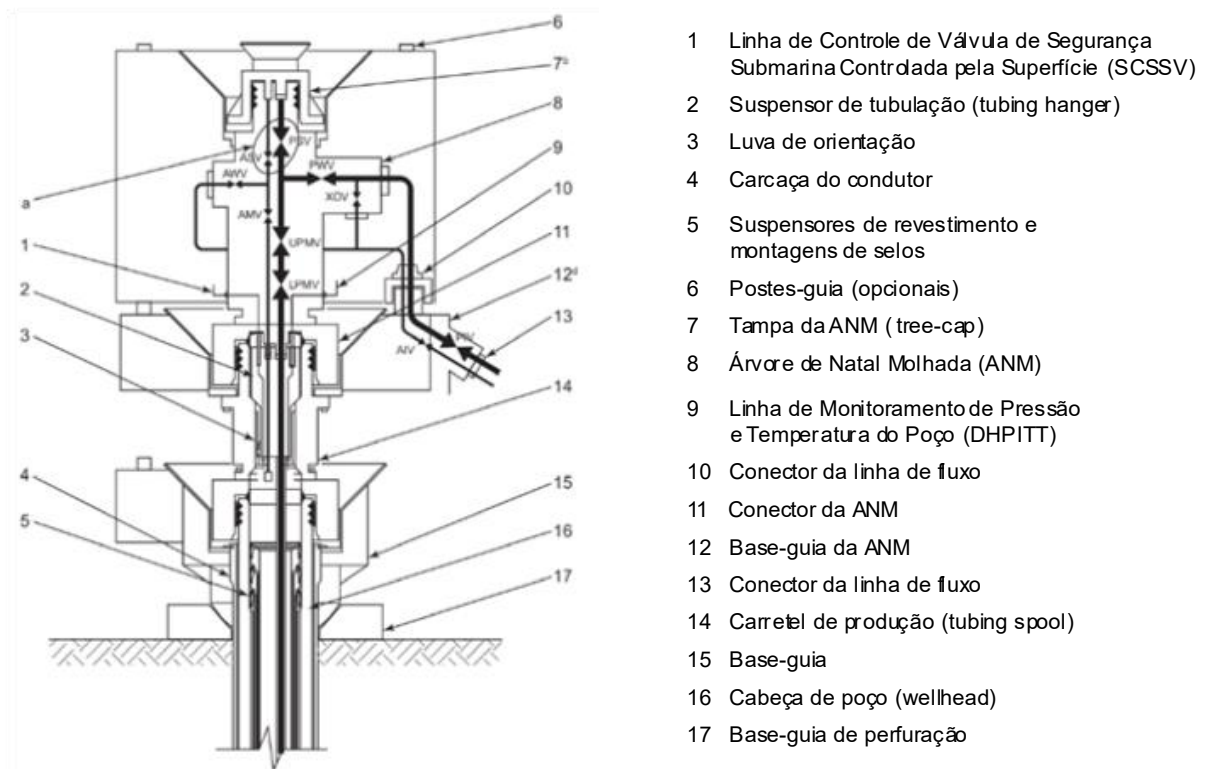


Figura 7 – Conjunto ANM + *tubing hanger* + *wellhead*

Fonte: API TR 17TR13 (2016)

A ANM é um conjunto de válvulas e dispositivos, cuja função principal é controlar remotamente o fluxo de fluidos, permitindo sua interrupção ou redirecionamento sempre que necessário por razões operacionais ou de segurança (API TR 17TR13, 2016). A montante, a ANM pode ser conectada ao poço por meio da *wellhead* ou da *tubing head*, enquanto a jusante (para ANM de produção), é ligada ao *jumper* que direciona o fluido até o *manifold*. Além das válvulas de bloqueio, o sistema inclui válvulas reguladoras de vazão para produção ou injeção, integração com o sistema de injeção química e válvulas dedicadas ao controle de variáveis no interior do poço (*downhole*). A ANM também incorpora sensores para medição de vazão, pressão e temperatura, garantindo o monitoramento contínuo das condições operacionais.

Dessa forma, além de ser essencial no funcionamento do poço, a árvore de natal molhada representa um elemento de elevada complexidade estrutural, sendo o foco principal do presente projeto de içamento. O conhecimento de seus componentes e da função que cada um desempenha é indispensável tanto para o correto dimensionamento do sistema de içamento, quanto para a preservação de sua integridade durante a movimentação.

2.2.2 Composição e Principais Componentes da ANM

Uma ANM é composta por uma série de componentes, incluindo conectores, válvulas de bloqueio, válvula *choke*, tampa superior (*tree-cap*), estruturas-guia e interfaces de controle. Na Figura 8 pode-se comparar o tamanho da ANM com uma pessoa, e pode-se notar também a complexidade do equipamento.



Figura 8 – Árvore de natal molhada

Fonte: O Globo (2023)

As árvores de natal são constituídas por diversos componentes mecânicos e estruturais. Devido a quantidade abundante de componentes em uma árvore de natal, nesta seção serão apresentados apenas os principais para o estudo do pórtico rolante.

Na Figura 9, é possível observar o caminho percorrido pelo fluido de produção em uma ANM. Ela é um esquemático do CVB (*composite valve block*) em conjunto com os principais blocos de válvula da ANM.

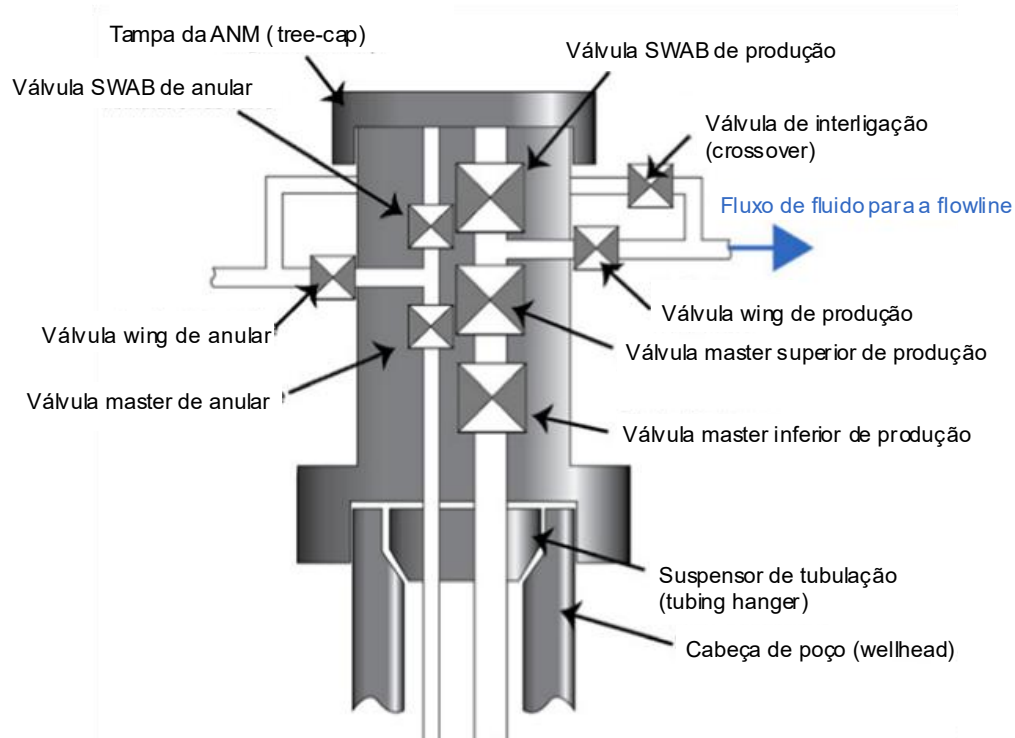


Figura 9 – Diagrama de fluxo de uma ANM de produção.

Fonte: Oilfield Mania (2016)

Dessa forma, o fluido entra pela base da ANM, vindo do *tubing hanger*, e segue por um percurso onde encontra as seguintes válvulas:

- *Production master valves* (PMV): responsáveis pelo bloqueio completo do fluxo para manutenção ou emergências.
- *Production wing valve* (PWV): normalmente aberta durante a operação, ela libera o fluxo para os sistemas a jusante. Seu fechamento é feito para permitir operações de manutenção no poço.
- *Production swab valve* (PSV): encontra-se fechada durante uma operação normal. É aberta apenas para intervenções, quando a *tree-cap* (*high pressure cap*) é removida e um BOP (*blowout preventer*) é conectado ao topo da árvore, permitindo acesso ao poço.
- Em paralelo ao caminho do fluido de produção, tem-se o caminho de fluido anular, onde existem válvulas semelhantes que controlam o fluxo de fluido anular. Entre os dois fluxos (anular e de produção), existe a *cross-over valve* (XO), que permite a comunicação entre eles, viabilizando o redirecionamento do fluido anular para o trajeto de produção, quando necessário.

Além desses componentes, após o CVB o fluido de produção passa pela válvula *choke*, que é uma válvula de controle de fluxo. Ela faz causa um estrangulamento no fluxo, controlando sua vazão. De forma resumida, após isso o fluxo passa por um caminho chamado *flow-loop*, onde o fluxo é guiado até o *jumper*. Antes de passar o fluido para o *jumper*, a ANM possui um último bloco de válvula bem em seu final, chamado PSDVB (*production-shut-down-valve-block*) que é uma última medida de segurança para impedir a passagem de fluido em caso de falha em algum equipamento a jusante.

Cada uma das válvulas possui um atuador hidráulico e um acionamento mecânico por ROV (*remotely operated vehicle*) em caso de falha do sistema hidráulico. A árvore possui um sistema de controle refinado que é acoplado ao sistema de tubulação hidráulica composta por finos tubos metálicos, que controla o acionamento de cada equipamento de forma remota pela plataforma. Sendo assim, é necessário que a ANM receba através de umbilicais, fornecimento de energia elétrica, hidráulica e de fluidos químicos.

Por fim, vale destacar que a ANM é um equipamento extremamente complexo, que atua sobre poços submarinos, os quais podem alcançar enormes pressões geológicas e altas temperaturas. Seu grande número de interfaces com subcomponentes poderia resultar em falhas catastróficas causando vazamentos para o ambiente. Por isso, sua fabricação deve ser feita com extremo cuidado, tanto em etapas de manufatura, quando de montagem e transporte, qualquer dano nas superfícies de vedação pode resultar em enormes prejuízos.

2.2.3 Definição da Carga de Referência para Dimensionamento do Pórtico

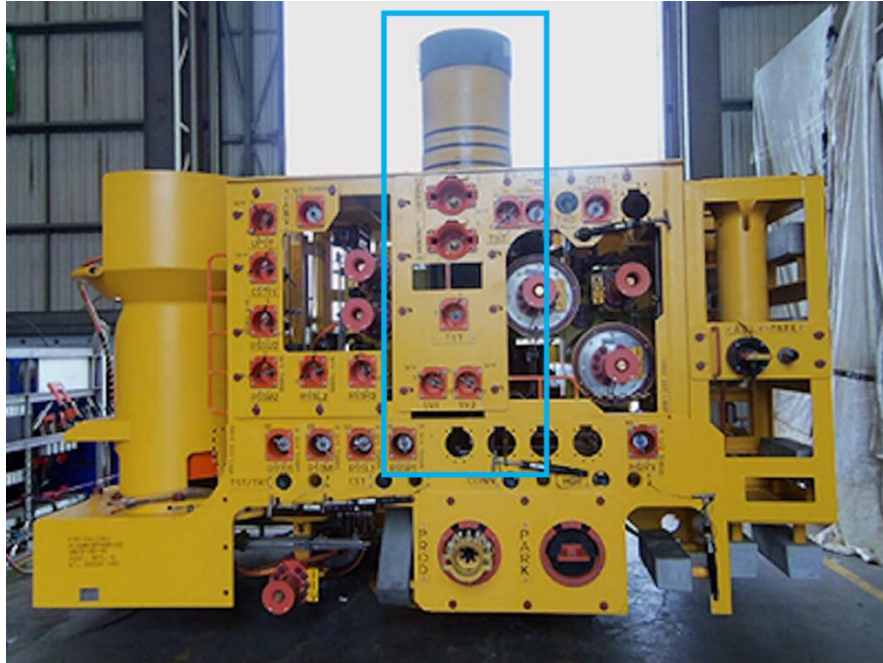


Figura 10 – ANM destacando o CVB
Fonte: Offshore Magazine (2016)

Dentre todos os componentes que integram a árvore de natal molhada, o *composite valve block* (CVB) destaca-se como o mais crítico, robusto e exigente em termos estruturais. Trata-se de um bloco maciço de aço, usinado com extrema precisão, no qual são realizadas furações internas que funcionam como dutos integrados para o escoamento dos fluidos. Esses canais internos permitem a passagem do fluido de produção principal, anular e de fluidos químicos, que são injetados nos pontos estratégicos do poço e da ANM.

O número elevado de interfaces presentes nesse bloco com diversos outros blocos de válvulas e conectores é um fator crítico, pois cada uma dessas conexões representa um potencial ponto de vazamento. Para garantir a estanqueidade, essas conexões usam vedações metálicas ou elastoméricas, que são muito sensíveis a danos superficiais. Qualquer arranhão ou impacto pode comprometer a vedação, causando vazamentos que resultam em prejuízos ambientais e financeiros.

Além de seu papel funcional e estrutural, como pode ser visto na Figura 10, o CVB é também o componente da ANM mais pesado e de maiores dimensões, concentrando a maior massa e complexidade entre os blocos que compõem o conjunto. Por essa razão, sua movimentação

durante operações de içamento exige cuidados redobrados, com controle rigoroso da posição, velocidade e pontos de apoio. Qualquer desalinhamento ou impacto pode danificar superfícies críticas de vedação ou comprometer conexões sensíveis.

Diante de todos esses fatores como massa elevada, complexidade estrutural, sensibilidade a danos, criticidade funcional e grandes dimensões de empacotamento, o CVB foi selecionado como a carga de referência para o dimensionamento do pórtico rolante proposto neste trabalho. Ao adotar o CVB como base para o projeto, garante-se que o sistema de içamento terá capacidade suficiente para suportar, com segurança e precisão, as exigências impostas pelo componente mais crítico da árvore de natal molhada, garantindo o içamento dos demais componentes com segurança.

2.3 NORMAS

O dimensionamento de pórticos rolantes deve seguir diretrizes técnicas que garantem a segurança, eficiência e conformidade com os padrões da engenharia. A seguir, são apresentadas as principais normas que orientam o projeto deste tipo de sistema de elevação.

- ABNT NBR 8400-1:2019: define a classificação dos equipamentos e estabelece as cargas e combinações de carregamento a serem consideradas no dimensionamento das estruturas e mecanismos.
- ABNT NBR 8400-2:2019: estabelece os critérios para verificação da estrutura quanto ao escoamento, à fadiga e à estabilidade.
- AWS D1.1/D1.1M:2020: estabelece os requisitos para soldagem em estruturas metálicas fabricadas com aços carbono e baixa liga.
- Eurocode 3 – EN 1993-1-8:2005: estabelece os critérios de dimensionamento e verificação de juntas aparafusadas em estruturas de aço.
- API 16H:2017: estabelece os requisitos verificação de parafusos, porcas e prisioneiros utilizados em equipamentos da indústria de óleo e gás.

3 ESPECIFICAÇÕES DO PÓRTICO

A Tabela 1 apresenta as principais especificações do projeto, que serão fundamentais para as análises estruturais e para a definição das condições de uso do equipamento.

3.1 DEFINIÇÕES DO MODELO

Tabela 1 – Especificações do projeto

Parâmetro	Valor
Modelo do pórtico	Dupla-viga
Capacidade do pórtico	10.000 kg
Altura do pórtico	8,05 m
Comprimento do vão	10,00 m
Comprimento das vigas de cabeceira	4,00 m
Comprimento entre vãos	1,98 m
Vida útil desejada	15 anos
Regime de trabalho	34 ciclos/dia
Dias de trabalho por ano	365 dias
Velocidade de translação do pórtico	0,40 m/min
Curso de translação do <i>trolley</i>	8,00 m
Velocidade de translação do <i>trolley</i>	5,20 m/min
Curso de içamento/arriamento	7,68 m
Velocidade mínima de içamento/arriamento	1,43 m/min
Massa da carga	7.174 kg
Altura da carga	2,61 m
Largura da carga	0,83 m
Comprimento da carga	0,62 m
Altura da ANM	4,70 m
Largura da ANM	4,25 m
Comprimento da ANM	3,15 m

Fonte: Autoria própria (2025)

A opção pelo pórtico dupla-viga, apresentado na Figura 11, foi motivada pela elevada massa dos componentes das árvores de natal, em especial do *composite valve block* (CVB), e pela alta frequência prevista para operação. Esse tipo de pórtico apresenta vantagens em relação ao modelo monoviga, como maior capacidade de carga, melhor distribuição de esforços e maior resistência à flexão e torção.

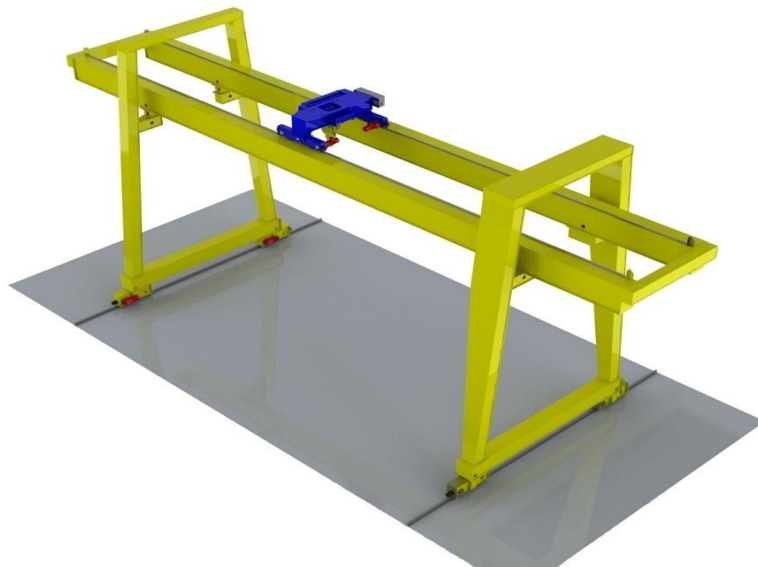


Figura 11 – Pórtico rolante de viga dupla
Fonte: Moviservi (2023)

Outro ponto relevante é a maior versatilidade para a integração de acessórios, como talhas e *trolleys* de maior capacidade, além de possibilitar uma altura útil de elevação superior. Essa configuração atende de forma mais eficiente às restrições operacionais impostas pelo ambiente fabril e às exigências normativas de dimensionamento.

Conforme descrito na Seção 2.2.3, o CVB foi adotado como referência para o dimensionamento do pórtico devido à sua massa e dimensões expressivas, além de concentrar interfaces críticas que exigem manuseio cuidadoso. Sua massa representa cerca de 25% da massa total da árvore de natal, cuja massa é de aproximadamente 32 toneladas, o que evidencia sua importância para o projeto estrutural do sistema de elevação. Entretanto, o vão de 10 metros adotado entre as vigas garante flexibilidade na produção, permitindo que o mesmo equipamento

seja utilizado futuramente para a montagem de PLEMs, *manifolds* e outros equipamentos submarinos, caso os novos modelos de árvore de natal da companhia não mantenham a demanda elevada.

Além disso, vale destacar que o pórtico será instalado em um galpão industrial fechado, o que elimina a influência de variáveis ambientais externas, como vento, chuva e incidência solar. Essa condição favorece a estabilidade operacional e reduz a necessidade de considerações adicionais de carregamento ambiental. Por outro lado, o espaço físico disponível no interior do galpão impõe restrições geométricas que devem ser cuidadosamente avaliadas no dimensionamento do equipamento.

Com o modelo estrutural definido e o *design* de referência estabelecido, o próximo passo é classificar o equipamento conforme os critérios da NBR 8400. Em seguida, são realizados o dimensionamento dos elementos estruturais e a verificação da estabilidade, garantindo que o pórtico atenda aos requisitos normativos de segurança e desempenho.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A norma NBR 8400:2019 – Cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas, estabelece critérios para o dimensionamento de pórticos, pontes rolantes e demais equipamentos de içamento. Seu objetivo é garantir que o projeto atenda tanto às condições de resistência e estabilidade, quanto às particularidades de uso a que cada equipamento será submetido.

Por exemplo: segundo a norma, equipamentos destinados a ciclos rápidos, com altas velocidades e uso intenso, não podem ser projetados da mesma forma que máquinas de pequeno porte, voltadas para tarefas ocasionais. Por isso, ela define procedimentos de cálculo que se adaptam à realidade de cada aplicação, levando em conta fatores como carga de trabalho, peso próprio, espectro de carga e classe de utilização, respeitando particularidades de cada equipamento e forma de utilização.

A definição correta da classe de utilização e do espectro de carga constitui uma etapa essencial no processo de dimensionamento. A partir dessa análise, torna-se possível enquadrar o equipamento no grupo estrutural adequado, estabelecendo os parâmetros normativos que irão orientar o cálculo e garantir que o projeto seja coerente com as condições reais de operação.

3.2.1 Classe de Utilização do Equipamento

A classe de utilização é um parâmetro definido pela norma NBR 8400 que representa a intensidade de uso de um equipamento de elevação ao longo de sua vida útil. Ela é determinada a partir do número de ciclos de levantamento, onde cada ciclo corresponde à sequência completa de operações que se inicia com a elevação da carga e termina quando o equipamento retorna à condição de estar pronto para um novo içamento. O número total de ciclos de elevação $n_{m\acute{a}x.}$ está expresso na Equação (1).

$$n_{m\acute{a}x.} = \frac{\text{Ciclos}}{\text{dia}} * \frac{\text{dia}}{\text{ano}} * \text{Vida útil} \quad (1)$$

$$n_{m\acute{a}x.} = 34 * 365 * 15$$

$$n_{m\acute{a}x.} = 186.150$$

Com o valor de $n_{m\acute{a}x.}$ obtido, é possível enquadrar o equipamento em uma das classes de utilização previstas na norma. A Tabela 2 apresenta os intervalos de ciclos correspondentes a cada classe, permitindo identificar que o pórtico se enquadra na categoria *U4*.

Tabela 2 – Classes de utilização de equipamentos

Símbolo	Duração total do uso				
	(número $n_{m\acute{a}x.}$ de ciclos de elevação)				
<i>U0</i>		<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	16.000
<i>U1</i>	16.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	32.000
<i>U2</i>	32.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	63.000
<i>U3</i>	63.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	125.000
<i>U4</i>	125.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	250.000
<i>U5</i>	250.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	500.000
<i>U6</i>	500.000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	1.000.000

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1 (2019)

3.2.2 Espectro de Carga do Equipamento

O espectro de carga é um parâmetro que descreve a distribuição das cargas içadas ao longo da vida útil do equipamento. Em outras palavras, ele permite avaliar com que frequência diferentes frações da carga nominal de trabalho são aplicadas durante os ciclos de operação. Por exemplo, um pórtico pode operar parte do tempo próximo em sua capacidade máxima, mas na maior parte dos ciclos movimentar cargas menores. Essa proporção de uso influencia diretamente o dimensionamento dos elementos estruturais e a classificação do equipamento.

Para quantificar essa distribuição, a NBR 8400 introduz o fator de espectro k_p calculado a partir da Equação (2), que relaciona a carga m_1 com a carga máxima admissível $m_{máx.}$ e o número de ciclos realizados n_i com o número total de ciclos ao longo da vida útil $n_{máx.}$.

De forma conservadora, neste projeto considerou-se que 100% dos ciclos de operação serão realizados com a carga do CVB. Na prática, isso significa assumir que o pórtico estará sempre submetido à sua condição mais severa de uso, elevando o nível de exigência para o dimensionamento estrutural.

$$k_p = \left(\frac{m_1}{m_{máx.}} \right)^3 * \frac{n_i}{n_{máx.}} \quad (2)$$

$$k_p = \left(\frac{7.174 \text{ kg}}{10.000 \text{ kg}} \right)^3 * 1$$

$$k_p = 0,37$$

Com o valor do fator de espectro k_p calculado, é possível enquadrar o equipamento em uma das classes de espectro definidas. A Tabela 3 apresenta os limites correspondentes a cada classe, possibilitando verificar que o pórtico se enquadra na categoria Q3. Essa categoria representa um regime de operação com cargas variáveis de intensidade moderada, refletindo condições típicas de pontes e pórticos rolantes em ambientes industriais.

Tabela 3 – Classes de espectro de equipamentos

Símbolo		Fator de espectro k_p			
$Q1$		<	k_p	<	0,125
$Q2$	0,125	<	k_p	<	0,250
$Q3$	0,250	<	k_p	<	0,500
$Q4$	0,500	<	k_p	<	1,000

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

3.2.3 Grupo de Equipamentos

Após a determinação da classe de utilização e da classe de espectro, é possível definir o grupo do equipamento, que representa a associação entre esses dois parâmetros. Essa classificação é essencial para traduzir as condições de operação em requisitos de projeto, orientando o dimensionamento estrutural e a escolha dos componentes mais adequados. A Tabela 4 apresenta os grupos de equipamentos de elevação, possibilitando verificar que o pórtico se enquadra na categoria $A5$.

Tabela 4 – Grupos de equipamentos

Classe de espectro de carga	Classe de utilização									
	$U0$	$U1$	$U2$	$U3$	$U4$	$U5$	$U6$	$U7$	$U8$	$U9$
$Q1$	$A1$	$A1$	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$
$Q2$	$A1$	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A8$
$Q3$	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A8$	$A8$
$Q4$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$	$A8$	$A8$	$A8$

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Além disso, a norma fornece uma tabela de referência (Tabela 5) que relaciona diferentes tipos de equipamentos aos respectivos grupos de classificação. Nessa tabela, verifica-se que os pórticos rolantes costumam ser enquadrados nos grupos $A5$ ou $A6$, o que confirma a coerência com o valor obtido neste trabalho e reforça a consistência do projeto.

A partir dessa mesma tabela, identificou-se ainda que o equipamento se enquadra na classe de elevação $HC2$, parâmetro que será utilizado adiante para o cálculo dos carregamentos.

Tabela 5 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupo

Tipo de equipamento		Detalhes relacionados à natureza do uso ^a	Grupo do equipamento	Classe de elevação
Referência	Indicação			
10	Equipamentos para contêineres (pontes e pórticos rolantes)	Gancho ou “ <i>spreader</i> ” (barra de carga)	<i>A5 – A6</i>	<i>HC2</i>

Fonte: Adaptado da NBR 8400-1 (2019)

4 DIMENSIONAMENTO INICIAL

Com o grupo do equipamento definido, inicia-se o dimensionamento estrutural do pórtico. Esta etapa se inicia pela identificação das solicitações atuantes sobre o equipamento, prosseguindo com o cálculo das tensões correspondentes e as verificações de segurança necessárias.

4.1 SOLICITAÇÕES

Nesta etapa, são avaliados os carregamentos atuantes na estrutura, a fim de determinar as tensões desenvolvidas durante sua operação. Essas tensões são calculadas com base nas cargas principais, nas cargas devido aos movimentos verticais e horizontais e, por fim, nas cargas devido aos efeitos climáticos.

4.1.1 Solicitações Devido às Cargas Principais

As cargas principais correspondem às solicitações atuantes sobre a estrutura do pórtico quando o equipamento se encontra em repouso. Elas devem ser consideradas nas condições mais desfavoráveis de carregamento, ou seja, na combinação de posição e magnitude de carga que resulte na maior tensão no componente em análise.

Essas cargas compreendem:

- As cargas devido ao peso próprio S_G .
- As cargas devido à carga de trabalho S_L .

Para efetuar os cálculos de forma mais conservadora, deve-se considerar as cargas devido ao peso de todos os componentes móveis em suas posições mais desfavoráveis possíveis para a estrutura.

4.1.2 Solicitações Devido a Movimentações Verticais

As solicitações verticais surgem durante a operação de elevação e estão associadas às variações dinâmicas impostas ao sistema. Elas ocorrem quando a carga é erguida de forma repentina, ou quando há aceleração/desaceleração no movimento de elevação.

Também são considerados os impactos do deslocamento do pórtico sobre os trilhos. Nessas situações, irregularidades, como emendas e desníveis, podem provocar pequenos saltos da estrutura, transmitindo esforços adicionais às vigas e colunas.

4.1.2.1 Cargas devido à elevação da carga de trabalho

Para representar os esforços adicionais gerados pelos efeitos dinâmicos do içamento, a NBR 8400 estabelece o coeficiente dinâmico Ψ . Esse fator é aplicado como um multiplicador sobre a massa da carga içada (a qual a norma descreve como as massas da carga útil, dos dispositivos de manuseio e de uma porção da massa dos cabos de elevação suspensos ou corrente), de forma a considerar as solicitações extras decorrentes da inércia da carga quando ela é erguida repentinamente. O valor de Ψ deve ser obtido a partir da Equação (3)

$$\Psi = \Psi_{\min.} + \beta_2 * V_h \quad (3)$$

Os valores de $\Psi_{\min.}$ e β_2 devem ser obtidos em função da classe de elevação do equipamento e devem ser obtidos na Tabela 6, conforme indicado pela norma.

Tabela 6 – Valores de β_2 e $\Psi_{\min.}$

Classe de elevação do equipamento	β_2	$\Psi_{\min.}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Para este projeto, o pórtico foi enquadrado na classe de elevação é *HC2*, conforme descrito no capítulo anterior.

V_h representa a velocidade de elevação em regime constante. Seu valor é definido de acordo com o tipo de içamento do mecanismo de içamento e é obtido a partir da Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de V_h para estimativa de Ψ

Caso de solicitação	Tipo de acionamento de elevação e seu método de operação				
	<i>HD1</i>	<i>HD2</i>	<i>HD3</i>	<i>HD4</i>	<i>HD5</i>
Caso I, Caso II	$V_{h.máx.}$	$V_{h.cs}$	$V_{h.cs}$	$0,5 \times V_{h.máx.}$	$V_h = 0$
Caso III	-	$V_{h.máx.}$	-	$V_{h.máx.}$	$0,5 \times V_{h.máx.}$

Onde:

HD1 é o mecanismo de elevação que não pode ser operado com velocidade baixa.

HD2 é uma velocidade baixa para o acionamento de elevação que pode ser selecionada pelo operador do equipamento.

HD3 é o sistema de controle de acionamento de elevação que assegura o uso de uma velocidade baixa estável até que a carga seja içada do solo.

HD4 é um controle de variação contínua de velocidade que pode ser utilizado pelo operador do equipamento.

HD5 é o sistema que após pré-tensionar o mecanismo de elevação, gera uma variação contínua de velocidade, independentemente do operador do equipamento.

$V_{h.máx.}$ é a velocidade nominal de elevação.

$V_{h.cs}$ é a velocidade mais baixa de elevação ou primeiro ponto de velocidade que pode ser selecionado pelo operador.

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Para este projeto, o caso de solicitação adequado é o Caso I (serviço normal sem vento), visto que o pórtico se encontra dentro de um galpão. De forma complementar, a NBR 8400 também define o Caso II, correspondente ao serviço normal com vento, aplicável a equipamentos operando em ambientes externos, e o Caso III, associado a situações excepcionais, como ventos extremos ou condições anormais de operação. No entanto, tais casos não se aplicam ao cenário analisado neste trabalho.

Além disso, o tipo de acionamento é *HD2*, ou seja, há duas velocidades que podem ser selecionadas pelo operador. Conclui-se que a velocidade a ser usada para determinar o coeficiente dinâmico é a velocidade mais baixa de elevação.

Em posse dos valores de $\Psi_{mín.}$, β_2 e V_h , é possível utilizar a Equação (3) para determinar o valor de Ψ .

$$\Psi = 1,10 + 0,34 * \frac{1,43 \text{ m/min}}{60 \text{ s}}$$

$$\Psi = 1,11$$

4.1.2.2 Cargas devido à aceleração/desaceleração do mecanismo de elevação e cargas de choque vertical durante o deslocamento sobre trilhos

O coeficiente dinâmico Ψ considera que o grau de impacto sobre a carga de trabalho é a maior força de choque. Por isso, considerando os trilhos assentados apropriadamente, as solicitações devido à aceleração/desaceleração do movimento de elevação e as reações devido ao deslocamento ao longo dos trilhos podem ser desprezadas.

4.1.3 Solicitações Devido às Cargas Horizontais

As solicitações horizontais que surgem ao longo da operação do pórtico são, principalmente, solicitações de inércia, ou seja, esforços gerados no início ou na interrupção de movimentos. Essas solicitações incluem:

- Inércia devido à aceleração: pode ser transversal, quando ocorre a movimentação da carga pela talha, ou longitudinal, quando é causada pelo deslocamento do pórtico como um todo, através de suas rodas.
- Reações horizontais transversais nas rodas: resultam do deslocamento do equipamento sobre os trilhos ou do enviesamento provocado por imperfeições na via de rolamento.
- Efeitos do choque: representam deformações estruturais que absorvem e dissipam as solicitações dinâmicas.

A seguir, será apresentado o detalhamento do cálculo de cada uma das forças mencionadas anteriormente, distribuído em subtópicos específicos. Por fim, devem ser consideradas as duas forças mais relevantes para o dimensionamento do pórtico.

4.1.3.1 Cargas de inércia devido aos movimentos transversal e longitudinal

As solicitações horizontais têm origem no deslocamento do pórtico realizado pelas rodas, ou no deslocamento transversal da carga provocado pelo movimento do *trolley*. Embora a norma mencione o movimento transversal, ela orienta que o cálculo dessas forças seja feito considerando-as como horizontais e paralelas ao trilho.

Essa abordagem é coerente com a aplicação do projeto atual, uma vez que a direção paralela ao trilho representa a menor rigidez estrutural do sistema. Além disso, a soma vetorial de forças de inércia atuando em direções paralelas resulta em um módulo superior ao da soma de vetores em direções ortogonais, o que reforça a necessidade de um dimensionamento mais conservador nessa direção.

A Tabela 8 apresenta as faixas de aceleração recomendadas pela norma para diferentes aplicações. A partir da tabela mencionada, foi definido que a velocidade de translação e aceleração do pórtico serão 0,40m/s e 0,16m/s², respectivamente.

A escolha desses parâmetros considerou critérios de segurança operacional e controle do movimento, uma vez que o pórtico será utilizado para movimentação de cargas elevadas. Velocidades e acelerações excessivas podem intensificar os efeitos dinâmicos e gerar forças de impacto significativas em situações imprevistas, aumentando o risco de danos estruturais, falhas de componentes e acidentes com potencial de gravidade elevada.

Além disso, em aplicações típicas de pórticos rolantes, os percursos de deslocamento geralmente não são extensos, de modo que o uso de velocidades mais elevadas não resulta em ganhos operacionais relevantes. Ao contrário, tais escolhas acarretariam maiores esforços inerciais, exigindo seções estruturais mais robustas e um dimensionamento menos eficiente do conjunto.

Tabela 8 – Valores de aceleração recomendados pela NBR 8400-1

Velocidade a ser atingida [m/s]	Velocidade baixa e moderada com deslocamento longo		Velocidade moderada e alta (aplicações normais)		Alta velocidade com acelerações altas	
	Tempo de aceleração [s]	Aceleração [m/s ²]	Tempo de aceleração [s]	Aceleração [m/s ²]	Tempo de aceleração [s]	Aceleração [m/s ²]
4,00			8,0	0,50	6,0	0,67
3,15			7,1	0,44	5,4	0,58
2,50			6,3	0,39	4,8	0,52
2,00	9,1	0,22	5,6	0,35	4,2	0,47
1,60	8,3	0,19	5,0	0,32	3,7	0,43
1,00	6,6	0,15	4,0	0,25	3,0	0,33
0,63	5,2	0,12	3,2	0,19		
0,40	4,1	0,098	2,5	0,16		
0,25	3,2	0,078				
0,16	2,5	0,064				

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Dando continuidade à análise, a norma estabelece uma metodologia de cálculo para determinar as solicitações horizontais decorrentes das forças de inércia geradas pelos movimentos operacionais dos equipamentos de elevação. Essas forças são responsáveis por parte significativa das ações dinâmicas que atuam sobre a estrutura, sendo fundamentais para a verificação de resistência e estabilidade do sistema.

O primeiro passo é a determinação da massa equivalente m do sistema, cujo objetivo é representar o conjunto de equipamentos móveis, com exceção da carga de trabalho, por uma massa única concentrada no ponto de suspensão da carga. Para isso a norma propõe a utilização da Equação (4).

$$m = m_0 + \sum_i^n \frac{I_i W_i^2}{v^2} \quad [\text{kg}] \quad (4)$$

Onde:

- m é a massa equivalente.
- m_0 é a massa total de todos os elementos, exceto a carga de trabalho, que acompanham o mesmo movimento linear do ponto de suspensão da carga.
- I_i é o momento de inércia do elemento em análise.
- W_i^2 é a velocidade angular.
- v^2 é a velocidade linear.

A Equação (4) apresenta duas parcelas principais. A primeira, representada por m_0 , corresponde à massa total dos componentes que se deslocam linearmente junto ao ponto de suspensão da carga, representando a inércia de translação do sistema.

A segunda parcela, expressa por $\sum_i^n \frac{I_i W_i^2}{v^2}$, considera os elementos com movimento rotacional, cuja inércia angular é convertida em uma massa equivalente linear para que sua contribuição seja somada à inércia total. A norma ainda permite simplificações, como desconsiderar a inércia de componentes rotativos não acoplados diretamente ao eixo do motor, desde que sua influência seja pequena. No caso do pórtico rolante, conclui-se que os componentes rotativos que geram o movimento linear e que deverão ser incluídos nessa parcela são: Motor de translação, redutor e as rodas motorizadas. Essa abordagem torna o cálculo mais prático sem comprometer significativamente a precisão dos resultados.

O próximo passo consiste em calcular a força horizontal F_H que será utilizada no cálculo da aceleração média. As forças de inércia surgem quando se aplica uma aceleração ao corpo, ela representa a resistência ao movimento. No caso do pórtico rolante, as forças de inércia podem surgir no início do movimento (aceleração), ou no final do movimento (frenagem). Para este projeto, foi utilizada a força devido à frenagem do pórtico, onde F_H é o produto do coeficiente de atrito μ_{rt} (entre as rodas e o trilho) e a força normal F_N , conforme Equação (5).

$$F_H = \mu_{rt} * F_N \quad [\text{kN}] \quad (5)$$

Dessa forma, deve-se avaliar qual das duas fases de aceleração resulta em uma maior força de inércia para que dessa forma o dimensionamento seja feito sempre com base no pior cenário possível.

Em seguida, deve-se determinar a aceleração média do sistema J_m . Esse parâmetro define a intensidade das solicitações dinâmicas transmitidas à estrutura. Valores elevados indicam partidas ou frenagens bruscas, que geram esforços adicionais nas vigas, trilhos e demais componentes de sustentação. O valor de J_m é calculado conforme a Equação (6).

$$J_m = \frac{F_H}{m + m_1} \quad [\text{m/s}^2] \quad (6)$$

Onde:

- F_H é a força horizontal exercida devido à inércia da carga.
- m é a massa equivalente do sistema.
- m_1 é a massa da carga.

Após determinar a aceleração média, é possível calcular a duração média de aceleração T_m . Valores reduzidos representam partidas ou frenagens mais bruscas, resultando em forças de inércia maiores. A Equação (7) relaciona a velocidade média de regime horizontal v e a aceleração média do sistema J_m para a determinação de T_m .

$$T_m = \frac{v}{J_m} \quad [\text{s}] \quad (7)$$

Finalmente, é possível calcular a força de inércia média F_{CM} . Seu valor é obtido multiplicando a aceleração média do sistema J_m pela massa da carga suspensa m_1 , conforme apresentado na Equação (8).

$$F_{CM} = m_1 * J_m \quad [\text{kN}] \quad (8)$$

Além disso, a norma também define um coeficiente dinâmico horizontal Ψ_h , utilizado para considerar os efeitos adicionais das variações de velocidade e das oscilações que ocorrem durante o movimento do equipamento. Esse coeficiente é aplicado como um fator multiplicativo

sobre a força de inércia média F_{CM} , resultando na força máxima devido ao movimento horizontal $F_{c.máx.}$.

Para determinar o fator Ψ_h é necessário, primeiramente, calcular o período de oscilação da carga suspensa T_1 , que representa o tempo para um ciclo completo de movimento pendular. O período T_1 é função do comprimento de suspensão l e da gravidade g , conforme a Equação (9).

$$T_1 = 2\pi * \sqrt{\frac{l}{g}} \quad [\text{s}] \quad (9)$$

Para efeito de cálculo deve-se adotar o menor comprimento de suspensão possível, correspondente à posição mais elevada do gancho, pois um comprimento menor gera um período mais curto e, conseqüentemente, maior potencial de amplificação dinâmica. A norma estabelece, porém, um valor mínimo de referência $l_{\min.} = 2,00$ m quando o comprimento real na posição mais elevada for inferior a 2,00 m. Essa limitação evita amplificações excessivamente conservadoras que não são representativas do comportamento real para comprimentos muito curtos.

Em seguida, é calculada a razão carga-massa μ , que relaciona a massa da carga suspensa m_1 e a massa equivalente do sistema m . A Equação (10) determina o valor desse coeficiente.

$$\mu = \frac{m_1}{m} \quad (10)$$

De acordo com a NBR 8400-1, quando o sistema de acionamento é capaz de controlar a o movimento e manter a velocidade constante, considera-se que não há aceleração significativa. Nessa condição, a variação de velocidade é desprezível, e, portanto, o valor do coeficiente é adotado como $\mu = 0$.

Por fim, é calculado o coeficiente β , que relaciona a duração média de aceleração T_m e o período de oscilação da carga suspensa T_1 . A Equação (11) determina o valor desse coeficiente.

$$\beta = \frac{T_m}{T_1} \quad (11)$$

Com esses coeficientes obtidos, é possível encontrar na Figura 12 o valor de Ψ_h .

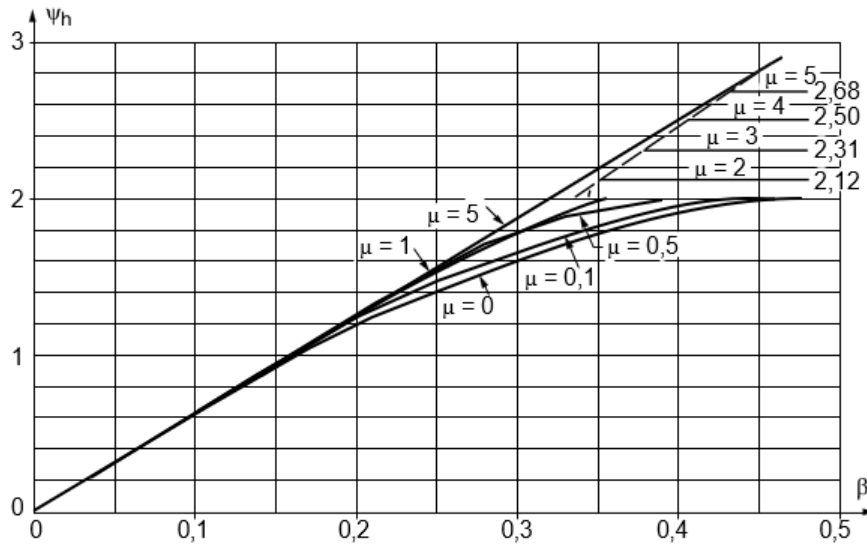


Figura 12 – Valor de Ψ_h
Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Além do método gráfico, o valor de Ψ_h quando $\mu = 0$, que é o caso do projeto em estudo, pode ser obtido pela função $F(\beta)$, descrita pelas Equações (12) e (13).

$$\Psi_h = 2 * \sin(\beta * \pi), \text{ para } \beta \leq 0,5 \quad (12)$$

$$\Psi_h = 2, \text{ para } \beta \geq 0,5 \quad (13)$$

Com todos os parâmetros definidos, a última etapa é calcular a força de inércia máxima da carga, $F_{c.máx.}$, devido ao movimento horizontal. Esse valor é obtido a partir da majoração da força de inércia média F_{CM} pelo coeficiente dinâmico horizontal Ψ_h , conforme Equação (14).

$$F_{c.máx.} = M_x * (\Psi_h * F_{cm}) \quad [\text{kN}] \quad (14)$$

O mesmo procedimento é adotado para a determinação da força de inércia transversal, resultante da movimentação do *trolley* sobre as vigas principais.

Além da inércia da carga, deve-se também calcular a inércia da própria estrutura, uma vez que as vigas sofrem acelerações durante o deslocamento do pórtico. De acordo com a norma, deve-se adotar o coeficiente dinâmico horizontal $\Psi_h = 2$ para esses casos. Assim, a força de inércia $F_{IN.V}$ aplicada individualmente em cada viga é dada pela Equação (15).

$$F_{IN.V} = M_x * (2 * J_m * (A_{máx.} * L * \rho)) \quad [\text{kN/m}] \quad (15)$$

Onde:

- M_x é o fator de majoração.
- J_m é a aceleração média do sistema.
- $A_{máx.}$ é a área máxima da seção transversal.
- L é o comprimento da viga.
- ρ é a massa específica do material.

Por fim, a força de inércia do pórtico é determinada pela Equação (16).

$$F_{IN.P} = \sum F_{IN.V} \quad [\text{kN/m}] \quad (16)$$

4.1.3.2 Reações transversais devido ao movimento do equipamento

Durante o deslocamento do pórtico sobre trilhos, surgem naturalmente forças longitudinais, que são intuitivas e correspondem principalmente à força de atrito entre as rodas e os trilhos. No entanto, além dessas, também se manifestam forças transversais, menos evidentes, mas igualmente importantes para o dimensionamento estrutural.

Essas forças transversais ocorrem devido ao contato lateral das rodas com os trilhos, provocado por imperfeições no alinhamento, irregularidades na superfície de rolamento, variações de rigidez ou pequenas diferenças de trajetória entre os *trucks*. Esse contato gera reações horizontais perpendiculares ao trilho, que se distribuem em pares opostos, formando um binário entre os lados do equipamento.

A norma ABNT NBR 8400 estabelece que essas forças devem ser consideradas no projeto, sendo calculadas a partir da carga vertical aplicada sobre os *trucks* multiplicada pelo coeficiente λ obtido pelo gráfico da Figura 13, que mostra λ em função da razão entre o vão transversal do equipamento e a distância entre eixos das rodas.

Essas reações transversais influenciam diretamente na estabilidade lateral do pórtico e no dimensionamento dos elementos estruturais que resistem ao movimento horizontal, como travessas, trilhos e contraventamentos.

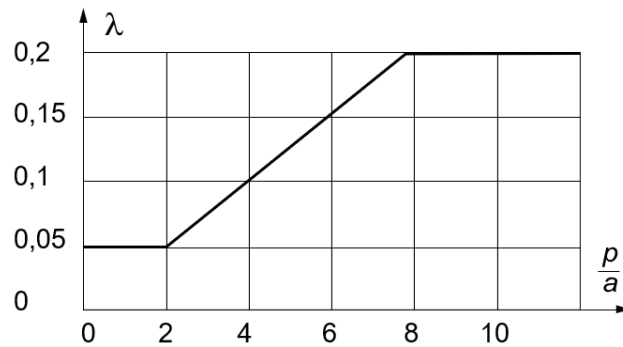


Figura 13 – Valores do coeficiente λ

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Como o pórtico apresenta uma largura de vão de 10 m, e as vigas de cabeceira possuem 4 m de comprimento, a razão entre o vão transversal do equipamento e a distância entre eixos das rodas é 2,5. A partir desse valor, observa-se na Figura 13 que o coeficiente λ corresponde a 0,0625.

Por fim, calcula-se a força de reação transversal das rodas F_{RT} por meio da Equação (17).

$$F_{RT} = \frac{M_x * (\lambda * F_P)}{n} \quad [\text{kN}] \quad (17)$$

Onde:

- M_x é o fator de majoração.
- λ é o coeficiente obtido a partir da Figura 13.
- F_P é a força peso total do sistema.
- n é a quantidade de *trucks*.

4.1.3.3 Efeito de choque

Segundo a NBR 8400 Para velocidade de deslocamentos horizontais inferiores a 0,5 m/s, não é considerado o efeito de choque em situações de possíveis oscilações. Como no projeto atual é considerada uma velocidade de 0,4 m/s, esse efeito pode ser desconsiderado.

4.1.4 Solicitações Devido às Cargas por Efeitos Climáticos

Como o pórtico encontra-se no interior de um galpão fechado, está protegido contra os efeitos climáticos, como vento, chuva e radiação solar. Desta forma, as solicitações decorrentes dos efeitos climáticos podem ser desconsideradas.

4.2 VERIFICAÇÕES

Conforme apresentado anteriormente, a NBR 8400-1 prevê três casos de solicitações de mecanismos, que devem ser considerados para o dimensionamento do equipamento. Esses casos representam diferentes condições de carregamento que o pórtico poderá experimentar ao longo de sua vida útil, e sua correta identificação é fundamental para garantir a segurança estrutural do sistema. São eles:

- Caso I: serviço normal sem vento.
- Caso II: serviço normal com vento limite de serviço.
- Caso III: solicitações excepcionais.

Este projeto se enquadra no Caso I, onde não há influência significativa do vento na operação. Dessa forma, a análise considera apenas as solicitações resultantes do peso próprio e da carga de serviço, além da parcela associada às acelerações.

A seguir, serão apresentados os critérios para a determinação da tensão admissível e para a aplicação do coeficiente de amplificação, além dos procedimentos para a verificação contra o escoamento, flambagem e fadiga, que serão utilizados nas etapas de dimensionamento.

4.2.1 Determinação das Tensões Admissíveis

Para verificar se a estrutura suporta de forma segura os esforços atuantes, é necessário comparar a tensão de cálculo com a tensão admissível σ_a do material. A NBR 8400-2 estabelece que, para os aços cuja relação entre a tensão de escoamento σ_e e a tensão de ruptura σ_r seja inferior a 0,7, a tensão admissível σ_a deve ser obtida a partir da Tabela 9.

Tabela 9 – Tensões admissíveis à tração (ou compressão) simples

Casos de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
Tensão admissível σ_a	$\frac{\sigma_e}{1,5}$	$\frac{\sigma_e}{1,33}$	$\frac{\sigma_e}{1,1}$

Fonte: NBR 8400-2 (2019)

Ou seja, o valor de σ_a é obtido a partir da Equação (18).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e}{1,5} \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

Esse fator de redução garante uma margem de segurança limitando a tensão máxima a um valor abaixo da tensão de escoamento do material, de modo a evitar deformações plásticas durante o uso normal do equipamento.

Para solicitações de cisalhamento puro, a tensão admissível τ_a é dada pela Equação (19).

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

4.2.2 Coeficiente de Amplificação

Além da verificação direta das tensões, a NBR 8400-1 recomenda considerar a possibilidade de que as tensões calculadas sejam excedidas durante a operação. Para isso, a norma estabelece a aplicação de um coeficiente de amplificação M_x , cujo valor depende do grupo de classificação do equipamento.

O valor do coeficiente deve ser encontrado a partir da Tabela 10 e, como o equipamento se enquadra na categoria *A5*, seu valor é 1,11.

Tabela 10 – Valores do coeficiente de amplificação M_x

Grupo do equipamento	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>	<i>A5</i>	<i>A6</i>	<i>A7</i>	<i>A8</i>
M_x	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Fonte: NBR 8400-1 (2019)

Esse valor será utilizado para amplificar as forças consideradas nos cálculos, garantindo que a análise permaneça conservadora e inclua uma margem adicional de segurança para condições operacionais variáveis.

4.2.3 Verificação Contra o Escoamento

4.2.3.1 Tensões normais

A verificação das tensões normais σ consiste em comparar a tensão resultante da combinação das ações que produzem esforços na seção, com a tensão admissível do material σ_a , conforme a Equação (20).

$$\sigma_{flex.x} = \frac{\sum M}{W} \quad [\text{MPa}] \quad (20)$$

Para o caso de carregamentos axiais, a tensão normal é dada pela Equação (21).

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (21)$$

Essa comparação assegura que a estrutura permaneça em regime elástico sob as condições normais de operação, evitando o escoamento e garantindo a integridade do equipamento.

4.2.3.2 Tensões de cisalhamento

A verificação das tensões de cisalhamento τ consiste em comparar a tensão resultante da combinação das ações que produzem esforços paralelamente à seção transversal, com a tensão de cisalhamento admissível τ_a , conforme a Equação (22).

$$\tau_x = \frac{\sum V * Q}{I * t} \quad [\text{MPa}] \quad (22)$$

4.2.3.3 Tensões combinadas

A verificação das tensões combinadas consiste em avaliar o efeito simultâneo de tensões normais e tensões de cisalhamento atuando na mesma seção. Para isso, determina-se uma tensão equivalente σ_{eq} , que é comparada com a tensão admissível σ_a do material, conforme a Equação (23).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (23)$$

4.2.4 Verificação Contra a Flambagem Global

A verificação contra a flambagem tem como objetivo garantir que os elementos comprimidos do pórtico não sofram instabilidade elástica. A flambagem é um modo de falha onde o elemento, sujeito a forças compressivas, falha com tensões abaixo do limite de escoamento. Sabe-se que a tensão necessária para causar esse tipo de falha é inversamente proporcional à esbeltez do elemento analisado.

Para prevenir esse tipo de falha, a ABNT NBR 8400-2:2019 recomenda a utilização de um método prático, que consiste em majorar a tensão normal de compressão e, em seguida, compará-la com a tensão admissível.

Dessa forma, para definir o coeficiente de flambagem ω , amplificador da tensão de compressão de acordo com o método indicado pela norma, é necessário calcular o índice de esbeltez λ , determinado a partir da Equação (24). Neste trabalho, o cálculo de λ foi realizado considerando o menor momento de inércia da seção transversal, correspondente ao eixo fraco, por representar a condição mais desfavorável em termos de estabilidade. Dessa forma, entende-se que não é necessária a verificação adicional em torno do eixo forte, uma vez que este apresenta maior rigidez e menor esbeltez, resultando em maior resistência à flambagem.

$$\lambda = \frac{K * L}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (24)$$

Onde:

- L é o comprimento da barra.
- I é o menor momento de inércia da seção transversal.
- A é a área da seção transversal.
- K é o coeficiente de comprimento efetivo, obtido a partir da Figura 14.

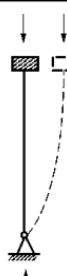
Tipo de fixação (a forma flambada é mostrada pela linha tracejada)						
	Valor teórico de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0
Valor de projeto de K	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Representação esquemática das condições de extremidade		Sem rotação e sem translação				
		Com rotação e sem translação				
		Sem rotação e com translação				
		Com rotação e com translação				

Figura 14 – Valores de K para diferentes condições de vínculos

Fonte: NBR 8400-2 (2019)

Após calcular o valor de λ , deve-se consultar a Tabela 11 para determinar o coeficiente de flambagem ω .

Tabela 11 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ para perfis laminados em aço $\sigma_e = 240$ N/mm²

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	1,14	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20
50	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
60	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,39	1,40
70	1,41	1,42	1,44	1,45	1,46	1,48	1,49	1,50	1,52	1,53
80	1,55	1,56	1,58	1,59	1,61	1,62	1,64	1,66	1,68	1,69
90	1,71	1,73	1,74	1,76	1,78	1,80	1,82	1,84	1,86	1,88
100	1,90	1,92	1,94	1,96	1,98	2,00	2,02	2,05	2,07	2,09

Fonte: Adaptado de NBR 8400-2 (2019)

Por fim, com o valor de ω , é preciso majorar a tensão normal axial σ_n e compará-la com a tensão admissível σ_a , conforme as Equações (25) e (26).

$$\sigma_n + \sigma_{flex} \leq \sigma_a \quad (25)$$

$$\omega * \sigma_n + 0,9 * \sigma_{flex} \leq \sigma_a \quad (26)$$

Caso a relação da Equação (26) seja satisfeita, considera-se que o elemento está seguro contra a flambagem global.

4.2.5 Verificação contra Flambagem Local

A verificação contra a flambagem local é um procedimento essencial no dimensionamento de elementos esbeltos, como as vigas caixão do pórtico rolante. Diferentemente da flambagem global, que avalia a estabilidade do elemento estrutural como um todo, a flambagem local foca na estabilidade das chapas finas (almas e mesas) que compõem a seção transversal. Embora uma viga possa estar segura contra a instabilidade global, as chapas individuais podem sofrer deformação e enrugamento sob compressão, caracterizando a falha local. Para melhor compreensão, a Figura 15

deixa claro essa diferença. Esse fenômeno prematuro é crítico, pois compromete a rigidez e a capacidade da seção transversal, levando a uma redistribuição de tensões e, conseqüentemente, à falha antecipada de toda a viga sob as cargas de serviço.

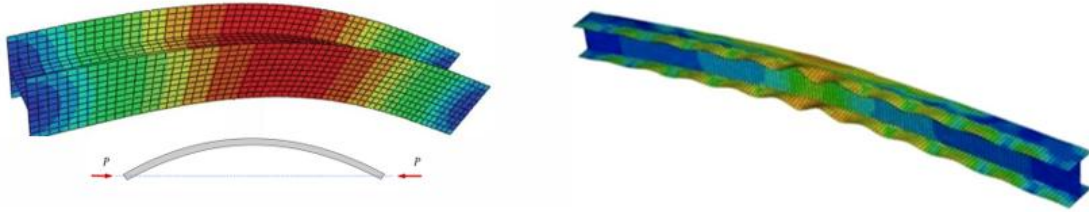


Figura 15 – Comparação de flambagem global (à esquerda) e flambagem local (à direita)

Fonte: Adaptado de SEIF SCHAFFER (2014)

A verificação contra flambagem localizada também foi feita conforme o procedimento estabelecido na norma ABNT NBR 8400-2:2019. O processo se inicia pela determinação da tensão crítica de flambagem σ_{cr}^v , que é uma estimativa baseada na tensão de Euler σ_R^E , fornecida pela Equação (27).

$$\sigma_R^E = \frac{\pi^2 E * (e/b)^2}{12 * (1 - \eta^2)} \quad [\text{MPa}] \quad (27)$$

Neste projeto, apesar da variação da espessura de chapa em diferentes vigas, as proporções são sempre as mesmas. Em outras palavras, a relação e/b para a alma é a mesma em todas as vigas, e o mesmo ocorre para a mesa. Como consequência, a tensão de Euler para as almas $\sigma_{R.alma}^E$ resulta em um único valor para todas as vigas, assim como a tensão de Euler para as mesas $\sigma_{R.mesa}^E$, obtidas ao aplicar a Equação (27).

$$\sigma_{R.alma}^E = \frac{\pi^2 * 200 \text{ GPa} * (0,04)^2}{12 * (1 - 0,26^2)}$$

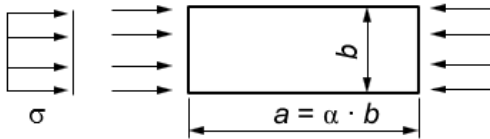
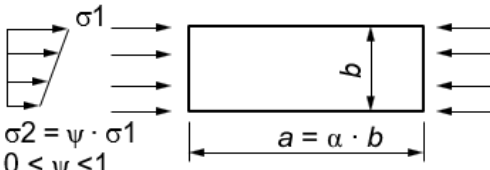
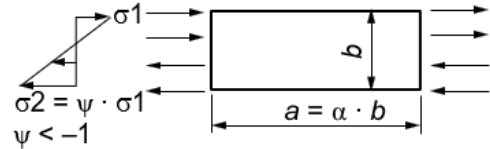
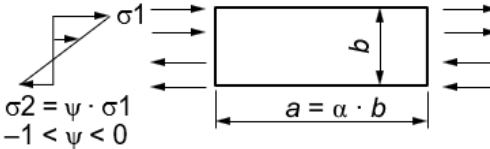
$$\sigma_{R.alma}^E = 348,48 \text{ MPa}$$

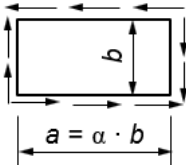
$$\sigma_{R.mesa}^E = \frac{\pi^2 * 200 \text{ GPa} * (0,07)^2}{12 * (1 - 0,26^2)}$$

$$\sigma_{R.mesa}^E = 784,09 \text{ MPa}$$

A tensão crítica de flambagem σ_{cr}^v ou τ_{cr}^v é, então, calculada como um múltiplo da tensão de Euler σ_R^E , através da aplicação do coeficiente de flambagem K_σ (para compressão) ou K_τ (para cisalhamento), conforme Equação (28). Os valores dos respectivos coeficientes de flambagem dependem da relação entre os lados da chapa $\alpha = a/b$ e das tensões aplicadas. Sendo assim, eles são determinados para cada caso específico através da Tabela 12 .

Tabela 12 – Valores dos coeficientes de flambagem K_σ e K_τ

Nº	Caso	$\alpha = a/b$	K_σ ou K_τ
<i>Compressão uniforme simples</i>			
1		$\alpha > 1$ $\alpha < 1$	$K_\sigma = 4$ $K_\sigma = (\alpha + \frac{1}{\alpha})^2$
<i>Compressão não uniforme</i>			
2		$\alpha > 1$ $\alpha < 1$	$K_\sigma = (\frac{8,4}{\psi + 1})$ $K_\sigma = (\alpha + \frac{1}{\alpha})^2 * \frac{2,1}{\psi + 1,1}$
<i>Flexão pura $\Psi = -1$ ou flexão com tração preponderante</i>			
3		$\alpha > 2/3$ $\alpha < 2/3$	$K_\sigma = 23,9$ $K_\sigma = 15,87 + \frac{1,87}{\alpha^2} + 8,6 * \alpha^2$
<i>Flexão com compressão preponderante $-1 < \Psi < 0$</i>			
4			$K_\sigma = (1 + \Psi) * K' - \Psi * K'' + 10 * \Psi * (1 + \Psi)$ Onde: $K' =$ valor de K_σ para $\Psi = 0$ no caso nº 2 $K'' =$ valor de K_σ para flexão pura (caso nº 3)

Nº	Caso	$\alpha = a/b$	K_σ ou K_τ
<i>Cisalhamento puro</i>			
5		$\alpha > 1$	$K_\tau = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2}$
		$\alpha < 1$	$K_\tau = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2}$

Fonte: NBR 8400-2 (2019)

$$\sigma_{cr}^v = K * \sigma_R^E \quad [\text{MPa}] \quad (28)$$

Para o caso de elementos sujeitos à compressão e cisalhamento combinados, a norma estabelece a determinação de uma tensão de verificação crítica combinada $\sigma_{cr.c}^v$, que deve ser determinada pela Equação (29).

$$\sigma_{cr.c}^v = \frac{\sqrt{(\sigma^2 + 3 * \tau^2)}}{\frac{1 + \psi}{4} * \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^v} + \sqrt{\left(\frac{3 - \psi}{4} * \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^v}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}^v}\right)^2}} \quad [\text{MPa}] \quad (29)$$

Para que as tensões críticas de verificação sejam válidas, deve-se verificar se as tensões críticas determinadas estejam abaixo do limite de proporcionalidade, definido pela Equação (30). Neste projeto, esse limite é definido pela tensão de escoamento do aço ASTM A36

$$\sigma_p = 0,76 * \sigma_E \quad [\text{MPa}] \quad (30)$$

$$\sigma_p = 0,76 * 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = 190 \text{ MPa}$$

Caso o valor calculado exceda esse limite, é obrigatório adotar uma tensão crítica reduzida $\sigma_{vcr.cR}^v$ para a verificação, que é calculada pela Equação (31).

$$\sigma_{cr.cR}^v = \frac{\sigma_E * (\sigma_{cr.c}^v)^2}{0,1836 * \sigma_E^2 + (\sigma_{cr.c}^v)^2} \quad [\text{MPa}] \quad (31)$$

Dessa forma, a tensão admissível máxima para que se garanta que não haja flambagem local é dada pela Equação (32), que consiste em dividir a tensão crítica combinada de verificação pelo coeficiente de segurança de flambagem v_v dado pelas equações mostradas na Tabela 13 para cada caso.

Tabela 13 – Coeficiente de segurança de flambagem v_v

Casos de solicitação	Caso	Coeficiente de segurança na flambagem v_v
Flambagem de elementos planos	I	$1,70 + 0,175 * (\Psi - 1)$
	II	$1,50 + 0,125 * (\Psi - 1)$
	III	$1,35 + 0,075 * (\Psi - 1)$
Flambagem de elementos curvos: Cilindros circulares (por exemplo, tubos)	I	1,70
	II	1,50
	III	1,35

Nota 1 A relação de tensão Ψ das bordas varia de +1 a -1

Nota 2 O Anexo C fornece o procedimento para determinar a tensão crítica de flambagem.

Fonte: NBR 8400-2 (2019)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{cr.c}^v}{v_v} \text{ ou } \frac{\sigma_{cr.cR}^v}{v_v} \quad [\text{MPa}] \quad (32)$$

Por fim, para assegurar que não há riscos de flambagem local no projeto, deve-se comparar a tensão de comparação dada pela Equação (33) com a tensão admissível, conforme mostrado na Equação (34).

(33)

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{cp} \leq \sigma_a \quad (34)$$

4.2.6 Verificação de Contraflecha

A verificação de contraflecha tem como objetivo assegurar que as deflexões verticais da viga permaneçam dentro dos limites admissíveis estabelecidos pela norma. Ela consiste em aplicar uma curvatura inicial inversa à da deformação prevista sob carga, de modo que a viga atinja uma posição praticamente horizontal, após o carregamento.

O cálculo da flecha máxima teórica f é realizada a partir das Equações (35) e (36), para carregamentos distribuídos e concentrados, respectivamente.

$$f_G = \frac{5 * q * L^4}{384 * E * I} \quad [\text{mm}] \quad (35)$$

$$f_L = \frac{P * L^3}{48 * E * I} \quad [\text{mm}] \quad (36)$$

Onde:

- q é o carregamento distribuído.
- P é a carga concentrada.
- L é o comprimento da viga.
- E é o módulo de elasticidade do material.
- I é o momento de inércia da seção transversal.

A contraflecha f_c , por sua vez, é projetada com valor igual à deflexão ocasionada pelo peso próprio da viga mais 50% da soma do peso próprio do carro e da carga máxima, conforme Equação (37).

$$f_c = f_G + 0,5 * f_L \quad [\text{mm}] \quad (37)$$

5 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

A metodologia adotada para o dimensionamento da estrutura do pórtico consiste em definir inicialmente as dimensões externas da viga, respeitando as condições de contorno do projeto. Em seguida, são calculados os esforços atuantes na estrutura, considerando a maior carga prevista em operação. O modelo do pórtico está apresentado na Figura 16.

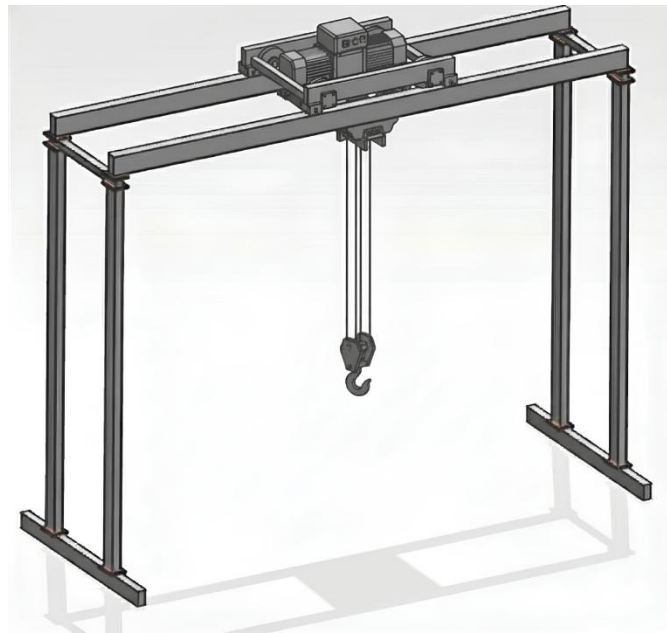


Figura 16 – Modelo do pórtico

Fonte: Autoria própria (2025)

De forma simplificada, o dimensionamento consiste em primeiramente definir o perfil da viga, e a opção adotada foi uma viga caixão soldada, cujas proporções estão apresentadas na Figura 17. A escolha pelo método de dimensionamento baseado nas proporções relativas à espessura das chapas, permite realizar os cálculos estruturais de forma direta e tecnicamente embasada, priorizando agilidade sem renunciar à segurança.

Esse tipo de perfil oferece uma rigidez à flexão superior em comparação com perfis abertos, o que é especialmente importante em vãos grandes sujeitos a esforços horizontais. Além disso, o formato fechado proporciona um desempenho significativamente melhor contra flambagem global e aumenta a resistência à flambagem local. Isso ocorre porque, enquanto perfis abertos como vigas I concentram praticamente toda a tensão de compressão na alma, o perfil caixão distribui as tensões ao longo das chapas que compõem a seção.

As proporções adotadas para a seção da viga caixão foram escolhidas para priorizar a rigidez à flexão, já que o carregamento vertical é predominante. Por isso, o comprimento da alma foi definido sendo 1,5x o comprimento da chapa de mesa, elevando o momento de inércia no eixo principal que resistirá aos maiores momentos fletores. Ao mesmo tempo, manteve-se uma largura suficiente para garantir um momento de inércia relevante no plano horizontal, conferindo resistência a carregamentos laterais. Por fim, o afastamento entre a alma e a borda da mesa foi previsto para garantir espaço adequado para a soldagem das chapas.

Para a definição da espessura das chapas, é adotado um processo iterativo, onde cada espessura proposta é verificada quanto a escoamento, flambagem e flecha. A partir de um valor inicial, a espessura é ajustada em passos de 1 mm e, a cada mudança, as tensões e deslocamentos são recalculados. O processo continua até que todas as verificações sejam atendidas, garantindo que a chapa seja espessa o suficiente para suportar os esforços, sem uso exagerado de material.

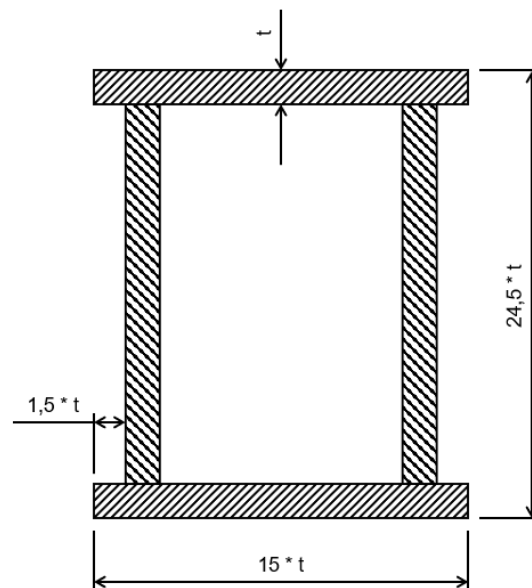


Figura 17 – Proporções das vigas

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a fabricação da estrutura, foi adotado o aço ASTM A36, utilizado em aplicações estruturais devido à sua boa combinação entre resistência, ductilidade e soldabilidade. Além de apresentar propriedades mecânicas adequadas, o material possui ampla disponibilidade no mercado e custo competitivo, o que o torna uma opção eficiente tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. As propriedades do aço ASTM A36 estão apresentadas na Tabela 14, que servirá de base para os cálculos deste capítulo.

Tabela 14 – Propriedades do aço ASTM A36

Propriedade	Valor
Massa específica ρ	7850 kg/m ³
Limite de escoamento σ_e	250,00 MPa
Limite de ruptura σ_r	400,00 MPa
Módulo de elasticidade E	200,00 GPa
Coefficiente de Poisson ν	0,26
Teor de carbono máx. para espessura de chapa até 3/4"	0,26 %

Fonte: Cosa Steel (2021)

Com base nas propriedades do material, são calculadas as tensões admissíveis de tração/compressão σ_a e de cisalhamento τ_a , utilizando as Equações (18) e (19), respectivamente. Esses valores representam os limites máximos de tensão que o material pode suportar em serviço.

$$\sigma_a = \frac{250,00 \text{ MPa}}{1,5}$$

$$\sigma_a = 166,67 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = \frac{166,67 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_a = 96,23 \text{ MPa}$$

Com a definição do material, fica estabelecido que a espessura máxima das chapas a serem utilizadas é de 19 mm, conforme especificado no catálogo da ArcelorMittal (ArcelorMittal, 2019). Sendo assim, as dimensões máximas das vigas deste projeto são apresentadas na Tabela 15. Essa espessura máxima foi utilizada para definir as forças aplicadas no sistema, como a força peso e força de inércia por exemplo. Isso permite que o dimensionamento do pórtico avance e assegura que será feito de forma conservadora, tendo em vista que as dimensões reais serão menores e consequentemente as forças também.

Tabela 15 – Dimensões máximas das vigas do projeto

Dimensão	Valor
Espessura da chapa t	19 mm
Altura da viga h	466 mm
Largura da viga b	285 mm
Área da seção transversal $A_{máx.}$	27.075 mm ²

Fonte: Autoria própria (2025)

5.1 CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES

Nesta seção, serão determinadas as forças atuantes sobre a estrutura do pórtico. Na Figura 18 é representado o diagrama de corpo livre da estrutura, com todas as forças definidas nos capítulos anteriores representadas, sendo elas:

- Força peso do pórtico $F_{P.P.}$.
- Força peso da carga $F_{P.C.}$.
- Força de inércia do pórtico $F_{IN.P.}$.
- Força de inércia longitudinal da carga $F_{IN.CL.}$.
- Força de inércia transversal da carga $F_{IN.CT.}$.
- Força normal traseira $F_{N.T.}$.
- Força normal frontal $F_{N.F.}$.
- Força de reação transversal do trilho $F_{RT.}$.
- Força de atrito traseira $F_{AT.T.}$.
- Força de atrito frontal $F_{AT.F.}$.

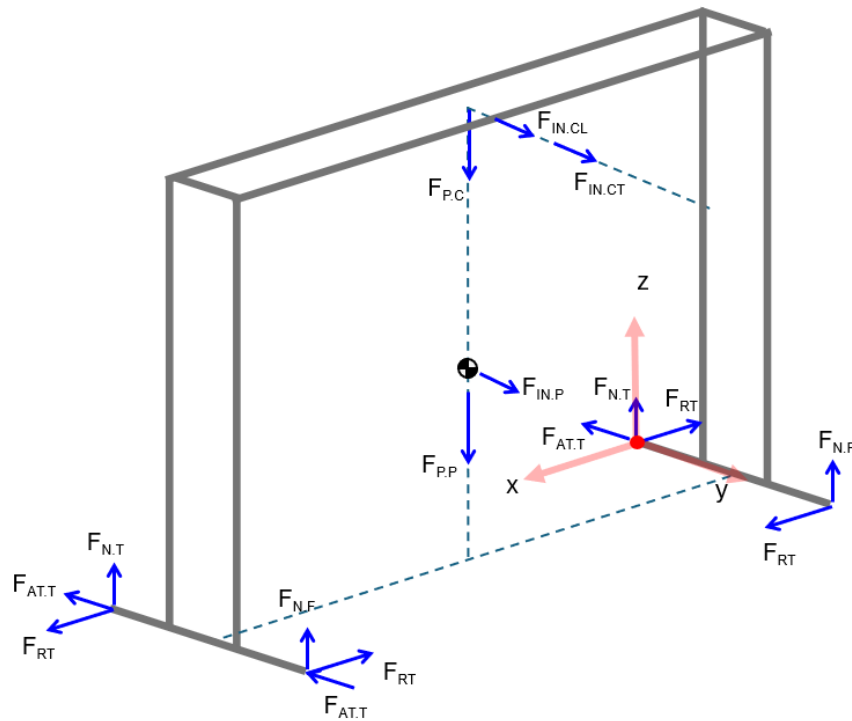


Figura 18 – Diagrama de corpo livre do pórtico

Fonte: Autoria própria (2025)

Nota-se que no DCL há 4 forças verticais: as forças peso $F_{P,P}$ e $F_{P,C}$ e as forças normais F_{NT} e F_{NF} . Adicionalmente, há 5 forças horizontais: as forças de atrito F_{AT} , que atuam em cada conexão da estrutura com as rodas, além de 4 forças horizontais mencionadas diretamente na norma, sendo elas as forças de inércia $F_{IN,P}$, $F_{IN,CL}$ e $F_{IN,CT}$, e as forças de reação transversal das rodas com o trilho F_{RT} .

No entanto, a norma consta que, para o Caso I (Equipamento em operação normal sem vento), as forças que devem ser consideradas são:

- As cargas estáticas devido ao peso próprio F_G .
- As cargas de serviço F_L , multiplicadas pelo coeficiente dinâmico Ψ .
- Os dois efeitos horizontais F_H mais desfavoráveis (neste projeto, forças de inércia longitudinal da carga e inércia da estrutura do pórtico, conforme desenvolvido na Seção 5.1.2).

5.1.1 Forças Peso

Tendo as dimensões das vigas definidas na Tabela 1, utilizou-se os valores máximos possíveis para a seção transversal (apresentados na Tabela 15) para calcular a força peso de cada viga $P_{P.V.máx.}$ e da estrutura do pórtico $P_{P.P.máx.}$, de acordo com as Equações (38) e (39), respectivamente.

$$P_{P.V.máx.} = M_x * (A_{máx.} * L * \rho * g) \quad [\text{kN}] \quad (38)$$

$$P_{P.P.máx.} = \sum P_{P.V.máx.} \quad [\text{kN}] \quad (39)$$

A Tabela 16 apresenta os valores obtidos para cada força peso das vigas.

Tabela 16 – Forças peso da estrutura

Componente	Força peso
Viga principal	23,14 kN
Viga de fechamento	4,05 kN
Viga de Apoio	16,20 kN
Viga de Cabeceira	9,26 kN
Pórtico	137,71 kN

Fonte: Autoria própria (2025)

A força peso da carga, por sua vez, relaciona as massas da carga e do *trolley*, m_C e m_T , respectivamente, conforme Equação (40).

$$P_{P.C} = M_x * ((m_C + m_T) * g * \Psi) \quad [\text{kN}] \quad (40)$$

$$1,11 * ((10.000 \text{ kg} + 1.150 \text{ kg}) * 9,81 \text{ m/s}^2 * 1,11)$$

$$F_{P.C} = 134,68 \text{ kN}$$

5.1.2 Forças de Inércia

Nesta seção, será apresentada a aplicação direta do passo a passo introduzido na Seção 4.1.3.1, para o cálculo das forças de inércia transversal e longitudinal da carga e das forças de inércia própria do pórtico.

5.1.2.1 Força de inércia longitudinal da carga

Conforme apresentado na seção de definição do método, pode-se afirmar neste projeto que a inércia rotativa constitui uma parcela desprezível da resposta do sistema. Desta forma, a Equação (4) pode ser simplificada para determinar a massa equivalente do sistema m , considerando a maior massa da estrutura possível (com chapas de 19 mm) $m_{0.máx.P}$ e a massa do *trolley* $m_{0.T}$.

$$\begin{aligned} m &= m_{0.máx.P} + m_{0.T} \\ m &= 12.215 \text{ kg} + 1.150 \text{ kg} \\ m &= 13.365 \text{ kg} \end{aligned}$$

Também foi mencionado na Seção 4.1.3.1 que a força horizontal F_H utilizada é a devido à frenagem. Isso se deve pois, no caso da desaceleração, a única força atuante é o atrito estático, conforme Equação (5).

$$\begin{aligned} F_H &= 0,15 * (137,31 \text{ kN} + 134,68 \text{ kN}) \\ F_H &= 40,15 \text{ kN} \end{aligned}$$

O que, ao aplicar na Equação (6), resulta em um valor superior de aceleração média $J_{m.F}$, em relação ao que seria apresentado durante a aceleração.

$$J_{m.F} = \frac{40,15 \text{ kN}}{13.365 \text{ kg} + 10.000 \text{ kg}}$$

$$J_{m.F} = 1,72 \text{ m/s}^2$$

Dando continuidade aos cálculos, aplica-se a velocidade média do pórtico na Equação (7) para obter o tempo médio de aceleração T_m .

$$T_m = \frac{0,40 \text{ m/s}}{1,72 \text{ m/s}^2}$$

$$T_m = 0,23 \text{ s}$$

Em seguida, é calculada a força de inércia média F_{CM} , conforme Equação (8).

$$F_{CM} = 1,72 \text{ m/s}^2 * 10.000 \text{ kg}$$

$$F_{CM} = 17,19 \text{ kN}$$

A fim de determinar o fator Ψ_h , o primeiro passo é calcular o valor do período T_1 que representa o tempo para um ciclo completo de movimento pendular. Para isso, utiliza-se a Equação (9).

$$T_1 = 2\pi * \sqrt{\frac{2,00 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}}$$

$$T_1 = 2,84 \text{ s}$$

Em seguida, determina-se o coeficiente μ . No entanto, conforme apresentado na Seção 4.1.3.1, quando o sistema de acionamento é capaz de controlar o movimento e manter a velocidade constante, o valor do coeficiente é adotado como $\mu = 0$.

O coeficiente β é calculado a partir da Equação (11).

$$\beta = \frac{0,23 \text{ s}}{2,84 \text{ s}}$$

$$\beta = 0,08$$

O coeficiente dinâmico horizontal Ψ_h , obtido a partir da Equação (12).

$$\Psi_h = 2 * \sin(0,08 * \pi)$$

$$\Psi_h = 0,51$$

A última etapa é calcular a força de inércia máxima da carga $F_{c.máx.}$. Ela é obtida a partir da Equação (14).

$$F_{c.máx.} = 1,11 * (0,51 * 17,19 \text{ kN})$$

$$F_{c.máx.} = 9,72 \text{ kN}$$

5.1.2.2 Força de inércia transversal da carga

O mesmo processo é aplicado para o cálculo da força de inércia transversal da carga. No entanto, como apenas o *trolley* se desloca nessa direção, considera-se apenas a sua contribuição para obter a massa equivalente do sistema m , utilizando a Equação (4).

$$m = m_{0.máx.T}$$

$$m = 1.150 \text{ kg}$$

Em seguida, calcula-se a força horizontal F_H , a partir da Equação (5).

$$F_H = 0,15 * (11,28 \text{ kN} + 98,10 \text{ kN})$$

$$F_H = 16,41 \text{ kN}$$

A aceleração média $J_{m.F}$ é calculada utilizando a Equação (6).

$$J_{m.F} = \frac{16,41 \text{ kN}}{1.150 \text{ kg} + 10.000 \text{ kg}}$$

$$J_{m.F} = 1,47 \text{ m/s}^2$$

Dando continuidade aos cálculos, aplica-se a velocidade média do *trolley* na Equação (7) para obter o tempo médio de aceleração T_m .

$$T_m = \frac{0,09 \text{ m/s}}{1,70 \text{ m/s}^2}$$

$$T_m = 0,06 \text{ s}$$

Em seguida, é calculada a força de inércia média F_{CM} , conforme Equação (8).

$$F_{CM} = 1,47 \text{ m/s}^2 * 10.000 \text{ kg}$$

$$F_{CM} = 14,72 \text{ kN}$$

O próximo passo é determinar o período T_1 , a fim de obter o fator Ψ_h . Para isso, utiliza-se a Equação (9).

$$T_1 = 2\pi * \sqrt{\frac{7,68 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}}$$

$$T_1 = 5,55 \text{ s}$$

Em seguida, determina-se o coeficiente μ . No entanto, como o sistema de acionamento do *trolley* não é capaz de controlar a velocidade do movimento, utiliza-se a Equação (10).

$$\mu = \frac{10.000 \text{ kg}}{1.150 \text{ kg}}$$

$$\mu = 8,70$$

O coeficiente β é calculado a partir da Equação (11).

$$\beta = \frac{0,04 \text{ s}}{5,55 \text{ s}}$$

$$\beta = 0,01$$

O coeficiente dinâmico horizontal Ψ_h , obtido a partir da Equação (12).

$$\Psi_h = 2 * \sin(0,01 * \pi)$$

$$\Psi_h = 0,07$$

A última etapa é calcular a força de inércia máxima da carga $F_{c.máx.}$, que é obtida a partir da Equação (14).

$$F_{c.máx.} = 1,11 * (0,07 * 14,72 \text{ kN})$$

$$F_{c.máx.} = 1,07 \text{ kN}$$

5.1.2.3 Força de inércia da estrutura do pórtico

Como descrito ao final da Seção 4.1.3.1, os cálculos das forças de inércia atuantes sobre as vigas deverão considerar o coeficiente dinâmico de inércia Ψ_h , cujo valor é $\Psi_h = 2$. Desta forma,

a força de inércia $F_{IN,V}$ é obtida ao aplicar a Equação (15), enquanto a força de inércia do pórtico $F_{IN,P}$ é obtida aplicando a Equação (16).

A Tabela 17 apresenta os valores obtidos para cada força de inércia das vigas.

Tabela 17 – Forças de inércia da estrutura

Componente	Força de inércia
Viga principal	8,10 kN
Viga de fechamento	1,42 kN
Viga de Apoio	5,67 kN
Viga de Cabeceira	3,24 kN
Pórtico	48,22 kN

Fonte: Autoria própria (2025)

5.1.3 Força de Reação Transversal Média

A força de reação transversal é calculada a partir da carga vertical média suportada por cada *truck*, conforme estabelecido na Seção 4.1.3.2. Assim, utiliza-se a Equação (17) para determinar a intensidade dessa força.

$$F_{RT} = \frac{1,11 * (0,06 * (137,71 \text{ kN} + 134,68 \text{ kN}))}{4}$$

$$F_{RT} = 4,71 \text{ kN}$$

Tendo todas as forças definidas, pode-se seguir para a etapa de modelagem do problema e cálculo das tensões atuantes. Compreende-se a importância de modelos altamente realistas para representar com precisão o comportamento estrutural, contudo, no ambiente industrial, a agilidade na elaboração de projetos é um fator crítico para redução de custos. Por esse motivo, adotou-se uma metodologia enxuta para a estimativa inicial dos esforços, avaliando cada viga individualmente. Embora na prática a estrutura trabalhe de forma conjunta e com maior rigidez global, essa simplificação tende a gerar valores conservadores de tensão e acelera significativamente o processo de desenvolvimento.

A partir da geometria definida por meio desse modelo simplificado, é possível aplicar softwares de análise numérica para refinar o dimensionamento, reduzindo o superdimensionamento inicial e aproximando o comportamento estrutural do cenário real. Dessa forma, obtém-se uma combinação eficiente entre rapidez na etapa de engenharia e precisão no resultado.

5.1.4 Cargas Transmitidas ao Piso

Como verificação complementar de ordem global, avaliou-se a solicitação transmitida ao piso do galpão e às rodas do pórtico. Considerando a força peso total do sistema $F_p = 272,35$ kN, e considerando uma configuração com quatro *trucks*, obtém-se uma carga média por *truck* de $F_{m.T} = 68,09$ kN. Esse valor deve ser adotado como referência mínima para a seleção das rodas e laje do galpão, que deverão ser avaliadas em um outro projeto.

5.2 VIGA PRINCIPAL

A viga principal, apresentada na Figura 19, é o elemento estrutural responsável por suportar diretamente o *trolley* e a carga içada. Cada viga possui comprimento de 10,00 m e, para o seu dimensionamento, considerou-se a carga aplicada no centro do vão, a 5,00 m das extremidades, por ser a configuração que produz o maior momento fletor na viga e, conseqüentemente, a situação mais crítica de esforço para a viga. Assim, garante-se que a estrutura seja dimensionada de acordo com a condição de maior solicitação.



Figura 19 – Vigas principais
Fonte: Autoria própria (2025)

Embora fisicamente a ligação entre a viga principal e as vigas de fechamento possua rigidez suficiente para impedir os deslocamentos e rotações, modelá-la como biengastada gera momentos nas extremidades que não se equilibram no sistema estrutural e acabam sendo transferidos para as vigas de cabeceira tornando a análise da viga de cabeceira muito mais complexa. Por esse motivo, adotou-se o modelo biapoado, que representa de forma direta o caminho principal das forças e fornece resultados conservadores, uma vez que produz momentos fletores maiores que os obtidos em uma modelagem engastada.

Além disso, optou-se por uma abordagem simplificada para a estimativa inicial dos esforços, analisando cada viga individualmente. Essa metodologia torna o processo de engenharia mais ágil, o que é um aspecto crítico no ambiente industrial, e tende a produzir valores de tensão conservadores, pois adota uma representação com rigidez global reduzida em relação ao comportamento real da estrutura. A geometria obtida nessa etapa serve de base para posterior refinamento por meio de análise numérica, reduzindo eventuais superdimensionamentos e aproximando o comportamento estrutural do cenário real.

Dessa forma, para representar as cargas atuantes sobre a viga principal, foi desenvolvido um diagrama de corpo livre, no qual estão identificadas as forças consideradas no dimensionamento. As solicitações verticais são as forças peso da carga içada $F_{P.C}$ e da viga principal $F_{P.VP}$, enquanto as cargas horizontais são as forças de inércia longitudinal da carga $F_{IN.CL}$ e inércia da viga principal $F_{IN.VP}$. O DCL está apresentado na Figura 20.

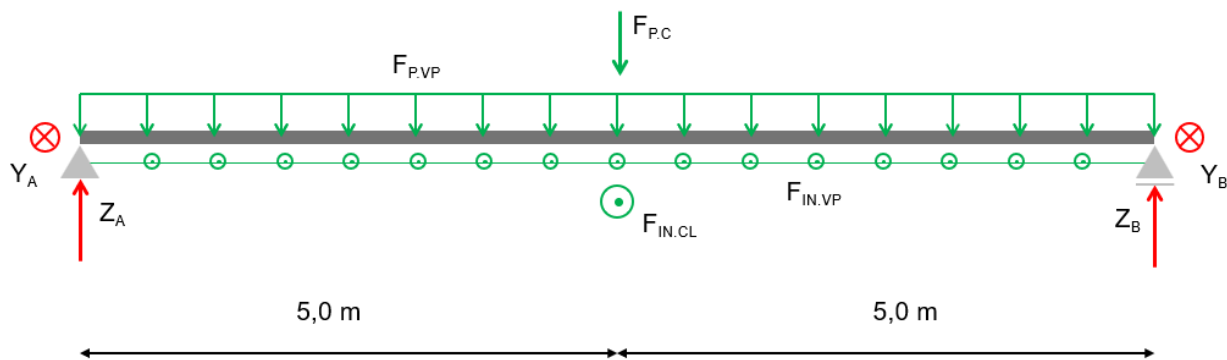


Figura 20 – Diagrama de corpo livre da viga principal

Fonte: Autoria própria (2025)

A partir das cargas calculadas na Seção 5.1.1, foram traçados os diagramas de esforço cortante V_V e momento fletor M_V para as cargas verticais da viga principal, apresentados na Figura

21 e Figura 22. Dos resultados obtidos, o valor máximo para o esforço cortante é $V_V = 45,24$ kN e o momento fletor máximo é $M_V = 197,28$ kN.m.

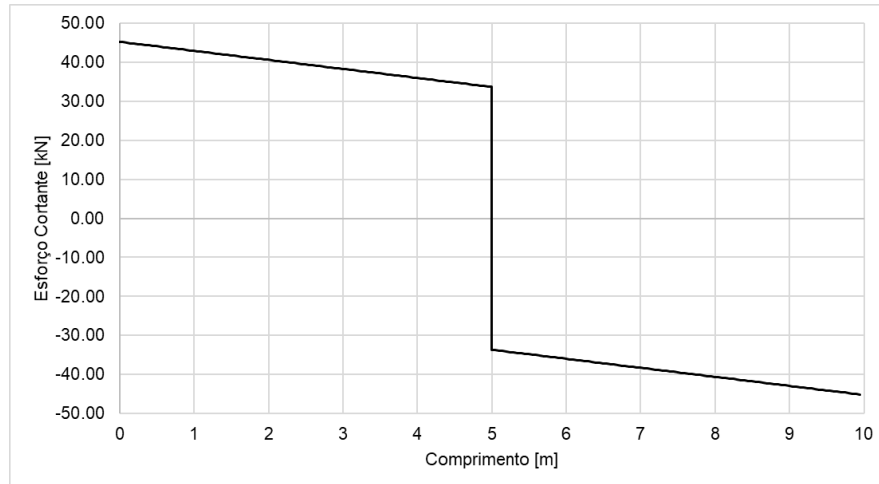


Figura 21 – Esforço cortante V_V devido a cargas verticais ao longo da viga principal

Fonte: Autoria própria (2025)

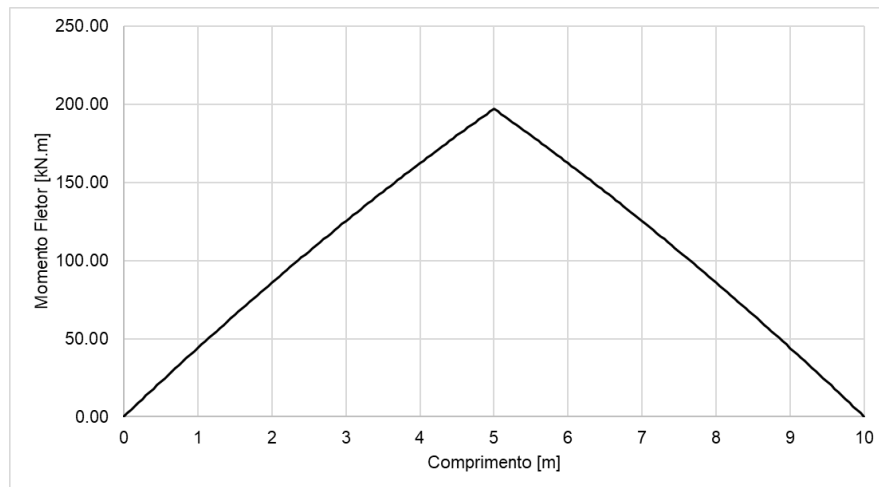


Figura 22 – Momento fletor M_V devido a cargas verticais ao longo da viga principal

Fonte: Autoria própria (2025)

Analogamente, foram determinados o esforço cortante V_H e momento fletor M_H para as cargas horizontais atuantes na viga principal. A partir dos valores obtidos na Seção 5.1.2, obteve-se um esforço cortante máximo $V_H = 6,49$ kN, enquanto o momento fletor máximo é $M_H = 22,29$ kN.m, conforme apresentado na Figura 23 e Figura 24.

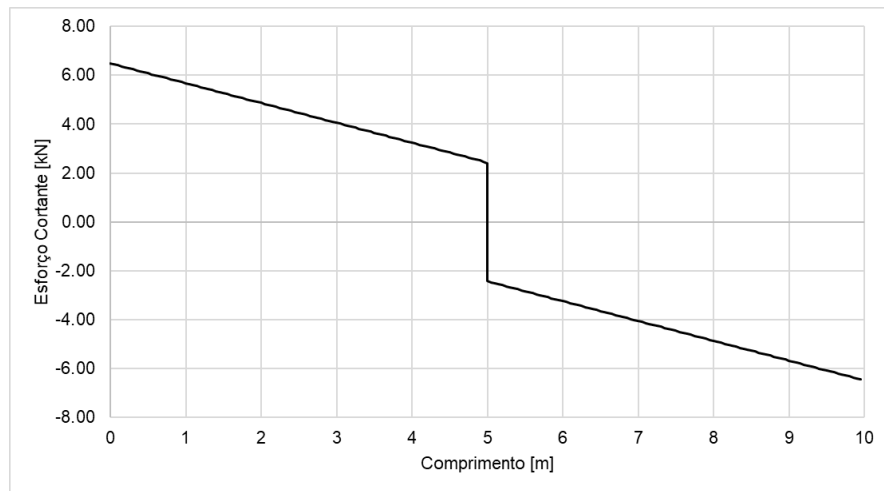


Figura 23 – Esforço cortante V_H devido a cargas horizontais ao longo da viga principal
Fonte: Autoria própria (2025)

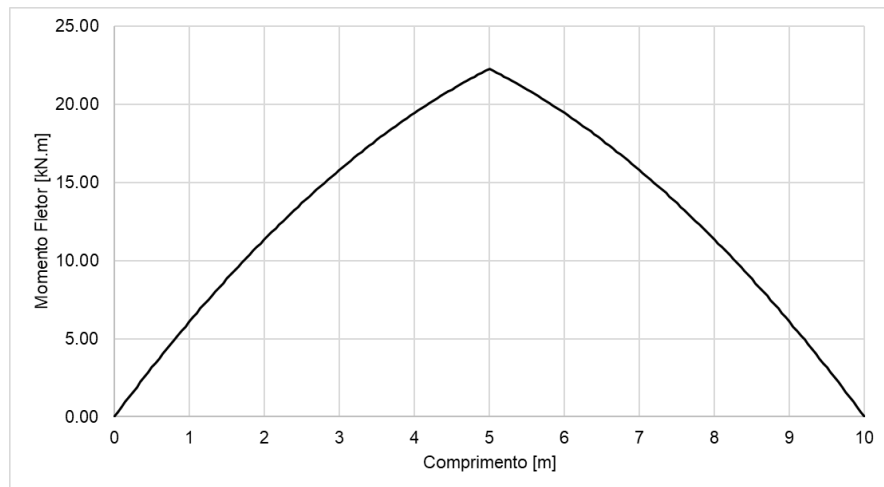


Figura 24 – Momento fletor M_H devido a cargas horizontais ao longo da viga principal
Fonte: Autoria própria (2025)

5.2.1 Verificações na Viga Principal

Nesta etapa, são apresentadas as verificações estruturais da viga principal, abrangendo escoamento, flambagem e contraflecha. O processo para determinar a espessura das chapas que compõem a viga principal seguiu a metodologia apresentada no Capítulo 5. Após as verificações, a espessura ideal encontrada para as chapas da viga é de 15 mm, e as propriedades da viga estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedades da seção transversal das vigas principais

Propriedade	Valor
Espessura da chapa t	15 mm
Momento de inércia I_y	$3,06 * 10^8 \text{ mm}^4$
Momento de inércia I_z	$9,76 * 10^7 \text{ mm}^4$
Primeiro momento de área Q_y	$4,64 * 10^5 \text{ mm}^3$
Primeiro momento de área Q_z	$8,07 * 10^5 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_y	$1,66 * 10^6 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_z	$8,67 * 10^5 \text{ mm}^3$

Fonte: Autoria própria (2025)

5.2.1.1 Verificação contra o escoamento

Na verificação contra o escoamento, as tensões normais σ e de cisalhamento τ foram determinadas a partir dos esforços internos máximos obtidos na seção anterior. Para essa verificação, foram utilizadas as Equações (20) e (22).

$$\sigma_{x,z} = \frac{197,28 \text{ kN.m}}{1,66 * 10^6 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{x,z} = 118,49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,y} = \frac{22,29 \text{ kN.m}}{8,67 * 10^5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{x,y} = 25,70 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x,z} = \frac{45,24 \text{ kN} * 4,64 * 10^5 \text{ mm}^3}{9,76 * 10^7 \text{ mm}^4 * 15,00 \text{ mm}}$$

$$\tau_{x,z} = 24,94 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x.Y} = \frac{6,49 \text{ kN} * 8,07 * 10^5 \text{ mm}^3}{3,06 * 10^8 \text{ mm}^4 * 15,00 \text{ mm}}$$

$$\tau_{x.Y} = 0,66 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, todas as tensões estão abaixo do valor admissível. Em seguida, essas tensões foram combinadas na forma de uma tensão equivalente σ_{eq} , calculada pela Equação (23). Essa tensão também se manteve inferior ao limite admissível, validando o dimensionamento da viga.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(118,49 \text{ MPa} + 25,70 \text{ MPa})^2 + 3 * (24,94 \text{ MPa} + 0,66 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 147,74 \text{ MPa}$$

5.2.1.2 Verificação contra a flambagem local

A verificação da flambagem local da alma é realizada conforme a metodologia apresentada na Seção 4.2.5. O primeiro passo consiste em determinar a tensão crítica de flambagem σ_{cr}^v aplicando-se a Equação (28). Para isso, selecionou-se o coeficiente correspondente ao caso 4 ($K_{\sigma.4}$) da Tabela 12. Para representar a condição mais desfavorável, a análise foi conduzida no centro da viga, onde a solicitação é máxima.

$$K_{\sigma.4} = ((1 - 0,70) * 8,4 + 0,70 * 23,9 + 10 * (-0,70) * (1 - 0,70))$$

$$K_{\sigma.4} = 17,24$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 17,24 * 348,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 6.007,75 \text{ MPa}$$

Para a mesa, o procedimento é análogo ao adotado para a alma, diferenciando-se apenas pela seleção do coeficiente correspondente ao caso 2 ($K_{\sigma.2}$) da Tabela 12, de acordo com o enquadramento do índice ψ .

$$K_{\sigma.2} = \frac{8,4}{0,63 + 1}$$

$$K_{\sigma.2} = 5,15$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 5,15 * 784,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 4.038,29 \text{ MPa}$$

Como os elementos estão submetidos simultaneamente à compressão e cisalhamento, é necessário determinar a tensão crítica combinada de verificação $\sigma_{cr.c}^v$, aplicando a Equação (29).

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = \frac{\sqrt{(127,57 \text{ MPa})^2 + 3 * (18,56 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 - 0,70}{4} * \frac{127,57 \text{ MPa}}{6.007,75 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 + 0,70}{4} * \frac{127,57 \text{ MPa}}{6.007,75 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{18,56 \text{ MPa}}{1.862,49 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = 5.570,97 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = \frac{\sqrt{(139,25 \text{ MPa})^2 + 3 * (5,00 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 + 0,63}{4} * \frac{139,25 \text{ MPa}}{4.038,29 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 - 0,63}{4} * \frac{139,25 \text{ MPa}}{4.038,29 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{5,00 \text{ MPa}}{4.190,59 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = 4.042,01 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, esses valores excedem o limite de proporcionalidade. Desta forma, é necessário adotar a tensão crítica reduzida $\sigma_{vcr.cr}^v$, aplicando a Equação (31).

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = \frac{250 \text{ MPa} * (5.570,97 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250 \text{ MPa})^2 + (5.570,97 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = 249,91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = \frac{250 \text{ MPa} * (4.042,01 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250 \text{ MPa})^2 + (4.042,01 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = 249,82 \text{ MPa}$$

Em seguida, é necessário calcular a tensão admissível de flambagem σ_a . Para isso, foi selecionado o coeficiente de segurança v referente ao caso 1 da Tabela 13 que, então, foi aplicado na Equação (32).

$$\sigma_{a.alma} = \frac{249,91 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (-0,70 - 1)}$$

$$\sigma_{a.alma} = 178,29 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a.mesa} = \frac{249,82 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (0,63 - 1)}$$

$$\sigma_{a.mesa} = 152,76 \text{ MPa}$$

Por fim, deve-se aplicar a Equação (34) para comparar a tensão atuante no ponto de maior solicitação com a tensão admissível de flambagem.

$$\sigma_{alma} = \sqrt{(127,57 \text{ MPa})^2 + 3 * (18,56 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{alma} = 131,56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mesa} = \sqrt{(139,25 \text{ MPa})^2 + 3 * (5,00 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{mesa} = 139,52 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, ambas as tensões se encontram abaixo das admissíveis, validando o dimensionamento da viga.

5.2.1.3 Verificação de contraflecha

As flechas da viga principal devido à carga distribuída f_G e à carga concentrada f_L foram encontradas a partir das Equações (35) e (36), respectivamente.

$$f_G = \frac{5 * 2,31 \text{ kN/m} * (10,00 \text{ m})^4}{384 * 200,00 \text{ GPa} * 3,06 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$f_G = 4,93 \text{ mm}$$

$$f_L = \frac{134,68 \text{ kN} * (10,00 \text{ m})^3}{48 * 200,00 \text{ GPa} * 3,06 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$f_L = 45,89 \text{ mm}$$

A partir desses valores, determinou-se a contraflecha f_c , utilizando a Equação (37).

$$f_c = 4,93 \text{ mm} + 0,5 * 45,89 \text{ mm}$$

$$f_c = 27,87 \text{ mm}$$

A adoção da contraflecha de 28 mm prescrita pela norma reduz a flecha em serviço de aproximadamente 51 mm para cerca de 23 mm, representando uma diminuição da ordem de 55% na deformação vertical da viga principal.

5.3 VIGA DE FECHAMENTO

A viga de fechamento, apresentada na Figura 25, é o elemento responsável por conectar estruturalmente as duas vigas principais do pórtico, assegurando o movimento solidário do conjunto. Além dessa função de rigidez global, ela também atua como elemento de espaçamento entre as vigas principais, definindo diretamente o vão disponível para o movimento do *trolley*.

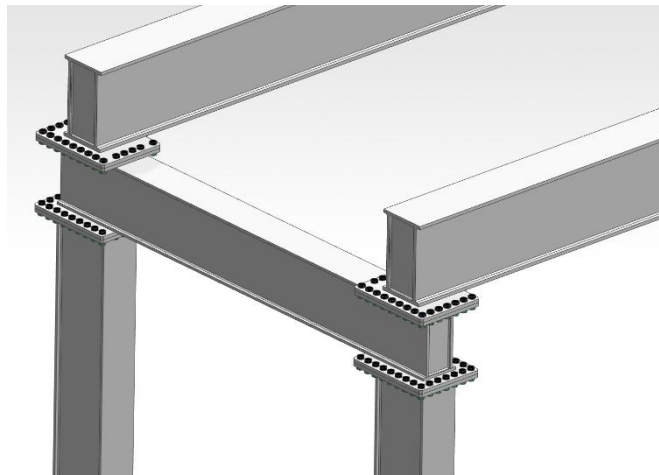


Figura 25 – Viga de fechamento

Fonte: Autoria própria (2025)

Para o sistema de movimentação da carga foi selecionado um *trolley* motorizado YALE Global King, modelo WC3T10-040S20-2-78, com capacidade de elevação de 10 toneladas e altura máxima de elevação de 12,2 m, cujas especificações técnicas estão apresentadas na Figura 26.



Especificações Técnicas - dupla viga									
Código do produto	Cap. (t)	Talha				Trole			
		Máxima elevação (m)	Velocidade (m/min)	Motor (hp)	Nº de cabos e Ø	Velocidade (m/min)	Motor (hp) (2)	Peso (kg)	Nº de Rodas e Ø
WC3T10-025S20-2-60	10	7,6	6,1 - 1,5	15 - 3,75	4 - 12	15,2 - 5,2	0,5 - 0,17	1050	4 - 203,2
WC3T10-040S20-2-78	10	12,2	6,1 - 1,5	15 - 3,75	4 - 12	15,2 - 5,2	0,5 - 0,17	1150	4 - 203,2
WD3T15-025S18-2-66	15	7,6	5,5 - 1,4	20 - 5	4 - 15	15,2 - 7,6	0,5 - 0,25	1502	4 - 152,4
WD3T15-040S18-2-78	15	12,2	5,5 - 1,4	20 - 5	4 - 15	15,2 - 7,6	0,5 - 0,25	1502	4 - 152,4

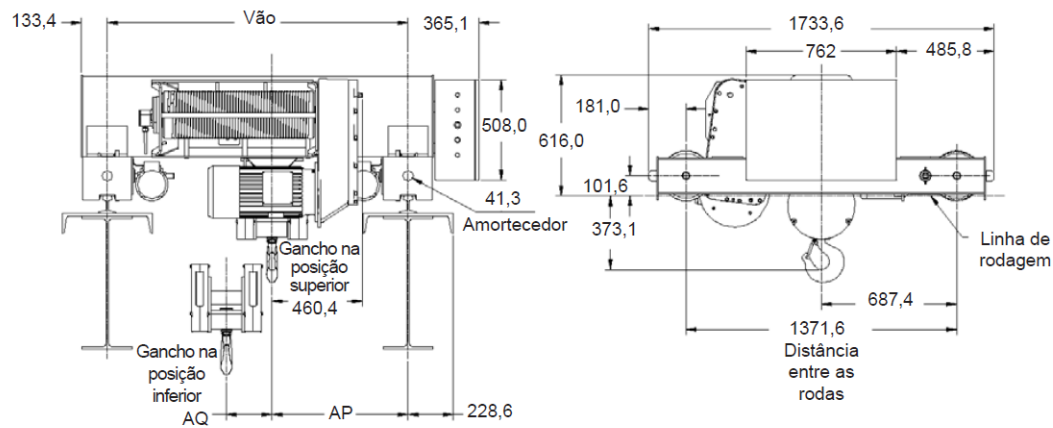
Dimensões em mm / * Ajuste no trilho (A.S.C.E) - 10 t : 25# - 60# / 15 t: 30# a 40#

Figura 26 – Especificações técnicas do *trolley* motorizado YALE Global King

Fonte: Columbus McKinnon (2015)

Em função das dimensões do *trolley* e do vão necessário para sua circulação entre as vigas principais, definiu-se que a viga de fechamento deve garantir uma distância entre os centros da viga principal de 1,98 m, conforme apresentado pela dimensão chamada de "Vão" na tabela da Figura 27. Desta forma, considerando a acomodação das vigas principais e de apoio, o comprimento final adotado para a viga de fechamento foi de 2,27 m.

Informações dimensionais 10 t - dupla viga



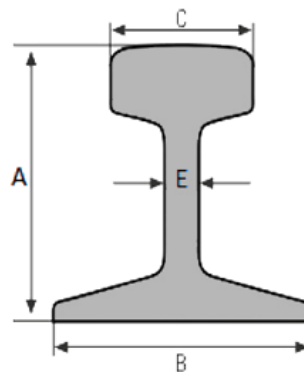
Elevação	7,6 m					12,2 m			
Vão (mm)	1524,0	1676,4	1828,8	1981,2	2133,6	1981,2	2133,6	2286,0	2438,4
AP (mm)	689,0	765,2	841,4	917,6	993,8	874,7	950,9	1027,1	1103,3
AQ (mm)			146,1					231,8	
Peso (Kg)	1050	1070	1091	1111	1132	1150	1170	1191	1211

G = E + 73,0 mm

Figura 27 – Informações dimensionais do trolley motorizado YALE Global King

Fonte: Columbus McKinnon (2015)

Para garantir o deslocamento do *trolley* ao longo das vigas principais, foi selecionado o trilho modelo ASCE 60, cujo geometria e esforços são compatíveis com a especificação do equipamento, conforme Figura 26. A Figura 28 apresenta as dimensões do perfil selecionado.



PERFIL	PESO [kg/m]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	E [mm]
ASCE 60	30,10	108,00	108,00	60,32	12,30

Figura 28 – Dimensões do trilho ASCE 60

Fonte: Adaptado de Trilhos de Trem (2023)

A fixação do trilho às vigas principais será realizada por meio de presilhas metálicas, conforme ilustrado na Figura 29. Esse sistema de fixação permite manter o trilho firmemente apoiado sobre a mesa da viga, garantindo estabilidade durante a movimentação do *trolley* e evitando deslocamentos laterais. Para sua instalação, as presilhas serão aparafusadas sobre uma placa metálica soldada à mesa da viga principal. Considerando que essa solda estará submetida ao mesmo regime de esforços observado nas ligações entre as chapas da viga principal, cujos cordões apresentaram tensões significativamente inferiores ao limite admissível (Seção 6.1.1), é adotado o mesmo tamanho de cordão para esta união, estabelecendo-se $s = 6$ mm.

Conforme recomendação do fornecedor, será utilizado o parafuso modelo TJ-32, cujo comprimento é adequado ao conjunto formado pela placa de apoio e pelas presilhas, garantindo a fixação segura do trilho. Além disso, o sistema proposto facilita a execução de inspeções e intervenções de manutenção, permitindo a remoção e a substituição do trilho em caso de desgaste ao longo do tempo, sem necessidade de retrabalho estrutural na viga.

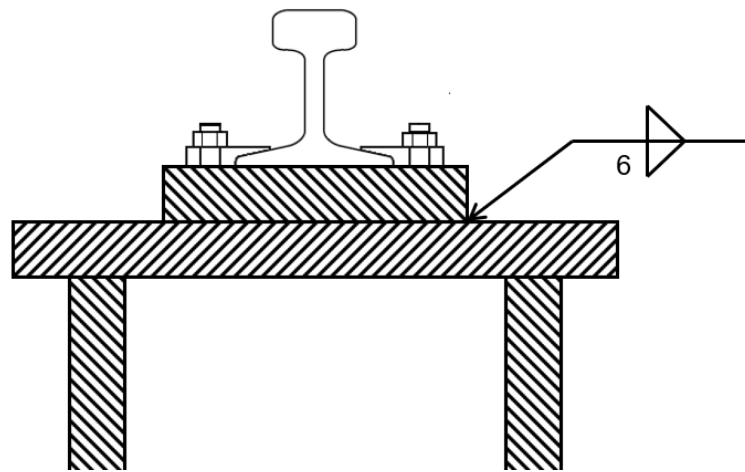


Figura 29 – Fixação dos trilhos por meio de presilhas

Fonte: Autoria própria (2025)

Embora as vigas de fechamento contribuam para a rigidez global do pórtico, elas não foram incluídas nas verificações estruturais do dimensionamento. A desconsideração desses elementos reduz a rigidez considerada no modelo, tornando os resultados obtidos mais conservadores.

5.4 VIGA DE APOIO

As vigas de apoio, apresentadas na Figura 30, são os elementos verticais responsáveis por sustentar os componentes superiores do pórtico, garantindo a altura útil necessária para a operação. Para este projeto, o comprimento das vigas foi definido como 7,00 m e o cenário considerado para o dimensionamento foi com a carga deslocada para a 1,00 m das extremidades da viga principal. Essa configuração produz os maiores esforços nas vigas de apoio, e garante o dimensionamento adequado da estrutura.

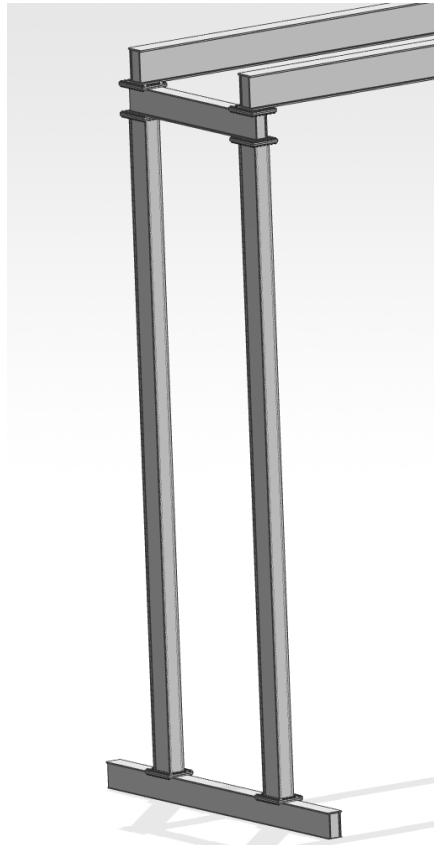


Figura 30 – Vigas de apoio
Fonte: Autoria própria (2025)

Para a modelagem da estrutura, considerou-se a viga como engastada na base, enquanto o topo é apoiado. Essa é uma consequência direta da configuração apresentada na Seção 5.2, para a viga principal. Por fim, foi elaborado um diagrama de corpo livre da viga de apoio, apresentado na Figura 31, a fim de auxiliar na identificação das forças atuantes. As forças verticais atuantes são o peso propagado dos elementos acima da viga de apoio $F_{P,PROP}$ e o peso da própria viga $F_{P,VA}$,

enquanto as cargas horizontais são as forças de inércia propagada dos elementos acima da viga de apoio $F_{IN.PROP}$ e inércia da própria viga $F_{IN.VA}$.

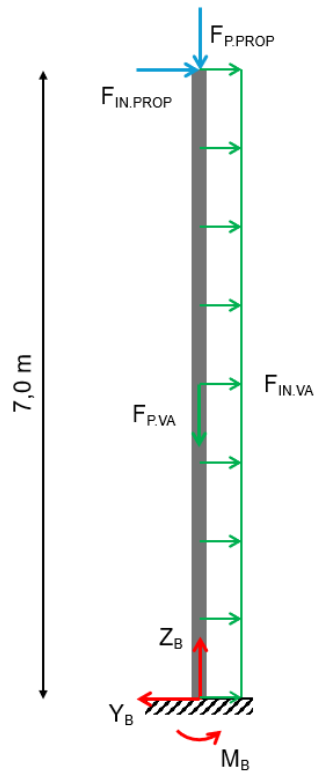


Figura 31 – Diagrama de corpo livre da viga de apoio
Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nas cargas determinadas na Seção 5.1 e 5.2, foram calculadas as solicitações atuantes nas vigas de apoio. A partir das cargas verticais propagadas pela viga principal, somadas ao peso próprio da viga de apoio, obteve-se uma força resultante $F_V = 90,40$ kN. Em seguida, foram determinados os esforços internos devido às forças horizontais na viga, sendo o esforço cortante máximo $V_H = 12,87$ kN e o momento fletor máximo $M_H = 70,24$ kN.m, conforme apresentado na Figura 32 e Figura 33.

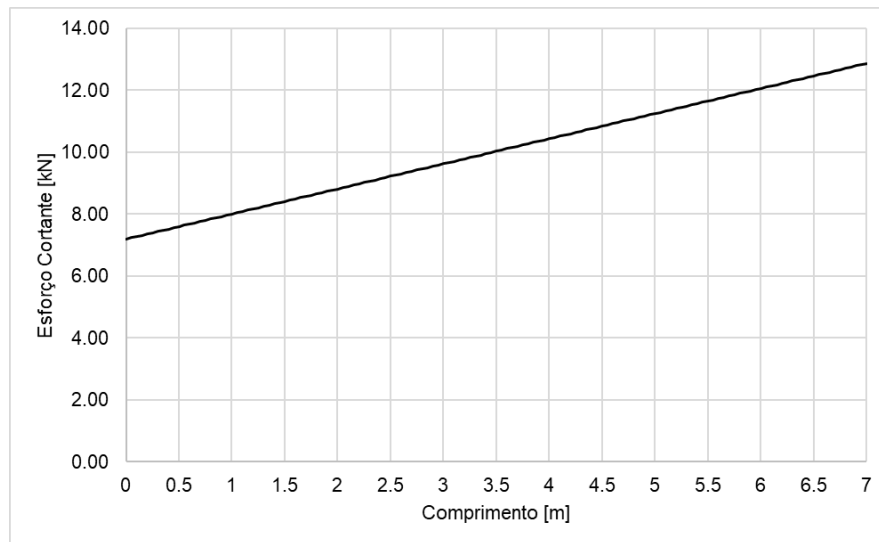


Figura 32 – Esforço cortante V_H devido a cargas horizontais ao longo da viga de apoio

Fonte: Autoria própria (2025)

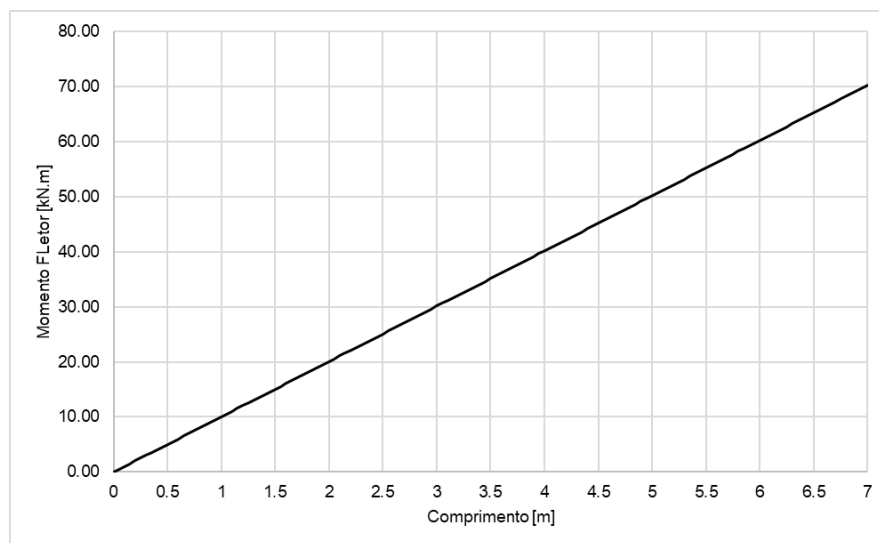


Figura 33 – Momento fletor M_H devido a cargas horizontais ao longo da viga de apoio

Fonte: Autoria própria (2025)

Como pode ser observado no diagrama, o momento fletor inicia em zero, mas não retorna a ele ao chegar na base. Esse comportamento evidencia a existência de um momento concentrado na região do engaste, sendo a reação necessária para equilibrar a força de inércia propagada $F_{IN.PROP}$.

5.4.1 Verificações na Viga de Apoio

Nesta etapa, são apresentadas as verificações estruturais da viga de apoio, abrangendo escoamento e flambagem. Para esta viga não será calculada a contraflecha, uma vez que ela é vertical e sofre majoritariamente esforços axiais. Para determinar a espessura das chapas, utilizou-se a metodologia apresentada no Capítulo 5 e, após as verificações, a espessura ideal encontrada para as chapas é de 12 mm. As propriedades da viga estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Propriedades da seção transversal das vigas de apoio

Propriedade	Valor
Espessura da chapa t	12 mm
Momento de inércia I_x	$4,00 * 10^7 \text{ mm}^4$
Momento de inércia I_z	$1,25 * 10^8 \text{ mm}^4$
Primeiro momento de área Q_x	$4,13 * 10^5 \text{ mm}^3$
Primeiro momento de área Q_z	$2,38 * 10^5 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_x	$4,44 * 10^5 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_z	$8,52 * 10^5 \text{ mm}^3$

Fonte: Autoria própria (2025)

5.4.1.1 Verificação contra o escoamento

Na verificação contra o escoamento, as tensões normais σ e de cisalhamento τ foram determinadas a partir dos esforços internos máximos obtidos na seção anterior. Para essa verificação, foram utilizadas as Equações (20), (21) e (22).

$$\sigma_{z,z} = \frac{90,40 \text{ kN}}{10.800 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{z,z} = 8,37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z.Y} = \frac{70,24 \text{ kN.m}}{8,52 * 10^5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{z.Y} = 82,40 \text{ MPa}$$

$$\tau_{z.Z} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_{z.Y} = \frac{12,87 \text{ kN} * 4,13 * 10^5 \text{ mm}^3}{1,25 * 10^8 \text{ mm}^4 * 12,00 \text{ mm}}$$

$$\tau_{z.Y} = 3,54 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, todas as tensões estão abaixo do valor admissível. Em seguida, essas tensões foram combinadas na forma de uma tensão equivalente σ_{eq} , calculada pela Equação (23). Essa tensão também se manteve inferior ao limite admissível, validando o dimensionamento da viga.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(8,37 \text{ MPa} + 82,40 \text{ MPa})^2 + 3 * (0,00 \text{ MPa} + 3,54 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 90,98 \text{ MPa}$$

5.4.1.2 Verificação contra a flambagem global

Para a verificação da flambagem global da viga de apoio, adotou-se o procedimento estabelecido na Seção 4.2.4, iniciando pelo cálculo do índice de esbeltez λ , obtido a partir da Equação (24). Para determinar esse parâmetro, foi identificado na Figura 14 o tipo de vínculo mais adequado ao modelo, sendo adotada a condição biengastada, que representa o comportamento real do sistema.

$$\lambda = \frac{0,65 * 7,00 \text{ m}}{\sqrt{\frac{4,00 * 10^7 \text{ mm}^4}{10.800 \text{ mm}^2}}}$$

$$\lambda \approx 75$$

A partir desse índice, identifica-se na Tabela 11 o valor correspondente do coeficiente de flambagem ω .

$$\omega = 1,48$$

Por fim, deve-se verificar as Equações (25) e (26).

$$\sigma_1 = \frac{90,40 \text{ kN}}{10.800 \text{ mm}^2} + \frac{70,24 \text{ kN.m}}{4,44 * 10^5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_1 = 166,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 1,48 * \frac{90,40 \text{ kN}}{10.800 \text{ mm}^2} + 0,9 * \frac{70,24 \text{ kN.m}}{4,44 * 10^5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_2 = 154,73 \text{ MPa}$$

Como ambos os valores estão abaixo da tensão admissível, os elementos estão seguros contra a flambagem global.

5.4.1.3 Verificação contra a flambagem local

Para verificar a flambagem local da alma, adotou-se a metodologia descrita na Seção 4.2.5. O procedimento se inicia com a determinação da tensão crítica de flambagem σ_{cr}^v , obtida pela aplicação da Equação (28). Para esse cálculo, selecionou-se o coeficiente correspondente ao caso

4 ($K_{\sigma.4}$) da Tabela 12. Considerando a condição mais desfavorável, a avaliação foi realizada na região de engaste com a viga de cabeceira, onde a solicitação é máxima.

$$K_{\sigma.4} = ((1 - 0,80) * 8,4 + 0,80 * 23,9 + 10 * (-0,80) * (1 - 0,80))$$

$$K_{\sigma.4} = 19,22$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 19,22 * 348,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 6.696,84 \text{ MPa}$$

Para a mesa, aplica-se o mesmo procedimento utilizado para a alma, sendo que neste caso, o coeficiente selecionado corresponde ao caso 2 ($K_{\sigma.2}$) da Tabela 12, definido conforme o enquadramento do índice ψ .

$$K_{\sigma.2} = \frac{8,4}{0,93 + 1}$$

$$K_{\sigma.2} = 4,36$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 4,36 * 784,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 3.419,88 \text{ MPa}$$

O próximo passo consiste em determinar a tensão crítica combinada de verificação $\sigma_{cr.c}^v$, aplicando a Equação (29).

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = \frac{\sqrt{(84,04 \text{ MPa})^2 + 3 * (6,38 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 - 0,80}{4} * \frac{84,04 \text{ MPa}}{6.696,84 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 + 0,80}{4} * \frac{84,04 \text{ MPa}}{6.696,84 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{6,38 \text{ MPa}}{1.861,82 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = 6.504,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = \frac{\sqrt{(90,77 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 + 0,93}{4} * \frac{90,77 \text{ MPa}}{3.419,88 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 - 0,93}{4} * \frac{90,77 \text{ MPa}}{3.419,88 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = 3.419,88 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, os valores obtidos ultrapassam o limite de proporcionalidade. Assim, torna-se necessário adotar a tensão crítica reduzida $\sigma_{vcr.cr}^v$, aplicando a Equação (31).

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = \frac{250,00 \text{ MPa} * (6.504,54 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250,00 \text{ MPa})^2 + (6.504,54 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = 249,93 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = \frac{250,00 \text{ MPa} * (3.419,88 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250,00 \text{ MPa})^2 + (3.419,88 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = 249,75 \text{ MPa}$$

Em seguida, calcula-se a tensão admissível de flambagem σ_a . Para isso, foi selecionado o coeficiente de segurança $^v v$ referente ao caso 1 da Tabela 13, o qual foi, então, aplicado na Equação (32).

$$\sigma_{a.alma} = \frac{249,93 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (-0,80 - 1)}$$

$$\sigma_{a.alma} = 180,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a.mesa} = \frac{249,75 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (0,93 - 1)}$$

$$\sigma_{a.mesa} = 148,04 \text{ MPa}$$

Por fim, é aplicada a Equação (34) a fim de comparar a tensão atuante no ponto de maior solicitação com a tensão admissível de flambagem.

$$\sigma_{alma} = \sqrt{(84,04 \text{ MPa})^2 + 3 * (6,38 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{alma} = 84,77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mesa} = \sqrt{(90,77 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{mesa} = 90,77 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, ambas as tensões se encontram abaixo das admissíveis, validando o dimensionamento da viga.

5.5 VIGA DE CABECEIRA

A viga de cabeceira, apresentada na Figura 34, é o elemento estrutural que conecta e estabiliza as vigas de apoio, servindo também de base para a instalação das rodas de translação responsáveis pelo deslocamento do pórtico ao longo do trilho. Neste projeto, cada viga de cabeceira possui 4,00 m de comprimento, e seu dimensionamento foi realizado considerando a carga concentrada deslocada para 1,00 m da extremidade da viga principal, uma vez que essa configuração impõe as maiores solicitações à estrutura.

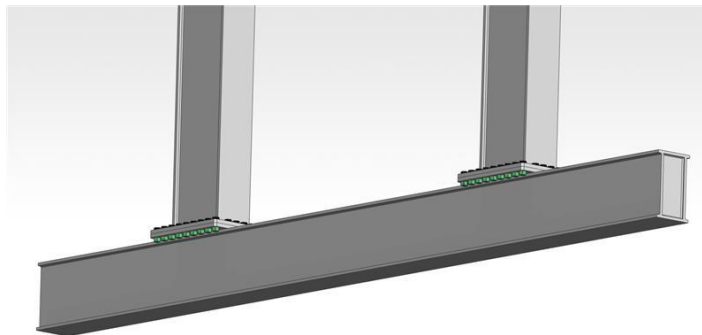


Figura 34 – Viga de cabeceira
Fonte: Autoria própria (2025)

Com o objetivo de facilitar a identificação das forças atuantes nas vigas de cabeceira, foi elaborado um diagrama de corpo livre, apresentado na Figura 35. A partir dele, observa-se a presença das forças verticais, compostas pelo peso propagado dos elementos acima da viga de cabeceira $F_{P.PROP}$, peso da própria viga $F_{P.VC}$ e forças normais traseira e frontal, $F_{N.T}$ e $F_{N.F}$, respectivamente. Quanto às forças horizontais, estão presentes as forças de inércia propagadas dos elementos acima da viga de apoio $F_{IN.PROP}$, inércia da própria viga $F_{IN.VC}$ e forças de atrito traseira e frontal, $F_{AT.T}$ e $F_{AT.F}$, respectivamente. Além disso, ainda há o momento concentrado propagado dos elementos acima da viga de apoio M_{PROP} .

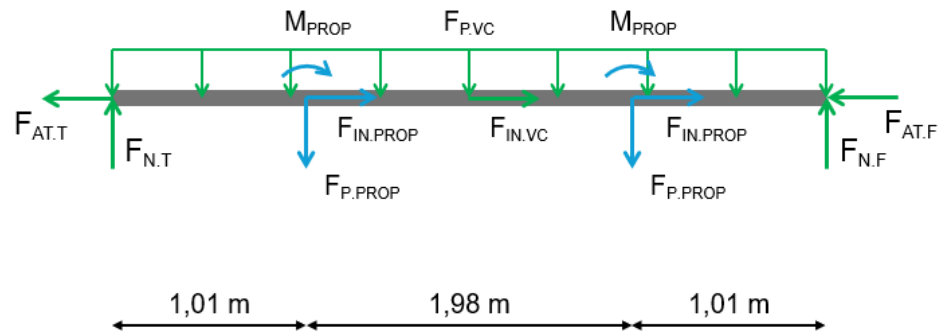


Figura 35 – Diagrama de corpo livre da viga de cabeceira

Fonte: Autoria própria (2025)

A partir das cargas obtidas nas Seções 5.1, 5.2 e 5.4, foram determinadas as solicitações atuantes na viga de cabeceira. A partir das cargas horizontais propagadas pelos elementos superiores, somadas a inércia da própria viga, obteve-se uma força resultante $F_H = 21,96$ kN. As forças normal e de atrito também contribuem para o conjunto de solicitações atuantes na viga, e seus valores estão apresentados nas Seções 5.5.1 e 5.5.2, respectivamente.

Em seguida, foram determinados os esforços internos devido às forças verticais na viga, sendo o esforço cortante máximo $V_V = 130,15$ kN e o momento fletor máximo $M_V = 130,15$ kN.m, conforme apresentado na Figura 36 e Figura 37.

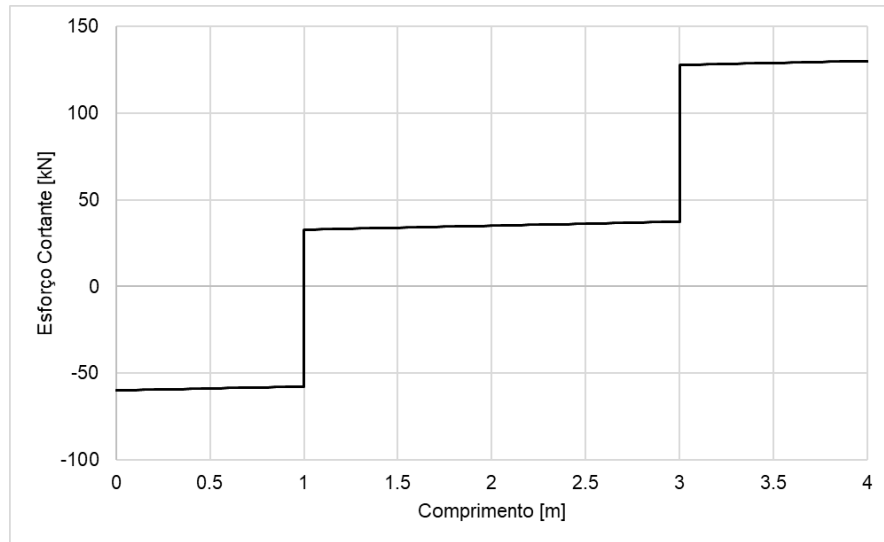


Figura 36 – Esforço cortante V_V devido a cargas verticais ao longo da viga de cabeceira
Fonte: Autoria própria (2025)

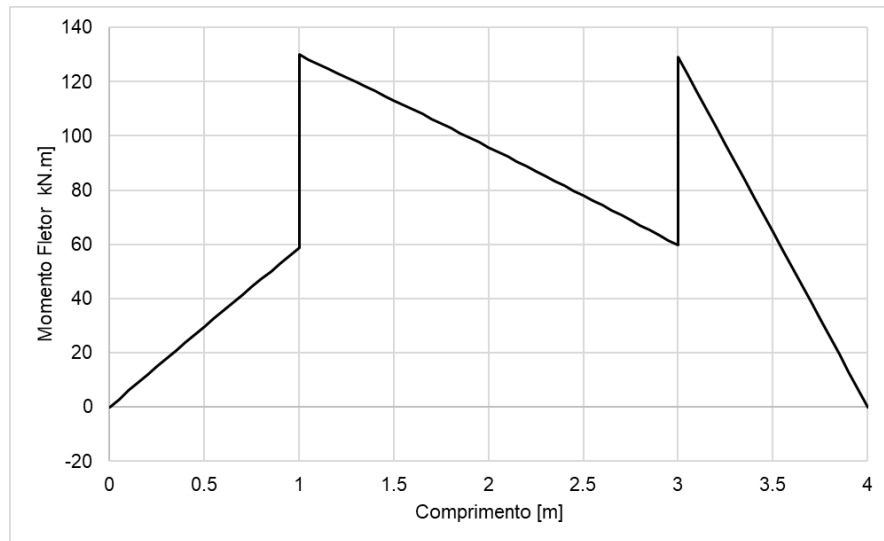


Figura 37 – Momento fletor M_V devido a cargas verticais ao longo da viga de cabeceira
Fonte: Autoria própria (2025)

5.5.1 Forças Normais nas Rodas

A determinação das forças normais atuantes nas rodas foi realizada a partir do equilíbrio estático da viga de cabeceira. Para isso, foram aplicados o somatório de momentos e o somatório de forças verticais. O cálculo do momento foi realizado tomando como referência o ponto de encontro entre a força de atrito e a reação frontal. Nessa configuração, contribuem para a geração

de momento no eixo x o peso próprio distribuído ao longo da viga, as solicitações verticais transmitidas pelas vigas de apoio e as reações de momento oriundas dessas mesmas vigas.

Com essas condições definidas, estruturou-se um sistema formado por duas equações e duas incógnitas, representando as forças normais que atuam na roda frontal e na roda traseira. A resolução do sistema pelo método de substituição fornece a força normal na roda traseira, apresentada na Equação (41), enquanto a força normal na roda dianteira é obtida pela Equação (42).

$$F_{N.T} = \frac{2 * F_{P.PROP} + F_{P.VC} * L}{2} - \frac{2 * M_{PROP}}{L} \quad [\text{kN}] \quad (41)$$

$$F_{N.T} = \frac{2 * 90,40 \text{ kN} + 2,31 \text{ kN} * 4,00 \text{ m}}{2} - \frac{2 * 70,24 \text{ kN.m}}{4,00 \text{ m}}$$

$$F_{N.T} = 59,92 \text{ kN}$$

$$F_{N.F} = \frac{2 * F_{P.PROP} + F_{P.VC} * L}{2} + \frac{2 * M_{PROP}}{L} \quad [\text{kN}] \quad (42)$$

$$F_{N.F} = \frac{2 * 90,40 \text{ kN} + 2,31 \text{ kN} * 4,00 \text{ m}}{2} + \frac{2 * 70,24 \text{ kN.m}}{4,00 \text{ m}}$$

$$F_{N.F} = 130,15 \text{ kN}$$

5.5.2 Forças de Atrito nas Rodas

As forças de atrito nas rodas são determinadas a partir da multiplicação das forças normais obtidas na seção anterior pelo coeficiente de atrito real μ , cujo valor é obtido pela Equação (43), a partir da razão entre a força horizontal total F_H e o peso total atuante no pórtico F_P .

$$\mu = \frac{F_H}{F_P} \quad (43)$$

$$\mu = \frac{48,22 \text{ kN} + 9,72 \text{ kN}}{137,71 \text{ kN} + 134,68 \text{ kN}}$$

$$\mu = 0,21$$

Neste projeto, o atrito está associado principalmente às situações de frenagem do pórtico e, como pode ser observado, o valor obtido para o coeficiente é superior ao esperado teoricamente para o contato roda-trilho. Isso ocorre porque as forças de inércia adotadas não foram calculadas exclusivamente pela Segunda Lei de Newton, mas sim conforme o procedimento normativo, que aplica sucessivas majorações aos esforços atuantes. Assim, a inércia passa a ter relação indireta com a força de atrito, explicando a discrepância entre o coeficiente calculado e o valor teórico. Com base no coeficiente calculado, a força de atrito em cada roda é obtida por meio da Equação (44).

$$F_{AT} = \mu * F_N \quad [\text{kN}] \quad (44)$$

$$F_{AT.T} = 0,21 * 59,92 \text{ kN}$$

$$F_{AT.T} = 12,75 \text{ kN}$$

$$F_{AT.F} = 0,21 * 130,15 \text{ kN}$$

$$F_{AT.F} = 27,70 \text{ kN}$$

5.5.3 Verificações na Viga de Cabeceira

Nesta etapa, são apresentadas as verificações estruturais da viga de apoio, abrangendo escoamento, flambagem e contraflecha. Para determinar a espessura das chapas, utilizou-se a metodologia apresentada no Capítulo 5 e, após as verificações, a espessura ideal encontrada para as chapas é de 12 mm. As propriedades da viga estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Propriedades da seção transversal das vigas de cabeceira

Propriedade	Valor
Espessura da chapa t	12 mm
Momento de inércia I_x	$1,25 * 10^8 \text{ mm}^4$
Momento de inércia I_y	$4,00 * 10^7 \text{ mm}^4$
Primeiro momento de área Q_x	$2,38 * 10^5 \text{ mm}^3$
Primeiro momento de área Q_y	$4,13 * 10^5 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_x	$8,52 * 10^5 \text{ mm}^3$
Módulo de resistência W_y	$4,44 * 10^5 \text{ mm}^3$

Fonte: Autoria própria (2025)

5.5.3.1 Verificação contra o escoamento

Na verificação contra o escoamento, as tensões normais σ e de cisalhamento τ foram determinadas a partir dos esforços internos máximos obtidos na seção anterior. Para essa verificação, foram utilizadas as Equações (20), (21) e (22).

$$\sigma_{y,z} = \frac{130,15 \text{ kN.m}}{8,52 * 10^5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{y,z} = 152,69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,y} = \frac{21,96 \text{ kN}}{10.800 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{y,y} = 2,03 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,z} = \frac{130,15 \text{ kN} * 4,13 * 10^5 \text{ mm}^3}{1,25 * 10^8 \text{ mm}^4 * 12,00 \text{ mm}}$$

$$\tau_{y,z} = 2,38 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,Y} = 0,00 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, todas as tensões estão abaixo do valor admissível. Em seguida, essas tensões foram combinadas na forma de uma tensão equivalente σ_{eq} , calculada pela Equação (23). Essa tensão também se manteve inferior ao limite admissível, validando o dimensionamento da viga.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(152,69 \text{ MPa} + 2,03 \text{ MPa})^2 + 3 * (2,38 \text{ MPa} + 0,00 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 153,31 \text{ MPa}$$

5.5.3.2 Verificação contra a flambagem local

Assim como foi conduzido para as outras vigas, a verificação da alma seguiu a metodologia aplicada na Seção 4.2.5. Inicialmente, determinou-se a tensão crítica de flambagem σ_{cr}^v por meio da Equação (28), utilizando o coeficiente referente ao caso 4 ($K_{\sigma,4}$) da Tabela 12. A análise foi concentrada na região de interface com a viga de apoio, onde se observam os maiores esforços atuantes na alma.

$$K_{\sigma,4} = ((1 - 0,98) * 8,4 + 0,98 * 23,9 + 10 * (-0,98) * (1 - 0,98))$$

$$K_{\sigma,4} = 23,40$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 23,40 * 348,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.alma}^v = 8.155,85 \text{ MPa}$$

No caso da mesa, a avaliação segue a mesma metodologia da alma, sendo que neste caso, o coeficiente selecionado é referente ao caso 2 ($K_{\sigma,2}$) da Tabela 12, de acordo com o enquadramento do índice ψ .

$$K_{\sigma.2} = \frac{8,4}{0,67 + 1}$$

$$K_{\sigma.2} = 5,03$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 5,03 * 784,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.mesa}^v = 3.946,62 \text{ MPa}$$

O próximo passo consiste em determinar a tensão crítica combinada de verificação $\sigma_{cr.c}^v$, por meio da aplicação da Equação (29).

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = \frac{\sqrt{(62,94 \text{ MPa})^2 + 3 * (0,60 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 - 0,98}{4} * \frac{62,94 \text{ MPa}}{8.155,85 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 + 0,98}{4} * \frac{62,94 \text{ MPa}}{8.155,85 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{0,60 \text{ MPa}}{1.867,25 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.alma}^v = 8.149,80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = \frac{\sqrt{(94,10 \text{ MPa})^2}}{\frac{1 + 0,67}{4} * \frac{94,10 \text{ MPa}}{3.946,62 \text{ MPa}} + \sqrt{\left(\frac{3 - 0,67}{4} * \frac{94,10 \text{ MPa}}{3.946,62 \text{ MPa}}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr.c.mesa}^v = 3.946,62 \text{ MPa}$$

Observa-se que os valores obtidos ultrapassam o limite de proporcionalidade. Desta forma, é necessário adotar a tensão crítica reduzida $\sigma_{vcr.cR}^v$, por meio da Equação (31).

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = \frac{250,00 \text{ MPa} * (8.149,80 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250,00 \text{ MPa})^2 + (8.149,80 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.alma}^v = 249,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = \frac{250,00 \text{ MPa} * (3.946,62 \text{ MPa})^2}{0,1836 * (250,00 \text{ MPa})^2 + (3.946,62 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{cr.c.R.mesa}^v = 249,82 \text{ MPa}$$

Em seguida, calcula-se a tensão admissível de flambagem σ_a . Para isso, foi selecionado o coeficiente de segurança $^v v$ referente ao caso 1 da Tabela 13 , o qual foi, então, aplicado na Equação (32).

$$\sigma_{a.alma} = \frac{249,96 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (-0,98 - 1)}$$

$$\sigma_{a.alma} = 184,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a.mesa} = \frac{249,82 \text{ MPa}}{1,70 + 0,175 * (0,67 - 1)}$$

$$\sigma_{a.mesa} = 152,14 \text{ MPa}$$

Por fim, é aplicada a Equação (34), a fim de comparar a tensão atuante no ponto de maior solicitação com a tensão admissível de flambagem.

$$\sigma_{alma} = \sqrt{(62,94 \text{ MPa})^2 + 3 * (0,60 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{alma} = 62,95 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mesa} = \sqrt{(94,10 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{mesa} = 94,10 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, ambas as tensões se encontram abaixo das admissíveis, validando o dimensionamento da viga.

5.5.3.3 Verificação de contraflecha

As flechas da viga principal devido à carga distribuída f_G e à carga concentrada f_L foram encontradas a partir das Equações (35) e (45), respectivamente.

$$f_G = \frac{5 * 2,31 \text{ kN/m} * (4,00 \text{ m})^4}{384 * 200,00 \text{ GPa} * 1,25 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$f_G = 0,31 \text{ mm}$$

$$f_L = \frac{P * a * (3 * L^2 - 4 * a^2)}{24 * E * I} \quad [MPa] \quad (45)$$

$$f_L = \frac{90,40 \text{ kN} * 1,01 \text{ m} * (3 * (4,00 \text{ m})^2 - 4 * (1,01 \text{ m})^2)}{24 * 200,00 \text{ GPa} * 1,25 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$f_L = 6,68 \text{ mm}$$

A partir desses valores, determinou-se a contraflecha f_c , utilizando a Equação (37).

$$f_c = 0,31 \text{ mm} + 0,5 * 6,68 \text{ mm}$$

$$f_c = 3,65 \text{ mm}$$

Como esse valor é menor do que o estabelecido em norma, entende-se que não é necessário aplicar contraflecha na viga de cabeceira.

6 DIMENSIONAMENTO COMPLEMENTAR

O dimensionamento complementar representa a transição do projeto para a fabricação, reunindo todos os elementos estruturais e tornando-os uma única estrutura. Neste capítulo, será abordado esse processo, com ênfase na construção da viga caixão e nas interfaces de soldagem entre as vigas e os flanges, além da etapa final de união das vigas, que consolida o conjunto na configuração de pórtico.

6.1 SOLDAGEM

Considerando o metal base ASTM A36, optou-se por selecionar um eletrodo cujo limite ruptura fosse maior ao do material a ser soldado, conforme recomendado pela norma AWS D1.1 M. Desta forma, o eletrodo selecionado foi o E7018. Além do requisito de resistência mecânica, também foram considerados fatores como tenacidade, menor suscetibilidade a trincas induzidas por hidrogênio e boa estabilidade do arco para soldagem em múltiplas posições. Assim, o eletrodo adotado foi o E7018, cujas características estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Propriedades do eletrodo E7018

Propriedade	Valor
Limite de escoamento $\sigma_{e.E}$	400,00 MPa
Limite de ruptura $\sigma_{r.E}$	490,00 MPa
Tipo de revestimento	Básico (baixo hidrogênio)
Processo	Eletrodo revestido
Posições de soldagem	Todas as posições

Fonte: AWS D1.1 M (2020)

6.1.1 Soldagem para Construção das Vigas

Para a união das chapas, adotou-se a solda tipo filete, contínua ao longo de todo o comprimento das vigas. A Figura 38 apresenta a disposição dos cordões ao longo da seção

transversal, evidenciando os quatro pontos de soldagem responsáveis por garantir a continuidade estrutural da viga caixão.

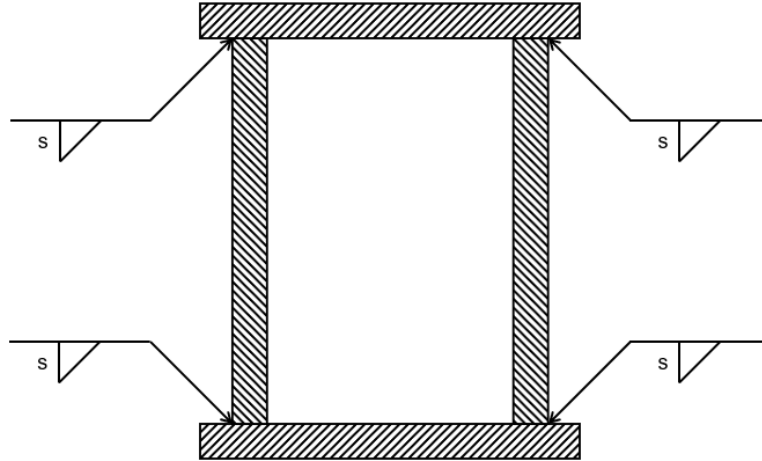


Figura 38 – Disposição das soldas ao longo das vigas

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que s representa o tamanho do filete de solda, definido pela dimensão da perna do cordão aplicado. Esse parâmetro é essencial, pois determina a área resistente da solda e, portanto, sua capacidade de transmitir esforços entre as placas garantindo o comportamento integrado da seção. No entanto, a norma estabelece um limite mínimo para o tamanho de s , a fim de garantir a fusão adequada e evitar descontinuidades ou falhas por falta de penetração. A Tabela 22 relaciona as espessuras das chapas de cada viga t com os valores mínimos normativos de s , servindo como referência para o dimensionamento adequado de cada filete.

Tabela 22 – Tamanhos mínimos dos cordões de solda

Viga	Espessura das chapas t	Tamanho mínimo do cordão s
Viga principal	15 mm	6 mm
Viga de apoio	12 mm	5 mm
Viga de cabeceira	12 mm	5 mm

Fonte: AWS D1.1 M (2020)

Para o dimensionamento das soldas que unem as chapas, adotou-se o conceito de fluxo de cisalhamento q ao longo da viga. Esse método é apropriado visto que, neste caso, as soldas não atuam recebendo diretamente o esforço externo, mas garantindo que as chapas trabalhem de forma integrada, sem deslizamento relativo entre si, permitindo que a seção da viga resista aos esforços

como um único corpo. Dessa forma, o fluxo de cisalhamento representa a taxa de transferência de força cortante entre as placas, e está apresentado na Equação (46).

$$q = \frac{V * Q}{I} \quad [\text{kN/mm}] \quad (46)$$

Então, para determinar a tensão de cisalhamento na solda, é necessário dividir o fluxo q pela garganta efetiva a do filete de solda. Os valores da garganta para uma solda tipo filete e da tensão de cisalhamento são obtidos pelas Equações (47) e (48), respectivamente.

$$a = \sin(45^\circ) * s \quad [\text{mm}] \quad (47)$$

$$\tau = \frac{q}{a} \quad [\text{MPa}] \quad (48)$$

Por fim, conforme estabelecido na AWS D1.1 M, a tensão calculada na solda deve ser comparada com a tensão admissível τ_a , definida como o menor valor entre 30% da tensão de ruptura do eletrodo e 40% da resistência ao cisalhamento do metal base, conforme apresentado nas Equações (49) e (50).

$$\tau_a = 0,3 * \sigma_{r.E} \quad [\text{MPa}] \quad (49)$$

$$\tau_a = 0,3 * 490,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 147,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 0,4 * \sigma_e \quad [\text{MPa}] \quad (50)$$

$$\tau_a = 0,4 * 250,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 100,00 \text{ MPa}$$

Observa-se que, neste projeto, a tensão admissível é $\tau_a = 100,00 \text{ MPa}$.

Para verificar cada viga, os valores mínimos estipulados para cada perna de filete na Tabela 22 foram aplicados nas Equações (46), (47) e (48), a fim de determinar as tensões atuantes e compará-las com a tensão admissível do projeto. Caso o valor mínimo estipulado para a perna do filete resulte em tensões superiores à admissível, o tamanho da solda é incrementado em 1 mm e o procedimento de verificação é repetido até que a condição seja atendida.

Nessas equações, são utilizados os índices VP , VA e VC para identificar as vigas principais, de apoio e de cabeceira, respectivamente. Os índices V e H referem os esforços verticais e horizontais. É importante ressaltar que, para este caso, a AWS D1.1 M estabelece que as tensões axiais não são objeto de verificação.

$$q_{VP,V} = \frac{45,24 \text{ kN} * 4,64 * 10^5 \text{ mm}^3}{3,06 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$q_{VP,V} = 68,63 \text{ kN/mm}$$

$$a_{VP,V} = \sin(45^\circ) * 6 \text{ mm}$$

$$a_{VP,V} = 4,24 \text{ mm}$$

$$\tau_{VP,V} = \frac{68,63 \text{ kN/mm}}{4,24 \text{ mm}}$$

$$\tau_{VP,V} = 16,18 \text{ MPa}$$

$$q_{VP,H} = \frac{6,49 \text{ kN} * 8,07 * 10^5 \text{ mm}^3}{9,76 * 10^7 \text{ mm}^4}$$

$$q_{VP,H} = 53,63 \text{ kN/mm}$$

$$a_{VP,H} = \sin(45^\circ) * 6 \text{ mm}$$

$$a_{VP,H} = 4,24 \text{ mm}$$

$$\tau_{VP.H} = \frac{53,63 \text{ kN/mm}}{4,24 \text{ mm}}$$

$$\tau_{VP.H} = 12,64 \text{ MPa}$$

$$\tau_{eq} = \sqrt{(16,18 \text{ MPa})^2 + (12,64 \text{ MPa})^2}$$

$$\tau_{eq} = 28,82 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, para cordões com perna $s = 6,00 \text{ mm}$, as tensões nas soldas das vigas principais permanecem inferiores ao valor admissível estabelecido para o projeto. Desta forma, as juntas podem ser consideradas adequadas para o pórtico.

$$q_{VA,H} = \frac{12,87 \text{ kN} * 4,13 * 10^5 \text{ mm}^3}{1,25 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$q_{VA,H} = 42,44 \text{ kN/mm}$$

$$a_{VP.V} = \sin(45^\circ) * 5 \text{ mm}$$

$$a_{VA,H} = 3,54 \text{ mm}$$

$$\tau_{VA,H} = \frac{42,44 \text{ kN/mm}}{3,54 \text{ mm}}$$

$$\tau_{VA,H} = 12,00 \text{ MPa}$$

Verifica-se que, para cordões com perna $s = 5,00 \text{ mm}$, as tensões atuantes nas soldas das vigas de apoio se mantêm abaixo do limite admissível para o projeto. Assim, conclui-se que as juntas apresentam capacidade resistente suficiente e são adequadas para uso na estrutura do pórtico.

$$q_{VC.V} = \frac{130,15 \text{ kN} * 4,13 * 10^5 \text{ mm}^3}{1,25 * 10^8 \text{ mm}^4}$$

$$q_{VC.V} = 429,08 \text{ kN/mm}$$

$$a_{VP.V} = \sin(45^\circ) * 7 \text{ mm}$$

$$a_{VC.V} = 4,95 \text{ mm}$$

$$\tau_{VC.V} = \frac{429,08 \text{ kN/mm}}{4,95 \text{ mm}}$$

$$\tau_{VC.V} = 86,69 \text{ MPa}$$

Como pode ser observado, para cordões com perna $s = 7 \text{ mm}$, as tensões nas soldas das vigas de cabeceira permanecem inferiores ao valor admissível estabelecido para o projeto. Portanto, as juntas podem ser consideradas adequadas para o pórtico.

6.1.2 Soldagem Viga-Flange

Diferentemente do caso apresentado na seção anterior, a soldagem entre as vigas e os flanges está diretamente submetida aos esforços transmitidos pela estrutura. Neste caso, o cordão não se limita a garantir continuidade geométrica, mas deve suportar e transferir os esforços entre componentes da estrutura.

A Figura 39 apresenta a disposição da solda nas interfaces viga–flange, destacando o perímetro de união e a região de aplicação dos esforços.

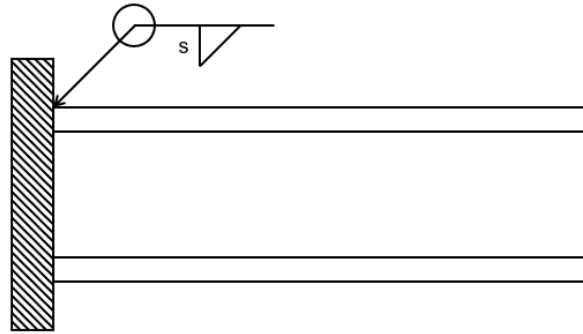


Figura 39 – Disposição da solda nas interfaces viga-flange

Fonte: Autoria própria (2025)

As tensões atuam na forma de cisalhamento, e são originadas pelos esforços axial (τ), cortante (τ') e momento fletor (τ'') atuantes na viga. Para determinar cada uma dessas parcelas, utilizam-se as Equações (51), (52) e (53), respectivamente.

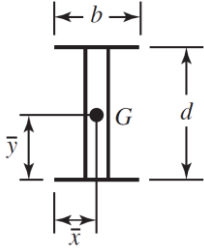
$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (51)$$

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (52)$$

$$\tau'' = \frac{M * r}{a * I_u} \quad [\text{MPa}] \quad (53)$$

Para a verificação, analisou-se a interface entre a viga de apoio e a viga de cabeceira, por se tratar da região mais solicitada do pórtico, onde se acumulam o carregamento vertical, o carregamento horizontal e o momento gerado pela operação do sistema. A partir dessa condição, o dimensionamento foi iniciado a partir do modelo simplificado apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Propriedades torcionais de soldas de filete

Solda	Área da garganta A	Segundo momento polar de área I_u
	$A = 2 * a * (b + d)$	$I_u = \frac{d^2}{6} * (3b + d)$

Fonte: Adaptado de Shigley (2015)

$$a_{VP,V} = \sin(45^\circ) * 13 \text{ mm}$$

$$a = 9,19 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{90,40 \text{ kN}}{2 * 9,19 \text{ mm} * (180,00 \text{ mm} + 294,00 \text{ mm})}$$

$$\tau = 10,37 \text{ MPa}$$

$$\tau' = \frac{12,87 \text{ kN}}{2 * 9,19 \text{ mm} * (180,00 \text{ mm} + 294,00 \text{ mm})}$$

$$\tau' = 1,48 \text{ MPa}$$

$$\tau'' = \frac{70,23 \text{ kN} \cdot \text{m} * 294,00 \text{ mm}}{2 * 9,19 \text{ mm} * \left(\frac{(294,00 \text{ mm})^2}{6} * (3 * 180,00 \text{ mm} + 294,00 \text{ mm}) \right)}$$

$$\tau'' = 93,49 \text{ MPa}$$

Com as parcelas de tensão obtidas, é calculada a tensão equivalente na solda e, em seguida, é realizada a verificação em relação à tensão admissível do projeto.

$$\tau_{eq} = \sqrt{(10,37 \text{ MPa})^2 + (1,48 \text{ MPa})^2 + (93,49 \text{ MPa})^2}$$

$$\tau_{eq} = 94,07 \text{ MPa}$$

Verifica-se que, para cordões com perna $s = 13 \text{ mm}$, as tensões atuantes nas soldas da interface viga-flange se mantêm abaixo do limite admissível para o projeto. Entretanto, a espessura da chapa da viga nessa região é de 12 mm , o que impõe uma restrição geométrica ao tamanho máximo do cordão de solda aplicável.

Diante dessa limitação, foi realizada uma verificação computacional adotando cordões com perna $s = 12 \text{ mm}$ nos trechos onde a espessura da chapa restringe o dimensionamento. Nas regiões mais críticas, como na junta entre a viga de cabeceira e a viga de apoio, a redução do tamanho da solda foi compensada com o aumento máximo permitido em outras regiões onde não há tal restrição, resultando em cordões com perna de até 16 mm . Os resultados dessa análise atenderam aos critérios de resistência e encontram-se apresentados na Seção 7.3.2. Assim, conclui-se que as juntas avaliadas possuem capacidade resistente suficiente e são adequadas para utilização na estrutura do pórtico.

Além disso, como a verificação foi realizada na região mais solicitada da estrutura, entende-se que o dimensionamento adotado é válido para as demais interfaces soldadas. Em razão da variação do tamanho dos cordões, todas as especificações de solda serão indicadas de forma explícita no desenho técnico, a fim de garantir clareza, padronização e correta execução em campo.

6.2 JUNTAS APARAFUSADAS

As ligações aparafusadas representam uma das soluções mais utilizadas em estruturas metálicas, devido à sua simplicidade de execução, confiabilidade e custo relativamente baixo. Diferentemente das uniões soldadas, que demandam maior tempo de operação em campo, as juntas por parafusos podem ser instaladas de forma rápida e segura, reduzindo significativamente o tempo total de montagem.

Neste projeto, as juntas aparafusadas foram empregadas nas conexões entre vigas, com o objetivo de permitir que o pórtico seja transportado desmontado. Dessa forma, o equipamento pode ser montado diretamente no local de operação, otimizando a logística de transporte e instalação.

Além disso, a adoção dessas juntas confere maior flexibilidade ao equipamento ao longo de sua vida útil. A possibilidade de desmontar trechos específicos da estrutura facilita intervenções de manutenção, substituição de componentes, adaptações futuras ou até mesmo a realocação ou venda do pórtico.

6.2.1 Método de Criação e Avaliação da Conexão

O dimensionamento de juntas é realizado de forma iterativa, uma vez que a escolha do tipo e do diâmetro dos fixadores influencia diretamente as dimensões do flange e a quantidade de parafusos que podem ser dispostos na ligação. Até esta etapa, as verificações foram conduzidas por meio de cálculos analíticos. A partir deste ponto, entretanto, o dimensionamento será realizado com auxílio computacional, considerando os seguintes fatores:

- A escolha do fixador modifica o dimensionamento do flange e as tensões transmitidas à solda, exigindo uma análise conjunta do conjunto. O auxílio computacional permite avaliar simultaneamente essas interações e evitar sobrecargas em qualquer componente da junta.
- Como todos os elementos estruturais já estão definidos e a geometria do sistema está completamente modelada, a análise computacional passa a explorar diretamente a configuração real da estrutura, reduzindo incertezas.
- As uniões aparafusadas estão submetidas predominantemente a esforços compressivos, sendo a resistência da junta garantida principalmente pelo contato normal entre flanges e pelo atrito gerado entre as superfícies. Assim, os parafusos atuam essencialmente como elemento normativo e de segurança contra situações excepcionais.
- Os cálculos analíticos simplificados tornam-se excessivamente conservadores para as vigas e podem gerar distribuições de esforços pouco realistas nas regiões de contato. A modelagem computacional, portanto, se torna necessária para representar adequadamente o comportamento estrutural das ligações aparafusadas.

Dessa forma, o modelo do flange, bem como a distribuição e a classe dos fixadores, foi definido em conformidade com as restrições estabelecidas pela Eurocode 3. Já a verificação contra o escoamento dos fixadores foi conduzida de acordo com os critérios da API 16H.

6.2.2 Especificações e Desenvolvimento do Projeto da Junta

As ligações aparafusadas submetidas à tração ou cisalhamento são classificadas pela Eurocode 3 de acordo com o tipo de solicitação e o comportamento estrutural esperado da junta.

Ligações em cisalhamento:

- Categoria A – Tipo de apoio (*bearing type*): Os parafusos absorvem os esforços por contato direto com as paredes dos furos. Não há necessidade de pré-aperto nem de preparação especial das superfícies.
- Categoria B – Resistência ao deslizamento no Estado Limite de Serviço (SLS): A junta é dimensionada para impedir deslizamento durante as cargas usuais de operação. A carga de cisalhamento admissível deve respeitar a resistência ao deslizamento e considerar os efeitos dos furos previstos na norma.
- Categoria C – Resistência ao deslizamento no Estado Limite Último (ULS): Utiliza parafusos pré-apertados. O deslizamento não pode ocorrer mesmo sob condições extremas de carregamento no estado limite último.

Ligações em tração:

- Categoria D – Tração sem pré-aperto: Os parafusos não recebem pré-aperto e são aplicados apenas em situações sem variações significativas ou frequentes de carregamento. São usualmente empregados para solicitações moderadas, como forças de vento.
- Categoria E – Tração com pré-aperto: Os parafusos são pré-apertados conforme os requisitos normativos. A resistência à tração é avaliada considerando também os efeitos dos furos e a possível interação com o deslizamento.

Após a análise das diferentes categorias de ligação previstas Eurocode 3, definiu-se a adoção das Categorias B e E para o dimensionamento dos fixadores do pórtico rolante. Essa escolha assegura que a ligação apresente desempenho adequado tanto em termos de resistência ao deslizamento quanto de capacidade trativa, atendendo às exigências de segurança, durabilidade e confiabilidade estrutural esperadas para equipamentos submetidos a carregamentos dinâmicos e cíclicos, como é o caso de pontes e pórticos rolantes.

Nesse contexto, a Categoria E é especialmente relevante para o desempenho em fadiga. Quando o parafuso é pré-tensionado, ele passa a trabalhar em tração desde o aperto inicial, enquanto as superfícies da junta permanecem continuamente comprimidas pela força de pré-carga. Assim, quando uma força externa de tração atua sobre a ligação, apenas uma fração da variação desse esforço é efetivamente transferida ao parafuso, o restante é absorvido pela perda parcial da compressão na junta. Esse mecanismo limita as oscilações de tensão no fixador ao longo dos ciclos de carregamento, reduzindo o risco de fadiga e aumentando a vida útil da ligação.

A pré-carga também impede a abertura da junta durante os ciclos de carregamento, evitando a separação das superfícies metálicas. Essa condição não apenas preserva o coeficiente de atrito entre os flanges como também impede a entrada de umidade nas superfícies internas de contato, reduzindo o risco de corrosão.

Caso o deslizamento ou folga da junta seja permitido, surgem efeitos indesejáveis tanto na integridade estrutural quanto no desempenho operacional. O pórtico e o *trolley* dependem de alinhamento preciso para operar sobre trilhos. O deslizamento acumulado nas ligações pode gerar desalinhamento permanente das vigas, aumentando o desgaste mecânico e podendo resultar no travamento do trole ou de toda a ponte.

Além disso, quando a junta escorrega, a transmissão de esforços deixa de ocorrer pelo atrito e passa a ocorrer pelo contato direto entre o parafuso e a parede do furo. Essa transferência brusca causa impactos e picos dinâmicos não considerados no modelo estrutural inicial, elevando o risco de fadiga e eventual falha frágil em componentes adjacentes.

Por esse motivo, a combinação das Categorias B e E assegura que os fixadores resistam simultaneamente às demandas de rigidez operacional (controle de deslizamento) e de resistência à fadiga (pré-carga controlada), condições indispensáveis para a longevidade e confiabilidade de um pórtico rolante.

Dessa forma, a norma apresenta a Tabela 24 que relaciona as categorias de ligação às classes de fixadores compatíveis. Para aplicações com pré-carga controlada, como no caso da Categoria E, apenas as classes 8.8 e 10.9 são permitidas. Esse critério normativo estabelece a primeira variável do projeto da junta, restringindo a seleção do fixador a uma dessas duas classes.

Tabela 24 – Valores nominais de tensão de escoamento f_{yb} e de resistência última à tração f_{ub} para parafusos

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1.000

Fonte: Eurocode 3 (1993)

Considerando o equilíbrio entre desempenho estrutural e viabilidade econômica, optou-se pela classe 8.8, pois, em geral, parafusos de maior diâmetro e classe de resistência moderada apresentam custo mais competitivo do que parafusos de pequeno diâmetro com elevada resistência mecânica. Para essa classe, os valores mecânicos de referência da norma são $f_{yb} = 640,00$ Mpa e $f_{ub} = 800,00$ Mpa.

Ao consultar o estoque e o catálogo de componentes disponíveis internamente na empresa, identificou-se que o fixador mais acessível e prontamente disponível é o parafuso UNC 0.75"-10 2A, grau B7, cujas propriedades são $f_{yb} = 720,00$ Mpa e $f_{ub} = 860,00$ Mpa. Esses valores garantem margem de segurança superior à mínima exigida pela norma, sem impacto significativo no custo do projeto e mantendo alta disponibilidade para manutenção futura.

Após a definição do parafuso a ser utilizado, torna-se necessário determinar corretamente as dimensões dos furos correspondentes, com ou sem rosca. Um furo excessivamente grande pode reduzir o contato entre as roscas, diminuir a área de apoio da cabeça do parafuso na superfície e comprometer a aderência, resultando em menor capacidade de transmissão de força. Por outro lado, um furo demasiadamente estreito dificulta ou até impede o encaixe do fixador, podendo gerar deformações indesejadas durante a montagem.

Para evitar essas situações e assegurar tolerâncias dimensionais adequadas, o dimensionamento dos furos foi realizado de acordo com as normas da ASME. Com base nesses critérios, o furo sem rosca foi selecionado consultando-se a Figura 40, retirada da norma ASME B18.2.8-1, garantindo compatibilidade com o parafuso 0.75"-10 UNC-2A adotado no projeto.

TABLE 2 CLEARANCE HOLES FOR INCH FASTENERS

Nominal Screw Size	Fit Classes								
	Normal			Close			Loose		
	Nominal Drill Size	Hole Diameter		Nominal Drill Size	Hole Diameter		Nominal Drill Size	Hole Diameter	
		Min.	Max.		Min.	Max.		Min.	Max.
#0	#48	0.076	0.082	#51	0.067	0.071	3/32	0.094	0.104
#1	#43	0.089	0.095	#46	0.081	0.085	#37	0.104	0.114
#2	#38	0.102	0.108	3/32	0.094	0.098	#32	0.116	0.126
#3	#32	0.116	0.122	#36	0.106	0.110	#30	0.128	0.140
#4	#30	0.128	0.135	#31	0.120	0.124	#27	0.144	0.156
#5	5/32	0.156	0.163	9/64	0.141	0.146	11/64	0.172	0.184
#6	#18	0.170	0.177	#23	0.154	0.159	#13	0.185	0.197
#8	#9	0.196	0.203	#15	0.180	0.185	#3	0.213	0.225
#10	#2	0.221	0.228	#5	0.206	0.211	B	0.238	0.250
1/4	9/32	0.281	0.290	17/64	0.266	0.272	19/64	0.297	0.311
5/16	11/32	0.344	0.354	21/64	0.328	0.334	23/64	0.359	0.373
3/8	13/32	0.406	0.416	25/64	0.391	0.397	27/64	0.422	0.438
7/16	15/32	0.469	0.479	29/64	0.453	0.460	31/64	0.484	0.500
1/2	9/16	0.562	0.572	17/32	0.531	0.538	39/64	0.609	0.625
5/8	11/16	0.688	0.698	21/32	0.656	0.663	47/64	0.734	0.754
3/4	13/16	0.812	0.824	25/32	0.781	0.789	29/32	0.906	0.926
7/8	15/16	0.938	0.950	29/32	0.906	0.914	11/32	1.031	1.051
1	13/32	1.094	1.106	11/32	1.031	1.039	13/32	1.156	1.181
1 1/8	17/32	1.219	1.235	15/32	1.156	1.164	15/16	1.312	1.337
1 1/4	111/32	1.344	1.360	19/32	1.281	1.291	17/16	1.438	1.463
1 3/8	11/2	1.500	1.516	17/16	1.438	1.448	139/64	1.609	1.634
1 1/2	15/8	1.625	1.641	19/16	1.562	1.572	147/64	1.734	1.759

GENERAL NOTE: Dimensions are in inches.

Figura 40 – Furos de folga para parafusos do sistema imperial**Fonte: ASME B18.2.8-1 (1999)**

Para o furo sem rosca, a ASME recomenda um intervalo dimensional entre 0.812" e 0.824", resultando em um valor médio de 0.818", equivalente a 20,78 mm.

Já para o furo roscado, foi consultada a Figura 41, retirada da norma ASME B1.1.

Table 2 Limits of Size for Standard Series Threads (UN/UNR) (Cont'd)

Nominal Size and Threads/in.		Series Designation	Class	External [Note (1)]								UNR Minor Diameter, Max. [Note (6)] (Ref.)	Internal [Note (1)]						
				Major Diameter			Pitch Diameter and Functional Diameter [Note (4)]				Minor Diameter			Pitch Diameter and Functional Diameter [Note (4)]				Major Diameter, Min.	
							Max. [Note (2)]	Min. [Note (3)]	Max. [Note (2)]	Min. [Note (2)]				Tolerance [Note (5)]	Min.	Max.	Min.		Max.
				Max. [Note (2)]	Min. [Note (3)]	Max. [Note (2)]					Min. [Note (2)]		Tolerance [Note (5)]						
$\frac{11}{16}$ -20 or 0.6875-20	UN	2A	0.0013	0.6862	0.6781	...	0.6537	0.6493	0.004366	0.6267	2B	0.633	0.645	0.6550	0.6607	0.0057	0.6875		
		3A	0.0000	0.6875	0.6794	...	0.6550	0.6517	0.003300	0.6280	3B	0.6330	0.6411	0.6550	0.6593	0.0043	0.6875		
$\frac{11}{16}$ -24 or 0.6875-24	UNEF	2A	0.0012	0.6863	0.6791	...	0.6592	0.6552	0.004046	0.6367	2B	0.642	0.652	0.6604	0.6657	0.0053	0.6875		
		3A	0.0000	0.6875	0.6803	...	0.6604	0.6574	0.003000	0.6379	3B	0.6420	0.6494	0.6604	0.6643	0.0039	0.6875		
$\frac{11}{16}$ -28 or 0.6875-28	UN	2A	0.0011	0.6864	0.6799	...	0.6632	0.6594	0.003801	0.6439	2B	0.649	0.657	0.6643	0.6692	0.0049	0.6875		
		3A	0.0000	0.6875	0.6810	...	0.6643	0.6614	0.002900	0.6450	3B	0.6490	0.6551	0.6643	0.6680	0.0037	0.6875		
$\frac{11}{16}$ -32 or 0.6875-32	UN	2A	0.0011	0.6864	0.6804	...	0.6661	0.6625	0.003608	0.6492	2B	0.654	0.661	0.6672	0.6719	0.0047	0.6875		
		3A	0.0000	0.6875	0.6815	...	0.6672	0.6645	0.002700	0.6503	3B	0.6540	0.6594	0.6672	0.6707	0.0035	0.6875		
$\frac{3}{4}$ -10 or 0.7500-10	UNC	1A	0.0018	0.7482	0.7288	...	0.6832	0.6744	0.008800	0.6291	1B	0.642	0.663	0.6850	0.6965	0.0115	0.7500		
		2A	0.0018	0.7482	0.7353	0.7288	0.6832	0.6773	0.005894	0.6291	2B	0.642	0.663	0.6850	0.6927	0.0077	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7371	...	0.6850	0.6806	0.004400	0.6309	3B	0.6420	0.6545	0.6850	0.6907	0.0057	0.7500		
$\frac{3}{4}$ -12 or 0.7500-12	UN	2A	0.0017	0.7483	0.7369	...	0.6942	0.6887	0.005524	0.6491	2B	0.660	0.678	0.6959	0.7031	0.0072	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7386	...	0.6959	0.6918	0.004100	0.6508	3B	0.6600	0.6707	0.6959	0.7013	0.0054	0.7500		
$\frac{3}{4}$ -16 or 0.7500-16	UNF	1A	0.0015	0.7485	0.7343	...	0.7079	0.7004	0.007500	0.6741	1B	0.682	0.696	0.7094	0.7192	0.0098	0.7500		
		2A	0.0015	0.7485	0.7391	...	0.7079	0.7029	0.005024	0.6741	2B	0.682	0.696	0.7094	0.7159	0.0065	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7406	...	0.7094	0.7056	0.003800	0.6756	3B	0.6820	0.6909	0.7094	0.7143	0.0049	0.7500		
$\frac{3}{4}$ -20 or 0.7500-20	UNEF	2A	0.0013	0.7487	0.7406	...	0.7162	0.7118	0.004405	0.6892	2B	0.696	0.707	0.7175	0.7232	0.0057	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7419	...	0.7175	0.7142	0.003300	0.6905	3B	0.6960	0.7036	0.7175	0.7218	0.0043	0.7500		
$\frac{3}{4}$ -28 or 0.7500-28	UN	2A	0.0012	0.7488	0.7423	...	0.7256	0.7218	0.003840	0.7063	2B	0.711	0.720	0.7268	0.7318	0.0050	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7435	...	0.7268	0.7239	0.002900	0.7075	3B	0.7110	0.7176	0.7268	0.7305	0.0037	0.7500		
$\frac{3}{4}$ -32 or 0.7500-32	UN	2A	0.0011	0.7489	0.7429	...	0.7286	0.7250	0.003647	0.7117	2B	0.716	0.724	0.7297	0.7344	0.0047	0.7500		
		3A	0.0000	0.7500	0.7440	...	0.7297	0.7270	0.002700	0.7128	3B	0.7160	0.7219	0.7297	0.7333	0.0036	0.7500		
$\frac{13}{16}$ -12 or 0.8125-12	UN	2A	0.0017	0.8108	0.7994	...	0.7567	0.7511	0.005561	0.7116	2B	0.722	0.740	0.7584	0.7656	0.0072	0.8125		
		3A	0.0000	0.8125	0.8011	...	0.7584	0.7542	0.004200	0.7133	3B	0.7220	0.7329	0.7584	0.7638	0.0054	0.8125		
$\frac{13}{16}$ -16 or 0.8125-16	UN	2A	0.0015	0.8110	0.8016	...	0.7704	0.7655	0.004887	0.7366	2B	0.745	0.759	0.7719	0.7783	0.0064	0.8125		
		3A	0.0000	0.8125	0.8031	...	0.7719	0.7682	0.003700	0.7381	3B	0.7450	0.7534	0.7719	0.7767	0.0048	0.8125		

Figura 41 – Limites dimensionais para roscas da série padrão**Fonte: ASME B1.1 (1989)**

Neste caso, a norma especifica o diâmetro interno liso que deve ser usinado antes do processo de rosqueamento, garantindo a profundidade correta dos filetes sem comprometer a resistência do parafuso ou do flange. Para a rosca 0.75"-10 UNC-2B, o intervalo recomendado varia entre 0,642" e 0,663", resultando em um valor médio de 0,6525", correspondente a 16,57 mm.

Com os diâmetros dos furos já definidos, prossegue-se para a etapa de posicionamento dos fixadores e, conseqüentemente, para o desenvolvimento do design do flange. Essa etapa foi conduzida com base na Figura 42. Além das distâncias normativas, também foi considerada a necessidade de acesso das ferramentas de aperto. Por esse motivo, definiu-se que a distância entre a cabeça do parafuso e o primeiro obstáculo físico que limita o acesso, neste caso a solda, deve ser igual a 1 vez a maior largura da porca. Essa margem garante espaço suficiente para o manuseio da ferramenta e para a aplicação correta do torque de aperto durante a montagem.

Table 3.3: Minimum and maximum spacing, end and edge distances

Distances and spacings, see Figure 3.1	Minimum	Maximum ^{1) 2) 3)}		
		Structures made from steels conforming to EN 10025 except steels conforming to EN 10025-5		Structures made from steels conforming to EN 10025-5
		Steel exposed to the weather or other corrosive influences	Steel not exposed to the weather or other corrosive influences	Steel used unprotected
End distance e_1	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		The larger of $8t$ or 125 mm
Edge distance e_2	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		The larger of $8t$ or 125 mm
Distance e_3 in slotted holes	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Distance e_4 in slotted holes	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Spacing p_1	$2,2d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t_{\min}$ or 175 mm
Spacing $p_{1,0}$		The smaller of $14t$ or 200 mm		
Spacing $p_{1,i}$		The smaller of $28t$ or 400 mm		
Spacing p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t_{\min}$ or 175 mm
1) Maximum values for spacings, edge and end distances are unlimited, except in the following cases: – for compression members in order to avoid local buckling and to prevent corrosion in $\langle AC_2 \rangle$ exposed members (the limiting values are given in the table) and; $\langle AC_2 \rangle$ – for exposed tension members $\langle AC_2 \rangle$ to prevent corrosion (the limiting values are given in the table). $\langle AC_2 \rangle$ 2) The local buckling resistance of the plate in compression between the fasteners should be calculated according to EN 1993-1-1 using $0,6 p_1$ as buckling length. Local buckling between the fasteners need not to be checked if p_1/t is smaller than 9ε. The edge distance should not exceed the local buckling requirements for an outstand element in the compression members, see EN 1993-1-1. The end distance is not affected by this requirement. 3) t is the thickness of the thinner outer connected part. 4) The dimensional limits for slotted holes are given in 1.2.7 Reference Standards: Group 7. 5) For staggered rows of fasteners a minimum line spacing of $p_2 = 1,2d_0$ may be used, provided that the minimum distance, L, between any two fasteners is greater or equal than $2,4d_0$, see Figure 3.1b).				

Figura 42 – Distâncias mínimas e máximas entre fixadores, distâncias à borda e às extremidades**Fonte: Eurocode 3 (1993)**

A partir desses critérios foi então definida a geometria do flange, incluindo o posicionamento dos fixadores, os espaçamentos horizontais e verticais e as distâncias às bordas. O resultado dessa configuração pode ser observado na Figura 43.

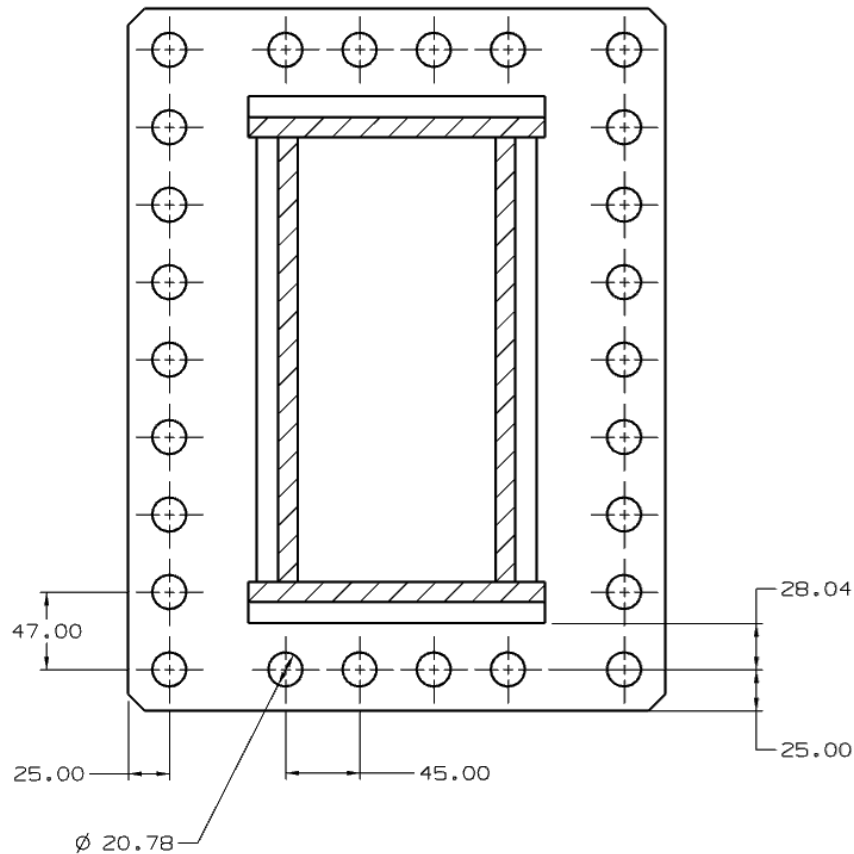


Figura 43 – Geometria do flange e posicionamento dos fixadores

Fonte: Autoria própria (2025)

Dessa forma, a única variável remanescente para definição do flange passa a ser sua espessura. A necessidade de utilizar furos roscados foi determinada para garantir a união plena entre as chapas ao longo de toda a superfície de contato, assegurando a eficiência estrutural da junta. No dimensionamento de um furo roscado, o requisito fundamental é garantir que, em condição de ruptura, a falha ocorra no parafuso e não no flange. Para isso, a área resistente das roscas internas deve ser superior à área resistente do parafuso, caso contrário, o risco de arrancamento de rosca compromete a integridade da ligação.

A profundidade mínima de engajamento das roscas foi calculada segundo o método apresentado no *Machinery's Handbook (29th Edition)*. Para a combinação de materiais adotada, obteve-se um comprimento mínimo de engajamento de 14,00 mm, garantindo que a resistência da rosca seja igual ou superior à do fixador.

Além desse requisito, outra condição de contorno importante para a definição da espessura do flange é o alongamento do parafuso decorrente da aplicação da pré-carga. Como o fixador será

submetido a elevados níveis de tração, tanto no corpo quanto na interface com a cabeça, definiu-se que o tipo de parafuso mais adequado é o de cabeça sextavada. Esse formato proporciona área resistente suficiente para suportar o torque necessário à obtenção da força de aperto especificada e elimina a necessidade de verificações adicionais quanto à integridade estrutural da cabeça.

Uma vez estabelecido o tipo de parafuso, verificou-se que o menor comprimento disponível internamente para o modelo $\frac{3}{4}$ "-10 UNC-2A é de 1". Diante disso, tornou-se necessário avaliar se o alongamento associado à pré-carga máxima pode ocorrer dentro da espessura prevista para o flange, garantindo ao mesmo tempo o atendimento ao comprimento mínimo de engajamento de rosca de 14,00 mm.

Conforme dito anteriormente, a pré-carga desempenha papel essencial no desempenho da junta aparafusada, aumentando a resistência ao cisalhamento por atrito e reduzindo o risco de deslizamento, permitindo que os parafusos trabalhem predominantemente em tração. No entanto, o valor aplicado deve permanecer abaixo do limite de escoamento do fixador. Nesse projeto, a pré-carga máxima $F_{p,C}$ foi definida conforme a Eurocode 3, que estabelece a Equação (54).

$$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s \quad [\text{kN}] \quad (54)$$

Onde:

- f_{ub} é a tensão última do fixador.
- A_s é a área resistente de tensão do fixador.

$$F_{p,C} = 0,7 * 860,00 \text{ MPa} * 181,65 \text{ mm}^2$$

$$F_{p,C} = 109,35 \text{ kN}$$

Assim, a pré-carga aplicada corresponde a aproximadamente 70% da tensão de escoamento do fixador, resultando em uma tensão equivalente $\sigma = 504,00 \text{ MPa}$ no corpo do parafuso. A deformação associada é obtida pela Lei de Hooke, apresentada na Equação (55)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (55)$$

$$\varepsilon = \frac{504,00 \text{ MPa}}{205,00 \text{ GPa}}$$

$$\varepsilon \approx 0,25\%$$

Considerando um fixador com comprimento de 1,25" (31,75 mm), essa deformação resulta em um alongamento máximo aproximado de 31,83 mm. Para furos roscados, define-se que cada flange deve possuir 16 mm de espessura, o que garante um comprimento de engajamento entre 15,75 e 15,83 mm, suficiente para evitar falha por arrancamento de rosca.

No caso de fixadores com porca aplicada sobre o mesmo flange, o comprimento mínimo necessário passa a ser:

$$L_{\text{mín.}} = 16 \text{ mm} * 2 + 16,28 \text{ mm}$$

$$L_{\text{mín.}} = 48,28 \text{ mm} \approx 1,9"$$

Desta forma, adota-se um fixador comercial com 2,0" de comprimento.

Apesar de o dimensionamento do furo roscado ter sido conduzido com base na pré-carga máxima recomendada pela Eurocode 3, esse valor não será aplicado na montagem. Vale recordar que a pré-carga máxima $F_{p,c}$ corresponde a 109,35 kN. Entretanto, ao analisar a menor área de apoio disponível, ou seja, a área de contato sob a cabeça do parafuso ilustrada na Figura 44 e igual a 294,27 mm², verifica-se que a aplicação dessa força resultaria em uma tensão de compressão $\sigma = 371,61 \text{ MPa}$.

Como o flange é fabricado em aço ASTM A36, cujo limite admissível é de 166,67 MPa, a utilização da pré-carga máxima provocaria tensões superiores à capacidade do material, conduzindo à falha por esmagamento na região de contato. Diante disso, foi realizado o cálculo inverso para a determinação da força de pré-carga aplicada $F_{p,c,a}$, conforme Equação (56).

$$F_{p,c,a} = \sigma_a * A \quad [\text{kN}] \quad (56)$$

$$F_{p,C.a} = 166,67 \text{ MPa} * 294,27 \text{ mm}^2$$

$$F_{p,C.a} = 49,05 \text{ kN}$$

Esse valor é substancialmente inferior à pré-carga máxima normativa, mas assegura a integridade do flange e, conseqüentemente, a segurança do conjunto estrutural. Assim, a pré-carga aplicada na montagem deverá ser limitada a essa força, garantindo desempenho adequado sem comprometer a resistência do componente.

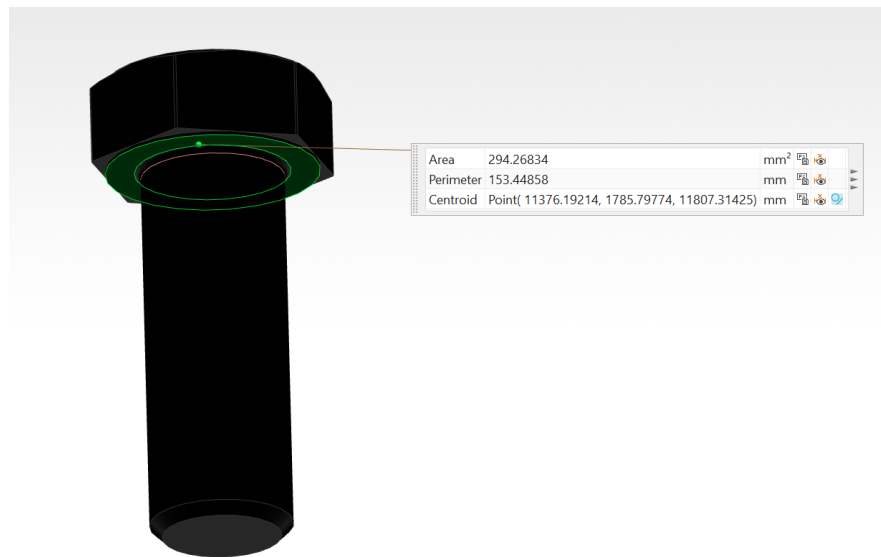


Figura 44 – Área de contato entre a cabeça do fixador com o flange
Fonte: Autoria própria (2025)

6.2.3 Verificação Contra o Escoamento do Flange e dos Fixadores

Os fixadores utilizados em estruturas metálicas podem estar sujeitos a diferentes tipos de tensões ao longo do carregamento, sendo essencial compreender cada uma delas para garantir a segurança da junta. As três tensões mais relevantes para a avaliação estrutural são a tensão de membrana, a tensão de dobra e a tensão de pico.

A tensão de membrana corresponde a uma tensão distribuída de maneira relativamente uniforme ao longo da seção transversal do parafuso. Esse mecanismo é responsável pelo encruamento e pela ruptura do material, de forma semelhante ao comportamento observado em

ensaios de tração. Por atuar em toda a seção resistente, é considerada a solicitação mais crítica para a capacidade global do fixador. Por essa razão, a norma API 16H estabelece um limite mais rigoroso de aceitabilidade para esse mecanismo de falha.

A tensão de dobra surge devido à atuação de momentos fletores que causam curvatura no parafuso ou em parte de sua seção. Diferentemente da tensão de membrana, ela pode apresentar valores localizados elevados sem necessariamente comprometer toda a seção, o que significa que exceder pontualmente o limite de escoamento não implica de imediato em ruptura. Somente em casos extremos a tensão de dobra contribui de forma decisiva para a falha, razão pela qual o critério normativo é menos restritivo quando comparado ao usado para a tensão de membrana.

A tensão de pico é gerada por concentrações pontuais, comumente associadas a descontinuidades geométricas ou ao contato direto entre superfícies. Apesar de poder apresentar valores elevados, ela se restringe a regiões muito pequenas e, na maioria das situações, não causa falha estrutural significativa. Por esse caráter altamente localizado, a API 16H não define um critério específico de aceitação para esse tipo de solicitação.

A verificação dos fixadores foi conduzida conforme a norma API 16H, que estabelece um critério específico para avaliação de parafusos submetidos a esforços combinados. Segundo o procedimento normativo, as tensões de membrana e de dobra devem atender às Equações (57) e (58).

(57)

$$S_a \leq 0,83 * S_y = 597,60 \text{ MPa}$$

(58)

$$S_b \leq 1,0 * S_y = 720,00 \text{ MPa}$$

Onde:

- S_a é a tensão de membrana.
- S_b é a tensão de dobra.
- S_y é a tensão de escoamento do parafuso.

Como a norma não apresenta um critério explícito para avaliação da tensão de cisalhamento nos fixadores, adota-se a verificação indireta por atrito, garantindo que a força de atrito gerada pela pré-carga seja superior à força de cisalhamento atuante na interface da junta, de modo a impedir a transferência direta de esforços transversais aos parafusos.

Para o flange, a avaliação contra escoamento segue o mesmo critério de tensão admissível aplicado aos demais componentes estruturais do pórtico, adotando-se um limite de 166,67 MPa para garantir sua integridade sob as condições de carregamento previstas.

Os resultados serão apresentados no Capítulo 7.

7 ANÁLISE COMPUTACIONAL

A análise computacional foi realizada no *software* SIMSOLID[®], a partir do modelo tridimensional previamente desenvolvido no Siemens NX[®]. O objetivo da simulação é validar o design proposto para os flanges e fixadores apresentados no Capítulo 6, avaliar o comportamento das soldas entre os flanges e as vigas e, adicionalmente, verificar a distribuição de tensões ao longo das vigas, de forma a comparar os resultados numéricos com os valores obtidos pelas análises analíticas apresentadas nos capítulos anteriores.

Na modelagem adotada, dentre todas as soldas presentes na estrutura, apenas as soldas de contato entre os flanges e as vigas foram incluídas na avaliação. As vigas caixão foram representadas como componentes monolíticos, sem modelagem individual dos cordões de solda entre suas chapas, pois o grande número de uniões e a complexidade geométrica tornariam o modelo computacional excessivamente pesado. Essa simplificação é tecnicamente justificada, uma vez que as soldas internas das vigas já foram dimensionadas e verificadas previamente de acordo com a norma AWS D1.1, e possuem capacidade para suportar carregamentos superiores aos previstos neste projeto.

É importante destacar que a utilização do SIMSOLID[®] tende a resultar em níveis de tensão mais elevados nas regiões centrais das vigas e menores nas interfaces, o que torna a análise conservadora tanto para a avaliação das soldas entre flanges e vigas quanto para o estudo da distribuição de tensões ao longo das vigas.

Por outro lado, as soldas de união entre os flanges e as vigas apresentam um comportamento estrutural menos previsível, pois são diretamente influenciadas pela geometria do flange, pela pré-carga aplicada aos parafusos e pelas reações de momento que se desenvolvem na região em função do porte do flange. A interação simultânea desses fatores torna o comportamento dessa ligação altamente complexo de ser avaliado por métodos puramente analíticos. Dessa forma, a simulação numérica torna-se essencial para garantir a integridade da junta, uma vez que permite considerar explicitamente os efeitos combinados dessas variáveis no desempenho das soldas.

7.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a simulação, todos os contatos entre componentes foram configurados com alta definição, a fim de representar adequadamente o comportamento físico da junta.

Na cor verde, encontram-se os contatos do tipo *separating*, configurados entre flange-flange e flange-viga, bem como os cordões de solda criados diretamente no SIMSOLID®. Esse tipo de contato impede a interpenetração das superfícies quando submetidas à compressão, mas permite a separação e o deslizamento relativo com transferência de forças por atrito, reproduzindo o comportamento real da junta aparafusada sob pré-carga. Os cordões de solda representados na mesma cor verde correspondem às conexões estruturais entre flange e viga, permitindo avaliar seu desempenho dentro do modelo numérico.

Na cor vermelha, estão representados os contatos do tipo *bonded*, aplicados entre a cabeça do parafuso ou a porca e o flange, e entre a parte roscada do parafuso e sua região de engajamento. Esse tipo de contato impede qualquer movimento relativo entre as superfícies, simulando uma ligação totalmente aderente. A utilização deste tipo de contato é essencial para representar o apoio rígido entre cabeça/porca e flange, e também para reproduzir corretamente o engajamento dos filetes da rosca durante o carregamento.

Na cor azul, são indicadas as nuvens de pontos utilizadas para a aplicação das condições de contorno. Nas vigas de cabeceira, as regiões azuis correspondem às áreas fixadas, representando a conexão com o apoio da estrutura e fornecendo as restrições necessárias para o início da simulação. Nas vigas principais, as regiões azuis identificam os pontos de aplicação das forças externas, representando as ações de peso e de inércia provenientes da carga e do *trolley*.

Todas essas regiões podem ser observadas na Figura 45 e Figura 46.

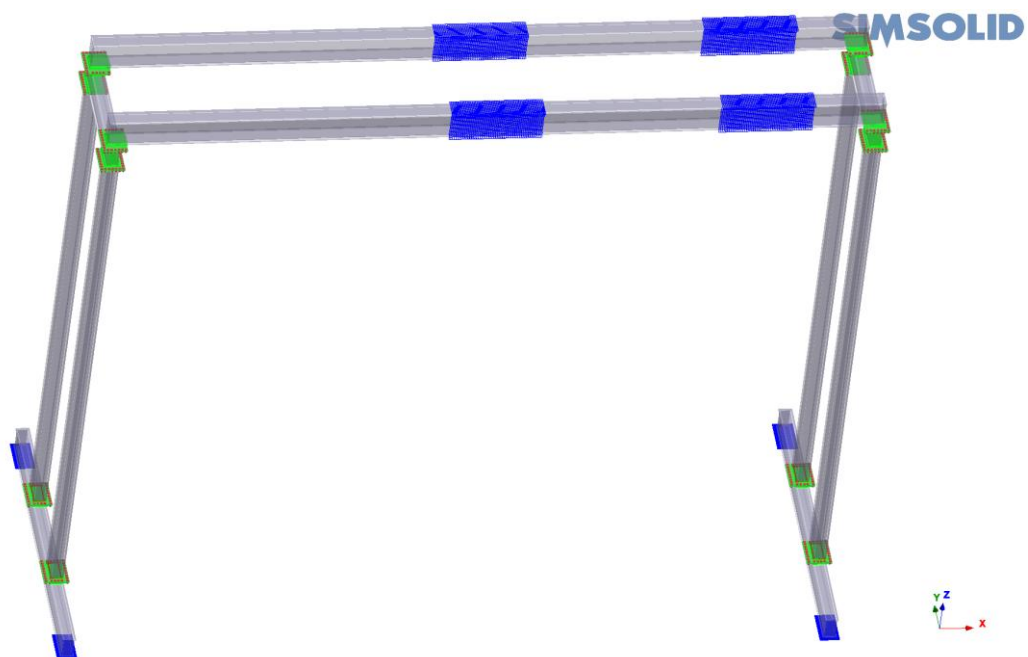


Figura 45 – Condições de contorno para simulação computacional
Fonte: Autoria própria (2025)

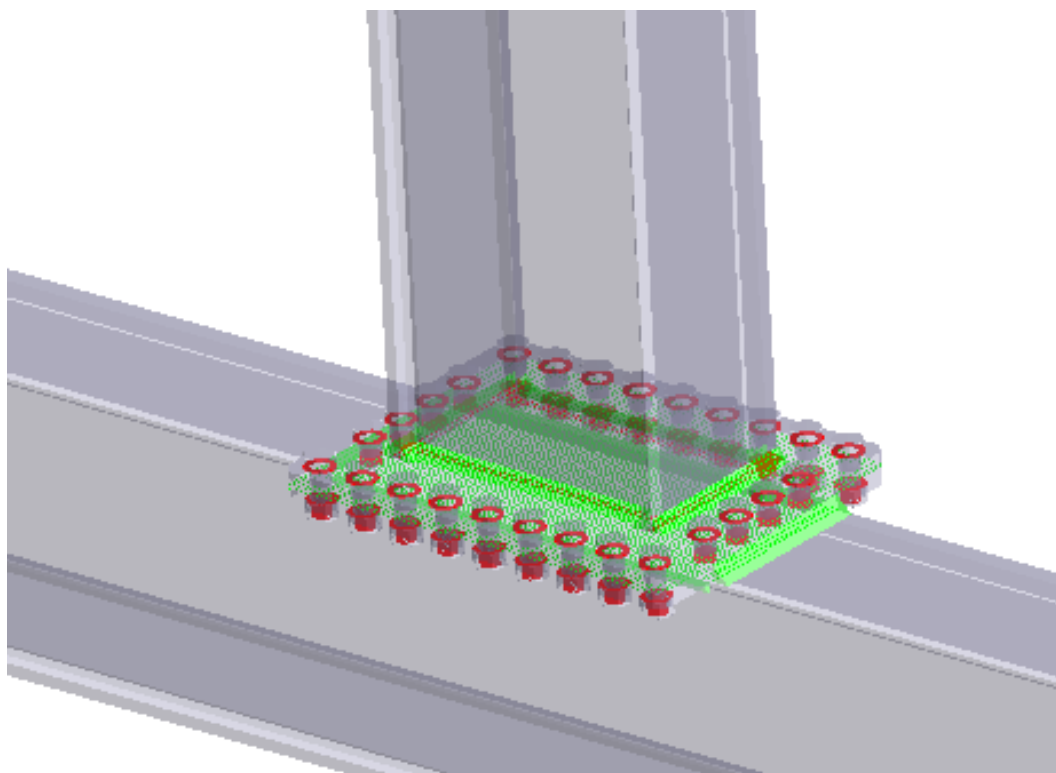


Figura 46 – Contatos tipo *separating* (verde) e *bonding* (vermelho)
Fonte: Autoria própria (2025)

7.2 FORÇAS APLICADAS

O *software* SIMSOLID® permite a criação de análises encadeadas (*linked analyses*), possibilitando que inicialmente seja realizada uma simulação apenas com a aplicação da pré-carga e, posteriormente, outras simulações sejam vinculadas ao resultado desse primeiro estágio, garantindo a representação mais realista possível dos efeitos da pré-carga no comportamento estrutural. Com essa abordagem, foram definidos três casos de carregamento.

- Caso 1 – Apenas pré-carga: No primeiro caso, apenas a força de pré-carga dos fixadores é aplicada, juntamente com as condições de contorno previamente apresentadas. Nenhuma carga externa é imposta nesta etapa, sendo este o caso base para os casos subsequentes.
- Caso 2 – Carga aplicada no centro da viga principal (com pré-carga encadeada): A partir do resultado do caso de pré-carga, foi criada uma segunda simulação com a carga posicionada no centro da viga principal. A área de aplicação apresenta extensão de 1,70 m, equivalente ao comprimento do *trolley*, garantindo maior aderência às condições reais de operação.
- Caso 3 – Carga aplicada a 1,00 m da extremidade da viga principal (com pré-carga encadeada): Da mesma forma que no Caso 2, o terceiro caso também utiliza o resultado do caso de pré-carga como condição inicial. A diferença está na posição da aplicação das cargas externas, que são impostas a 1 m da extremidade da viga principal.

As demais forças calculadas e apresentadas no Capítulo 5 também foram aplicadas aos modelos numéricos e podem ser visualizadas na Figura 47.

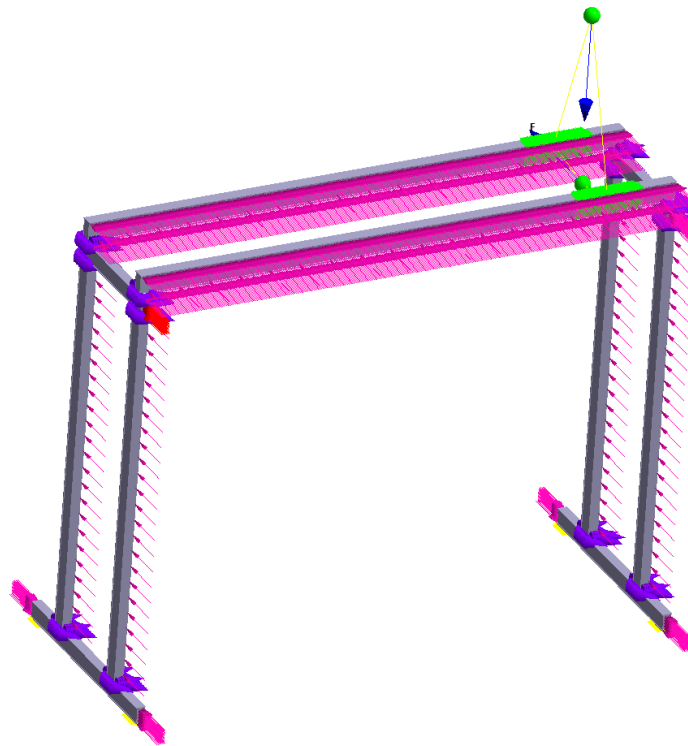


Figura 47 – Exemplo de cargas aplicadas

Fonte: Autoria própria (2025)

7.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Conforme previsto pelas análises analíticas, o posicionamento da carga no centro da viga principal resultou nos maiores valores de tensão. A distribuição geral das tensões nas vigas, com amplificação de deformação igual a 35 vezes para fins de visualização e com os flanges e fixadores ocultos, é apresentada na Figura 48 e Figura 49.

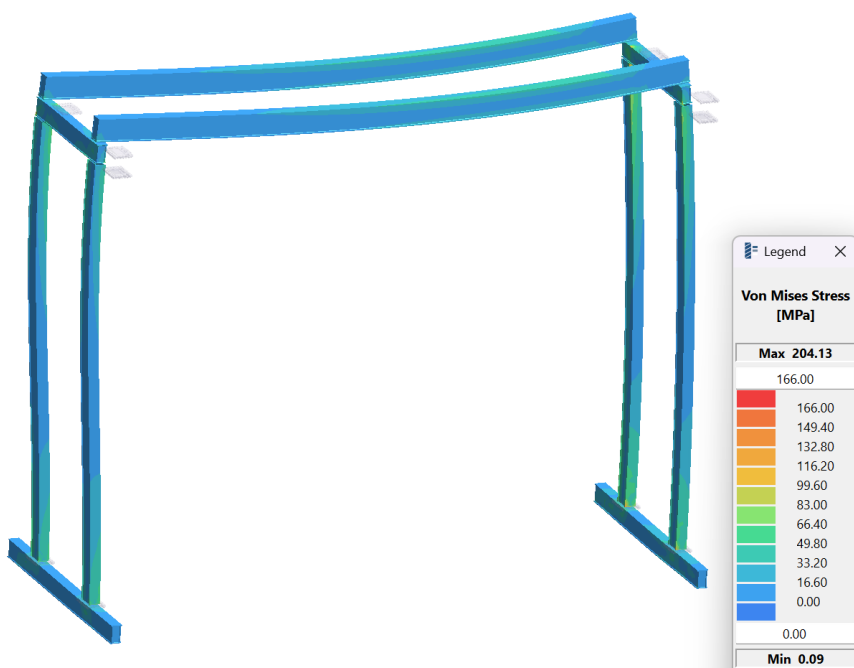


Figura 48 – Resultado de tensões nas vigas com carga posicionada à 1 m da extremidade
Fonte: Autoria própria (2025)

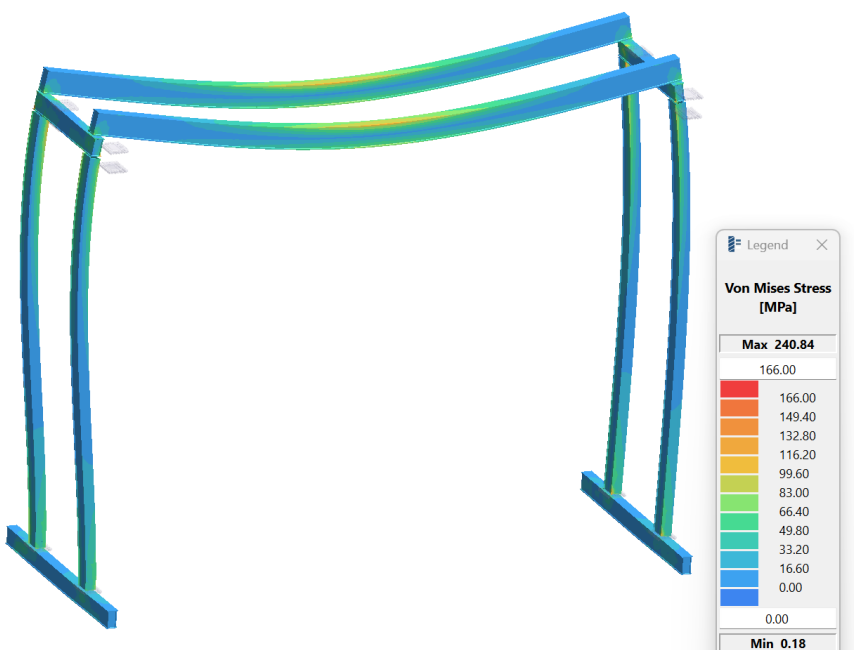


Figura 49 – Resultado de tensões nas vigas com carga posicionada no centro
Fonte: Autoria própria (2025)

7.3.1 Avaliação dos Flanges

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados, dentre os 24 flanges analisados foi selecionado aquele que apresentou a condição mais crítica para a análise detalhada. Dessa forma, a Figura 50 e Figura 52 apresentam a distribuição global das tensões de Von Mises para todos os flanges em cada um dos casos estudados. Em complemento, a Figura 51 e a Figura 53 destacam, em maior nível de detalhe, o comportamento do flange mais exigido em cada situação, permitindo uma avaliação mais precisa das regiões críticas e do desempenho estrutural local.

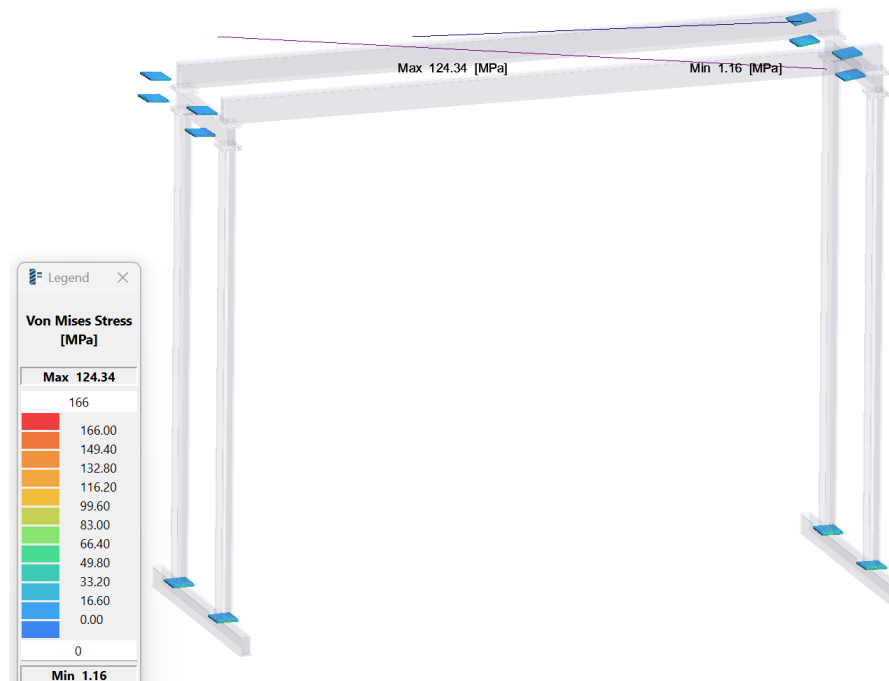


Figura 50 – Tensões nos flanges para o caso de carga a 1 m da extremidade

Fonte: Autoria própria (2025)

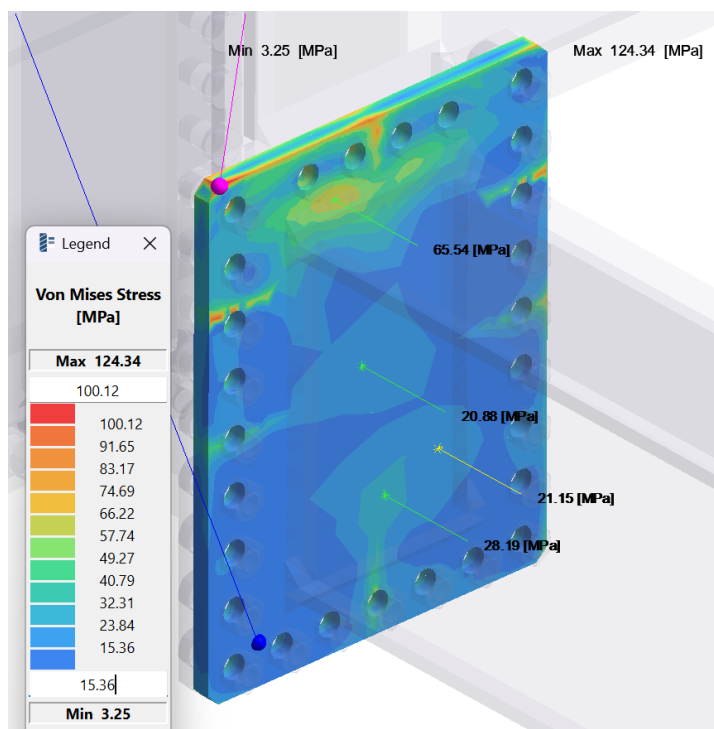


Figura 51 – Flange mais crítico para o caso de carga a 1 m da extremidade
Fonte: Autoria própria (2025)

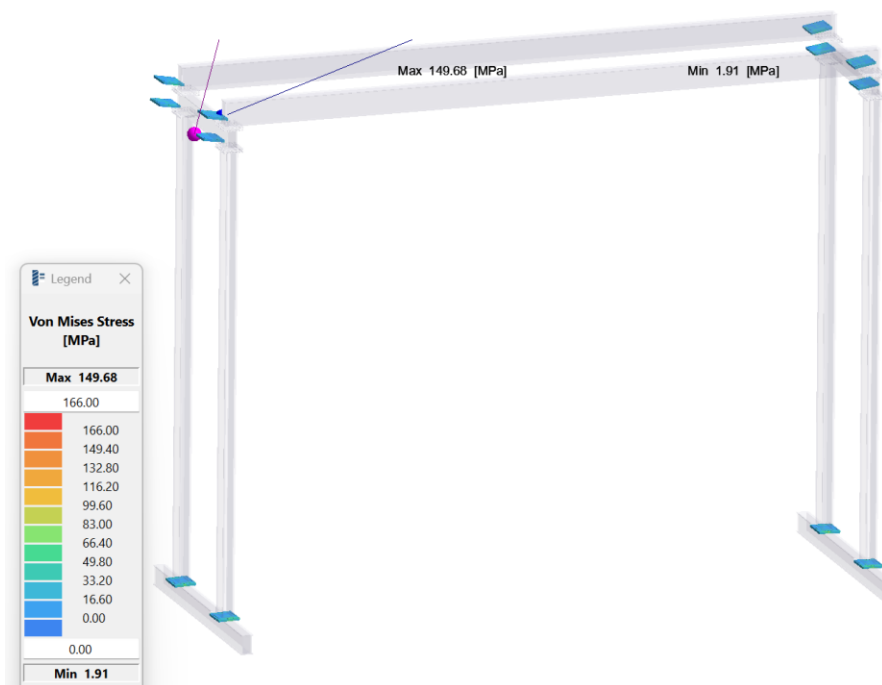


Figura 52 – Tensões nos flanges para o caso de carga centralizada
Fonte: Autoria própria (2025)

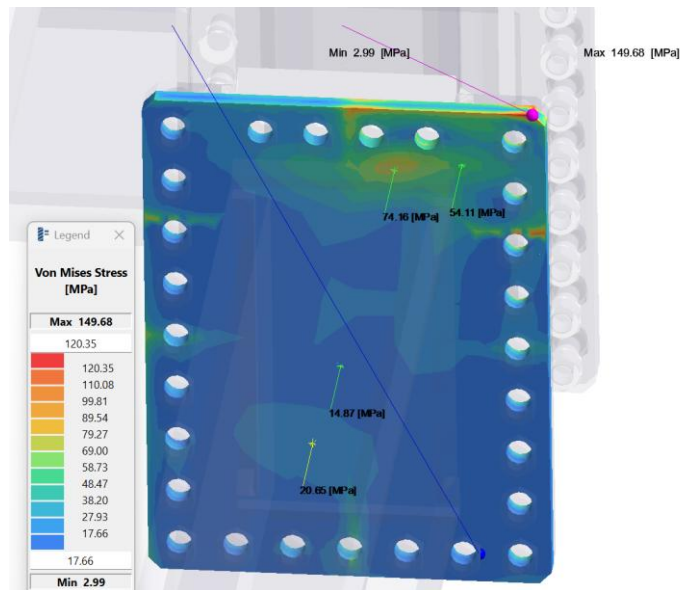


Figura 53 – Flange mais crítico para o caso de carga centralizada

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados indicam que, na análise global, os flanges são mais solicitados no caso de carregamento ao meio, apresentando tensão de pico máxima de 149,68 MPa. Entretanto, a tensão efetivamente atuante nas regiões críticas permanece próxima de 75,00 MPa, valor inferior ao limite admissível estabelecido para o material. Dessa forma, o dimensionamento do flange atende ao critério de tensão, sendo considerado aprovado para as condições de carregamento avaliadas.

Um aspecto importante identificado durante o processo de modelagem refere-se à adoção dos furos adicionais nas extremidades do flange. Embora na Figura 53 a região correspondente apresente predominantemente tensões baixas (cor azul), simulações preliminares foram realizadas sem esses furos roscados com o objetivo de simplificar o projeto, utilizando apenas conexões com parafusos e porcas. Essa configuração alternativa resultou na abertura da extremidade do flange, produzindo tensões elevadas nessa região, o que invalidou a solução. A Figura apresenta o resultado intermediário dessa simulação preliminar, onde as tensões excessivas são claramente observadas, assim como a abertura da região da conexão.

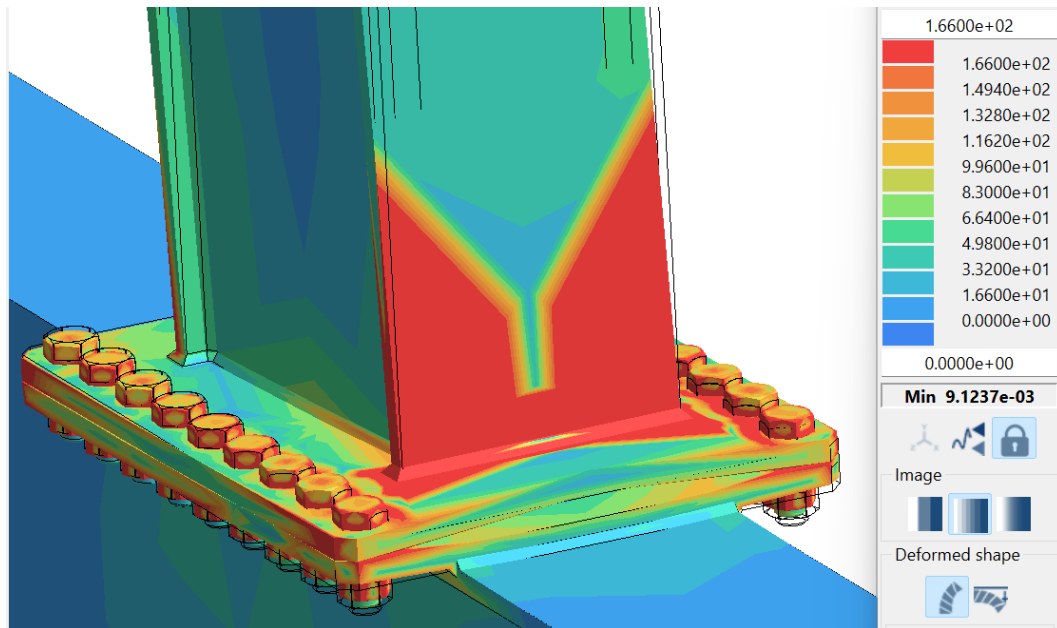


Figura 54 – Simulação intermediária sem furos roscados (com pré-carga máxima de 109,35 kN)

Fonte: Autoria própria (2025)

7.3.2 Avaliação das Soldas

Assim como no caso dos flanges, apenas a solda mais crítica foi selecionada para avaliação documentada, a fim de simplificar a apresentação dos resultados. A distribuição das tensões atuantes nessa solda é apresentada na Figura 55. A diferença de tensão máxima entre os dois casos analisados foi baixa, e em ambos os casos a tensão máxima ocorreu na ligação dos flanges entre a viga de cabeceira e viga de apoio conforme previsto no modelo analítico.

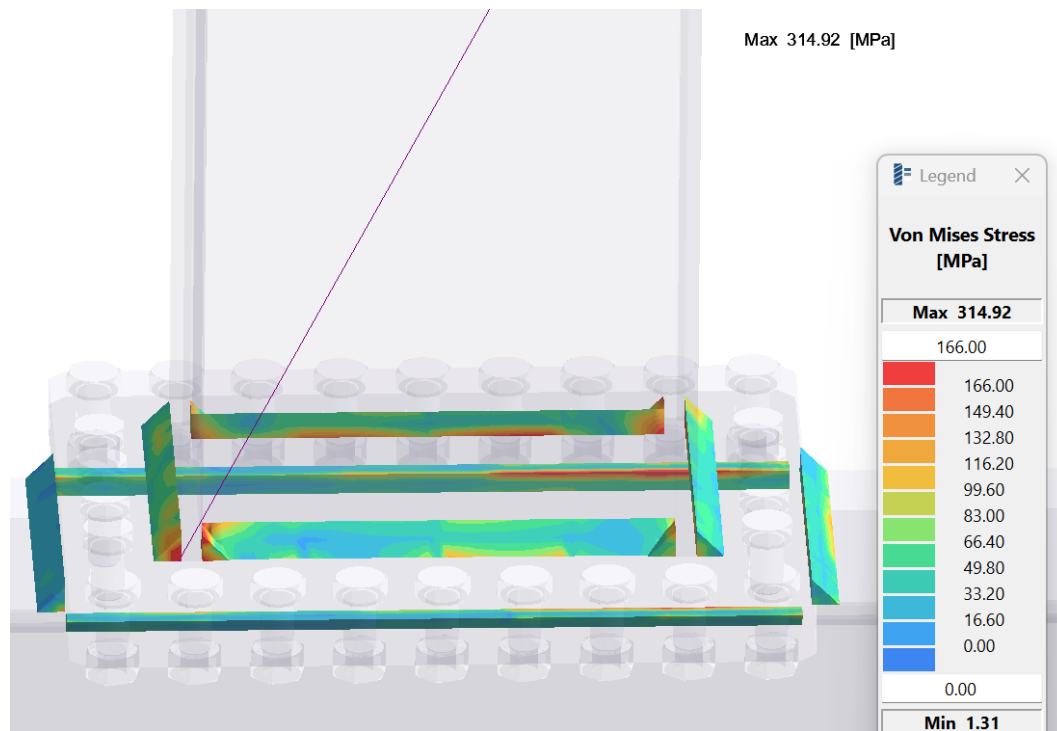


Figura 55 – Resultado de tensões na solda

Fonte: Autoria própria (2025)

Embora a legenda da Figura 55 indique um valor máximo elevado de tensão, observa-se que a maior parte do comprimento da solda apresenta tensões inferiores ao limite admissível. Observa-se que esse valor ocorre em uma região extremamente localizada, não se estendendo ao longo da espessura do componente. Para que ocorra falha estrutural, é necessário que tensões superiores à tensão admissível se desenvolvam em uma região contínua e com volume material significativo. Na forma como o resultado se apresenta, conclui-se que a tensão máxima corresponde a um ponto de singularidade numérica decorrente da presença de uma quina de 90° , que gera um pico artificial de concentração de tensões.

Considerando que as tensões efetivas ao longo da espessura da solda permanecem abaixo da tensão admissível e que as regiões de pico são extremamente localizadas, conclui-se que a solda atende aos requisitos de integridade estrutural e é aprovada no critério de tensão.

7.3.3 Avaliação dos Fixadores

Os resultados de tensões obtidos para os parafusos podem ser visualizados na Figura 56 e Figura 57.



Figura 56 – Resultado global dos fixadores
Fonte: Autoria própria (2025)

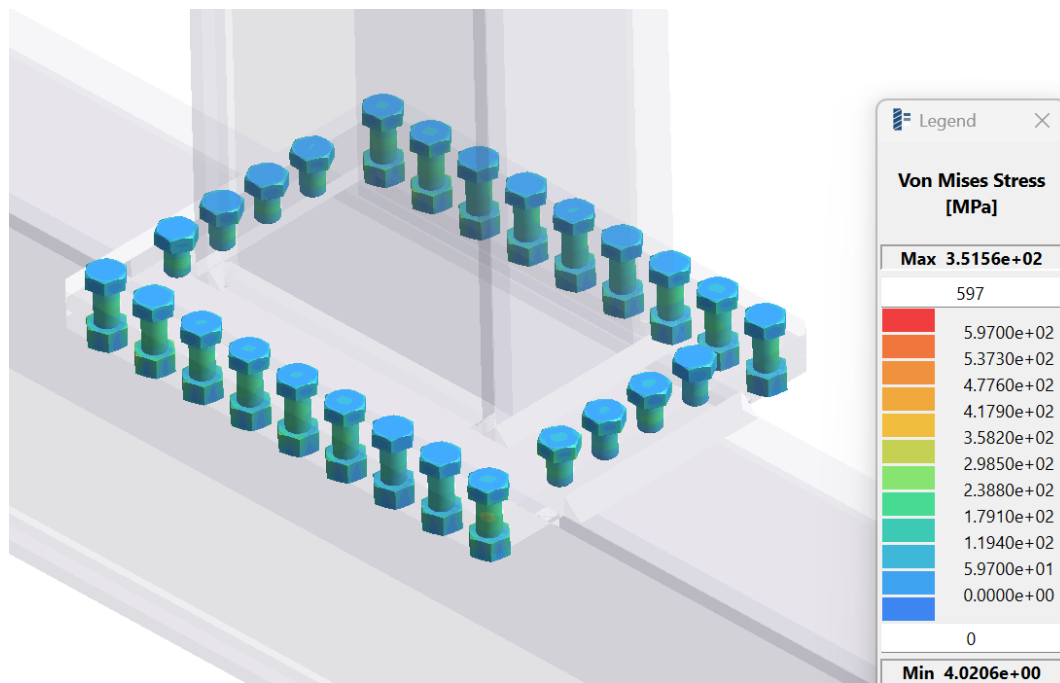


Figura 57 – Resultado de tensões na união aparafusada

Fonte: Autoria própria (2025)

Embora o *software* permita separar as tensões de membrana, de dobra e de pico, observa-se que o resultado combinado, no qual todas essas tensões são apresentadas em conjunto, permanece significativamente inferior à menor tensão admissível de 597,60 MPa determinada na Seção 6.2.3. Dessa forma, não se justifica a utilização de outros métodos específicos de avaliação de tensões para os fixadores.

Além disso, a Figura 58 analisa o deslizamento máximo presente na junta, indicando um valor de 0,025 mm. A Figura 59 analisa a abertura da conexão entre os flanges, registrando uma abertura máxima de 0,061 mm. Esses valores comprovam que o corpo do parafuso não entra em contato direto com a parede do furo, o que confirma que o fixador não é submetido ao cisalhamento direto, estando protegido por atrito, como previsto no dimensionamento.

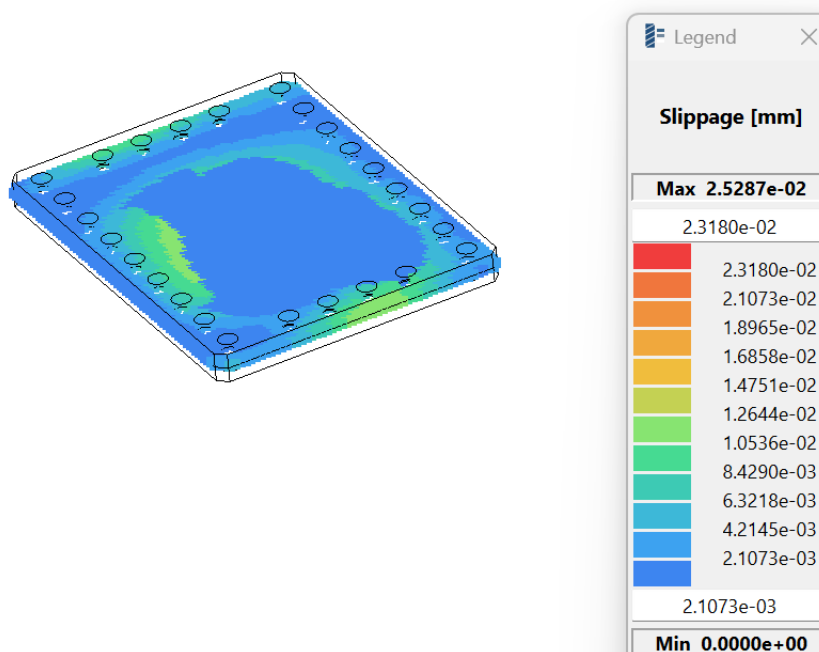


Figura 58 – Deslizamento na junta entre flanges

Fonte: Autoria própria (2025)

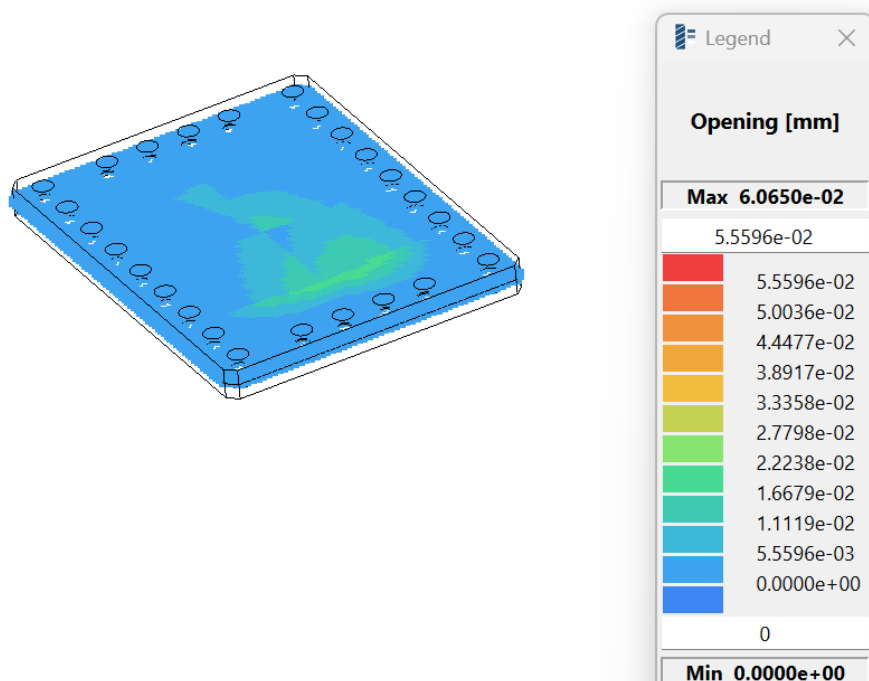


Figura 59 – Abertura na junta entre flanges

Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nesses resultados, conclui-se que o desempenho da conexão aparafusada atende plenamente aos critérios de projeto, sendo sua configuração considerada verificada e aprovada.

7.3.4 Avaliação das Vigas

7.3.4.1 Avaliação da viga principal

Os resultados obtidos para a viga principal, apresentados na Figura 60, indicam que todas as tensões permanecem abaixo do limite admissível de 166,67 MPa. Esse comportamento está alinhado com o esperado, uma vez que as simplificações adotadas no dimensionamento analítico tendem a resultar em valores maiores de tensão, conferindo caráter conservador ao cálculo teórico.

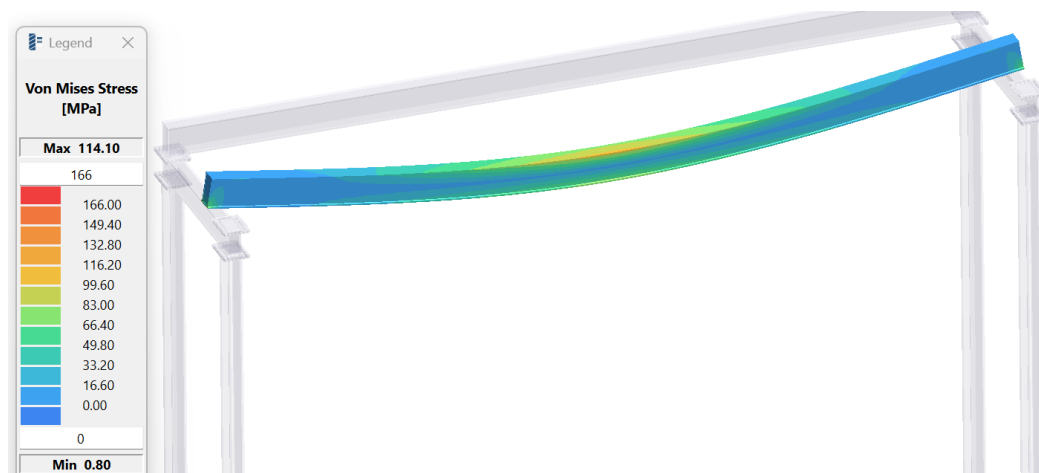


Figura 60 – Resultado das tensões na viga principal

Fonte: Autoria própria (2025)

Adicionalmente, a avaliação numérica da deflexão indicou uma flecha máxima de 20,21 mm, valor inferior à contraflecha de 28 mm adotada no projeto. Esse resultado reflete o caráter conservador do dimensionamento analítico, influenciado pelas simplificações geométricas e pelos coeficientes de majoração aplicados, que tendem a superestimar os deslocamentos previstos em cálculo. Desta forma, embora a viga principal ainda requeira contraflecha para atendimento aos requisitos normativos, observa-se que a magnitude efetivamente necessária tende a ser menor que a estimada teoricamente.



Figura 61 – Resultado da deflexão na viga principal
Fonte: Autoria própria (2025)

7.3.4.2 Avaliação da viga de fechamento

Os resultados obtidos para a viga de fechamento, apresentados na Figura 62, mostram que, embora a legenda da simulação indique tensões muito elevadas, observa-se que esses valores estão concentrados apenas nas quinas, caracterizando picos numéricos decorrentes de descontinuidades abruptas. A avaliação da região efetivamente solicitada mostra que as tensões reais na viga de fechamento permanecem entre 0,00 MPa a 70,00 MPa, portanto muito abaixo da tensão admissível estabelecida para o material. Dessa forma, a integridade estrutural da viga de fechamento é confirmada, não havendo indicação de risco de escoamento para as condições de carregamento analisadas.

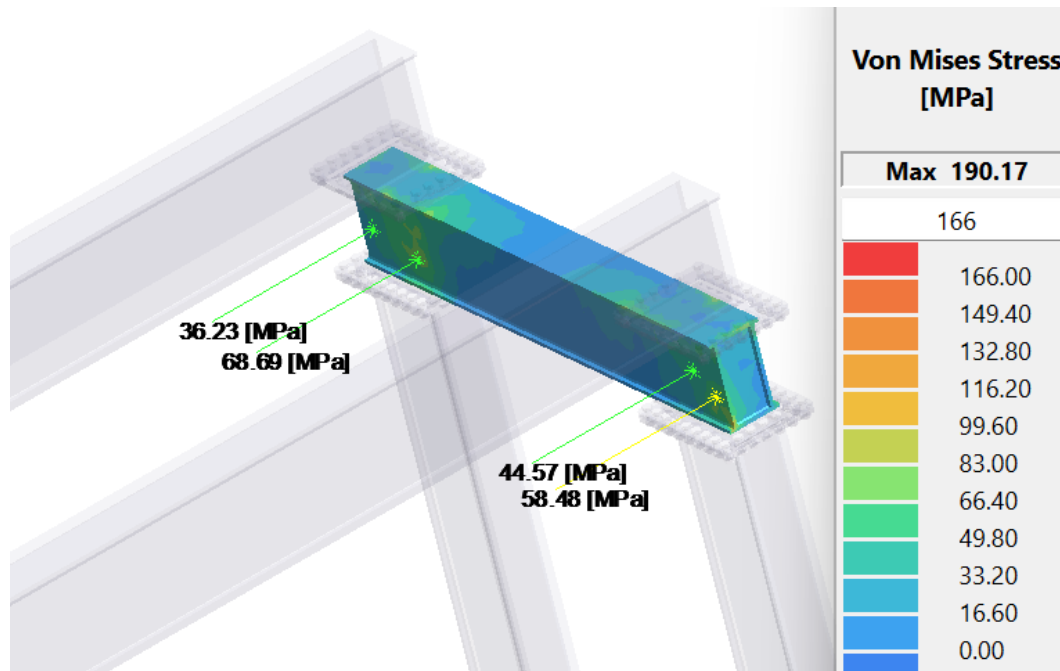


Figura 62 – Resultado das tensões na viga de fechamento

Fonte: Autoria própria (2025)

7.3.4.3 Avaliação da viga de apoio

Apesar do valor elevado de tensão máxima indicado na simulação, observa-se que esse pico ocorre apenas em regiões de quinas e descontinuidades geométricas, caracterizando uma concentração numérica localizada. A análise da área efetivamente solicitada demonstra que a tensão máxima real no componente é de 75,27 MPa, conforme apresentado na Figura 63, valor significativamente inferior ao limite admissível do material. Assim, confirma-se que o componente atende aos critérios de projeto e o design é considerado aprovado.

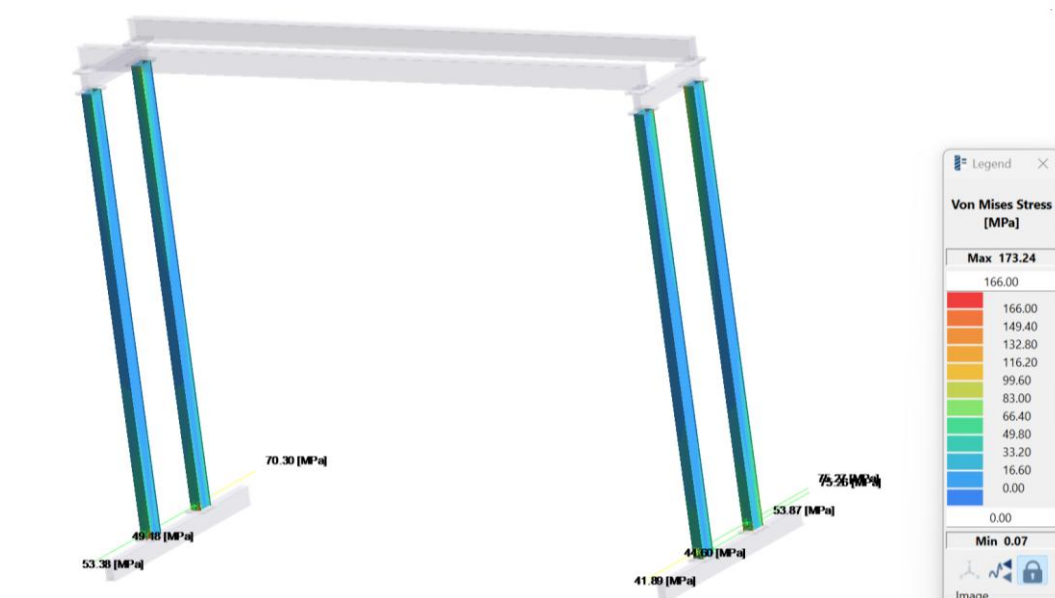


Figura 63 – Resultado das tensões na viga de apoio

Fonte: Autoria própria (2025)

7.3.4.4 Avaliação da viga de cabeceira

O resultado apresentado na Figura 64 evidencia que o dimensionamento foi realizado com margem de segurança significativa, indicando tensões muito inferiores aos limites admissíveis do material. Dessa forma, confirma-se que o componente apresenta desempenho estrutural satisfatório para as condições de carregamento analisadas e o design é considerado aprovado.

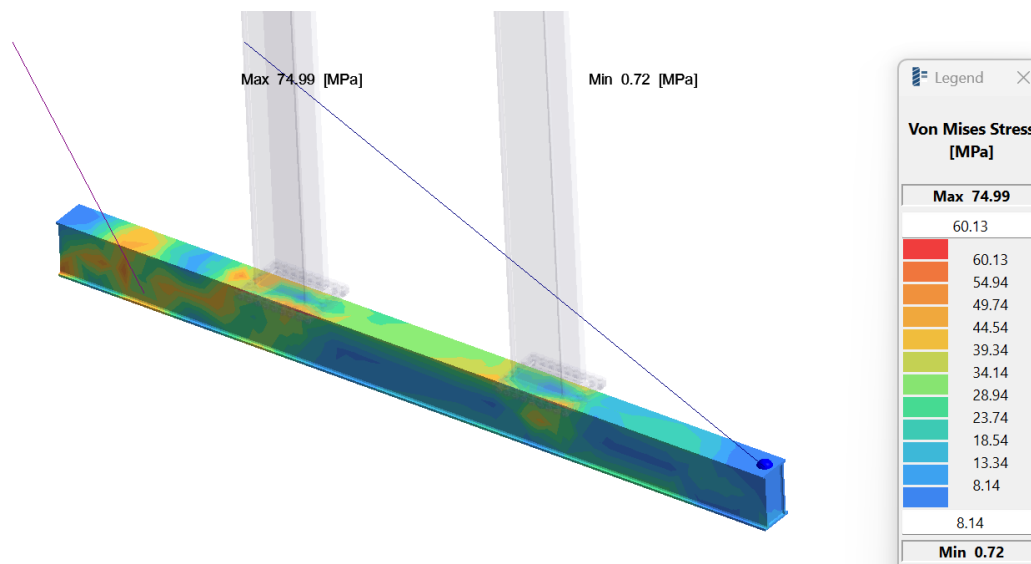


Figura 64 – Resultado das tensões na viga de cabeceira
Fonte: Autoria própria (2025)

8 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto de dimensionamento estrutural de pórtico rolante com capacidade de içar cargas de até 10 toneladas representa não apenas um marco para a infraestrutura da empresa, mas também um fortalecimento da capacidade produtiva nacional, onde grande parte dos equipamentos industriais de alta responsabilidade ainda depende de importações.

Investimentos como este, não somente otimizam operações e ampliam a autonomia da empresa, como também contribuem para a construção de um parque industrial mais moderno, competitivo e preparado para atender à crescente demanda do setor de óleo e gás. A concepção e validação estrutural de soluções robustas dentro do próprio país reafirmam a importância da engenharia brasileira como agente ativo no desenvolvimento tecnológico.

Pode-se afirmar que, a partir do dimensionamento desenvolvido, o pórtico atenderá aos objetivos previstos no escopo do projeto, como:

- Garantir a capacidade de içamento necessária para a operação industrial.
- Manter condições adequadas de rigidez durante o uso.
- Oferecer condição estrutural capaz de suportar operação contínua de forma segura e confiável.
- Contribuir para um processo de trabalho mais eficiente, com maior previsibilidade operacional e menor dependência de recursos externos.
- Proporcionar uma infraestrutura compatível com as demandas da empresa, favorecendo a expansão produtiva e o aperfeiçoamento das atividades de montagem.

No que diz respeito às metodologias de análise, a comparação entre os resultados analíticos e computacionais confirma a solidez do dimensionamento. Os valores calculados analiticamente apresentaram-se mais conservadores, conforme esperado, dada a aplicação de coeficientes de majoração ao longo de todas as etapas de cálculo. Soma-se a isso o fato de que, no modelo analítico, todas as vigas foram representadas considerando sua seção transversal máxima, enquanto no modelo computacional cada componente foi modelado com sua geometria real. Essa diferença metodológica explica a disparidade entre os resultados e evidencia que o método analítico tende a superestimar esforços e deslocamentos, ao passo que a análise computacional captura de

forma mais precisa o comportamento estrutural. Apesar dessas distinções, ambos os métodos convergem qualitativamente, confirmando que o pórtico apresenta desempenho compatível com os requisitos operacionais e atende aos critérios de segurança definidos no projeto.

Por fim, embora a adoção do pórtico dependa de uma decisão estratégica da empresa e de avaliações complementares para embasar sua implementação, os resultados apresentados indicam que a solução desenvolvida possui elevado potencial de retorno industrial. Além do benefício operacional direto, a adoção do equipamento pode gerar ganhos intangíveis associados ao aumento da autonomia logística, à redução da dependência de recursos externos e ao incremento da produtividade no processo de montagem. Assim, conclui-se que a proposta configura uma solução tecnicamente consistente e promissora, cuja viabilidade econômica tende a se consolidar à medida que a empresa avança em sua trajetória de expansão produtiva.

8.1 SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS

O presente trabalho concentrou-se no dimensionamento estrutural do pórtico, estabelecendo os fundamentos necessários para sua aplicação em ambiente industrial. No entanto, para que a solução proposta avance do campo conceitual para sua implementação prática, são requeridas análises complementares que não fazem parte do escopo deste estudo. A continuidade do projeto envolve aprofundar aspectos técnicos, econômicos e operacionais, de modo a consolidar o equipamento como alternativa viável, segura e competitiva para a empresa.

Nesse contexto, recomenda-se que trabalhos futuros considerem os seguintes desdobramentos:

- Selecionar e especificar os componentes do pórtico, como rodas, motores, redutores e sistemas de freio, além de avaliar a adoção de sensores para monitoramento estrutural, possibilitando o acompanhamento de tensões, vibrações e desgaste ao longo do tempo.
- Refinar o dimensionamento estrutural por meio da exploração de alternativas geométricas, como variação do formato geral do pórtico, alteração da seção transversal das vigas e redistribuição de espessuras nas regiões de maior solicitação, além de incluir verificações adicionais como análise de fadiga e avaliação do comportamento sob carregamentos cíclicos.

- Desenvolver uma análise de custos e de viabilidade econômica, com o objetivo de embasar a tomada de decisão e permitir comparação com alternativas comerciais disponíveis no mercado.
- Elaborar procedimentos de operação segura e capacitação de operadores, alinhados à NR-11 e às boas práticas industriais, reduzindo riscos e garantindo padronização no uso do equipamento.
- Definir diretrizes para manutenção preventiva e corretiva, incluindo planos de inspeção periódica e registros de desempenho, de forma a prolongar a vida útil da estrutura e minimizar paradas não programadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – Encarte de Consolidação da Produção – 2024**. Rio de Janeiro: ANP, dez. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2024/dezembro.pdf/view>. Acesso em: 16 jun. 2025.

AICRANE. **Gantry Crane Structure**. 2024. Disponível em: <https://aicraneliftingsolution.com/gantry-cranes/gantry-crane-structure/amp/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Spec 16H – Specification for Hydraulic Actuators for Use with Subsea Wellhead Surface Control Equipment**. Washington, D.C.: API, 2017.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Spec 17D – Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment**. Washington, D.C.: API, 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API TR 17TR13 – Flexible Pipe Integrity Management**. Washington, D.C.: API, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B18.2.8-1 – Nuts for General Applications**. New York: ASME, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B1.1 – Unified Inch Screw Threads (UN and UNR Thread Form)**. New York: ASME, 1989.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel**. Miami: AWS, 2020.

ARCELORMITTAL. **Catálogo Técnico: Chapas/Tiras/Blanks/Rolos**. ago. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8400-1:2019 – Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Parte 1: Classificação e cargas sobre as estruturas e mecanismos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8400-2:2019 – Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade.** Rio de Janeiro, 2019

BSI. ***BS EN ISO 13628-1 – Oil and Gas Industries Including Low Carbon Energy — Design and Operation of Subsea Production Systems. Part 1: General requirements and recommendations.*** London: British Standards Institution, 2025.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley.** 10ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

CSM PONTES ROLANTES. **Pórticos Rolantes.** Disponível em: <https://www.csmpontesrolantes.com.br/porticosrolantes>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. ***How Much Petroleum Does The United States Import and Export?*** EIA, 2024. Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=709&t=6>. Acesso em: 16 jun. 2025.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – IISD. ***Brazil at a Crossroads: Rethinking Petrobras Oil and Gas Expansion.*** IISD, jun. 2025. Disponível em: <https://www.iisd.org/system/files/2025-06/brazil-petrobras-oil-gas-expansion.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION - ITA. ***Energy Resource Guide: Brazil – Oil and Gas.*** Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, 2023. Disponível em: <https://www.trade.gov/energy-resource-guide-brazil-oil-and-gas>. Acesso em: 16 jun. 2025.

IW8 INDÚSTRIA, COMÉRCIO E REPRESENTAÇÃO COMERCIAL LTDA. **Pórtico 1 Tonelada Monoviga para Talhas [código 19040].** Brusque, SC: IW8, [s.d.]. Disponível em: <https://www.iw8.com.br/produto/portico-1-tonelada-monoviga-para-talhas.html>. Acesso em: 11 set. 2025.

JUSTDIAL. ***Double Girder Overhead Crane.*** Disponível em: <https://images.jdmagicbox.com/rep/b2b/double-girder-overhead-crane/double-girder-overhead-crane-4.jpg>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MAZZELLA COMPANIES. *What is a Gantry Crane? Different Types and Design*. ago. 2022. Disponível em: <https://www.mazzellacompanies.com/learning-center/gantry-cranes-different-types-design/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MENDES, André Pompeo do Amaral; ROMEIRO, Rodrigo Antonio Parra; COSTA, Ricardo da Cunha. **Mercado e Aspectos Técnicos dos Sistemas Submarinos de Produção de Petróleo e Gás Natural**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, set. 2012. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1526/2/A%20set.35_Mercado%20e%20aspectos%20t%c3%a9cnicos%20dos%20sistemas_P.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

MOVISERVI. **Pórtico Dupla Viga**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://moviservi.com.br/catalogo/portico-dupla-viga/>. Acesso em: 7 set. 2025.

NASDAQ. *Petrobras Offshore Fields Deploy Baker Hughes Completions Tech*. Nasdaq, abr. 2024. Disponível em: <https://www.nasdaq.com/articles/petrobras-offshore-fields-deploy-baker-hughes-completions-tech>. Acesso em: 16 jun. 2025.

O GLOBO. **Árvore de Natal Molhada: A Tecnologia de 100 Toneladas do Pré-Sal que Virou Produto de Exportação**. O Globo, 07 ago. 2023. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/negocios/noticia/2023/08/07/arvore-de-natal-molhada-a-tecnologia-de-100-toneladas-do-pre-sal-que-virou-produto-de-exportacao.ghtml> Acesso em: 05 jul. 2025.

OILFIELD MANIA. **Vertical Subsea Tree**. Oilfield Mania, 06 ago. 2016. Disponível em: [Vertical subsea tree | Oilfield Mania](#). Acesso em: 05 jul. 2025.

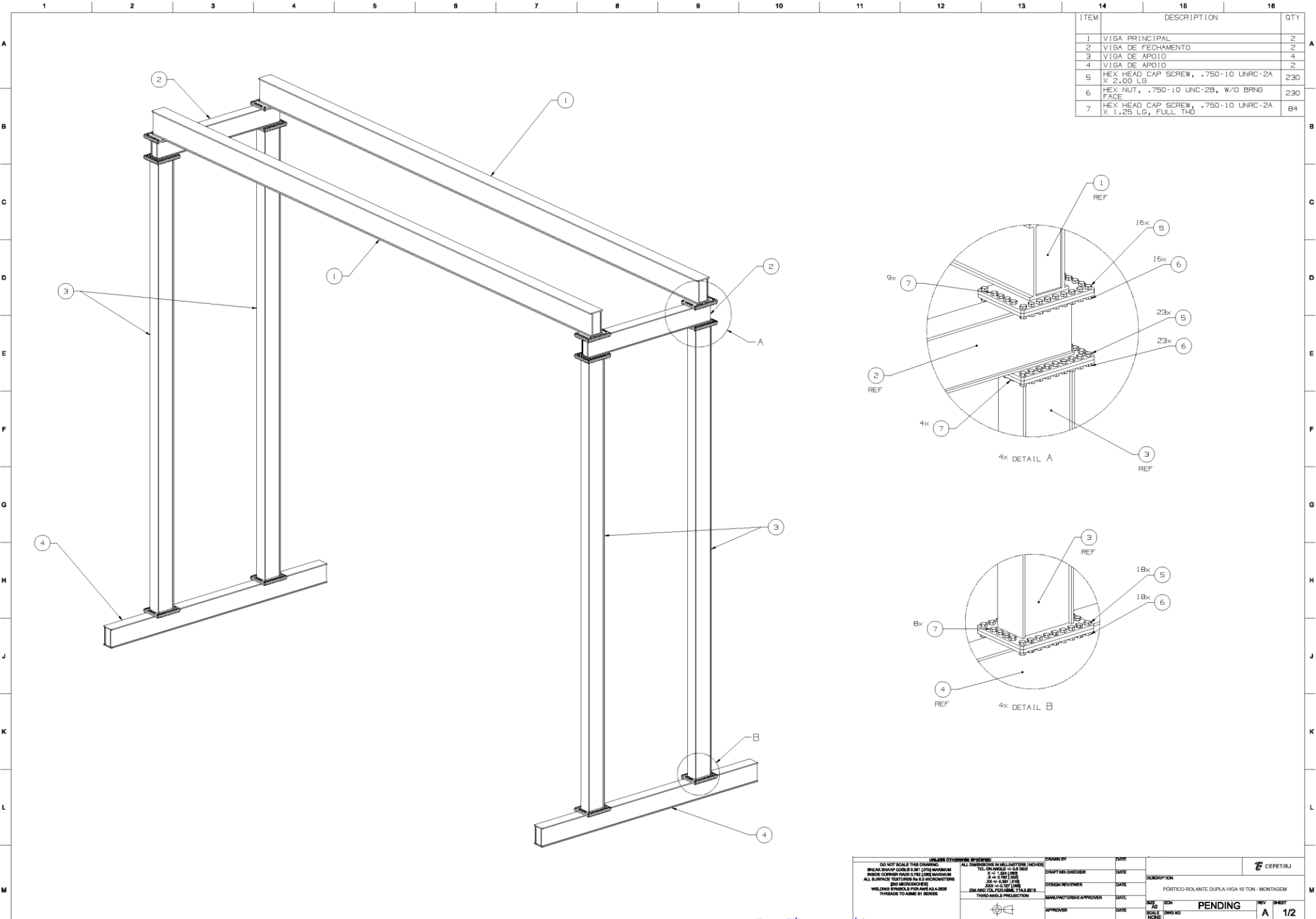
PETROBRAS. **Petrobras Inicia Implantação de Tecnologia Inédita de Separação de Gás Rico em CO₂ no Leito Marinho**. Agência Petrobras, fev. 2024. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/inovacao/petrobras-inicia-implantacao-de-tecnologia-inedita-de-separacao-de-gas-rico-em-co2-no-leito-marinho>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SEIF, M.; SCHAFER, B. **Design of Locally Slender Structural Steel Columns**. Journal of Structural Engineering, Reston, v. 140, n. 4, 2014. Disponível em: [\(PDF\) Design of Locally Slender Structural Steel Columns](#). Acesso em: 02 nov. 2025.

TRILHOS DE TREM. **Trilhos Padrão Americano**. 2023. Disponível em: <https://trilhosdetrem.com/trilhos-perfil-americano/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

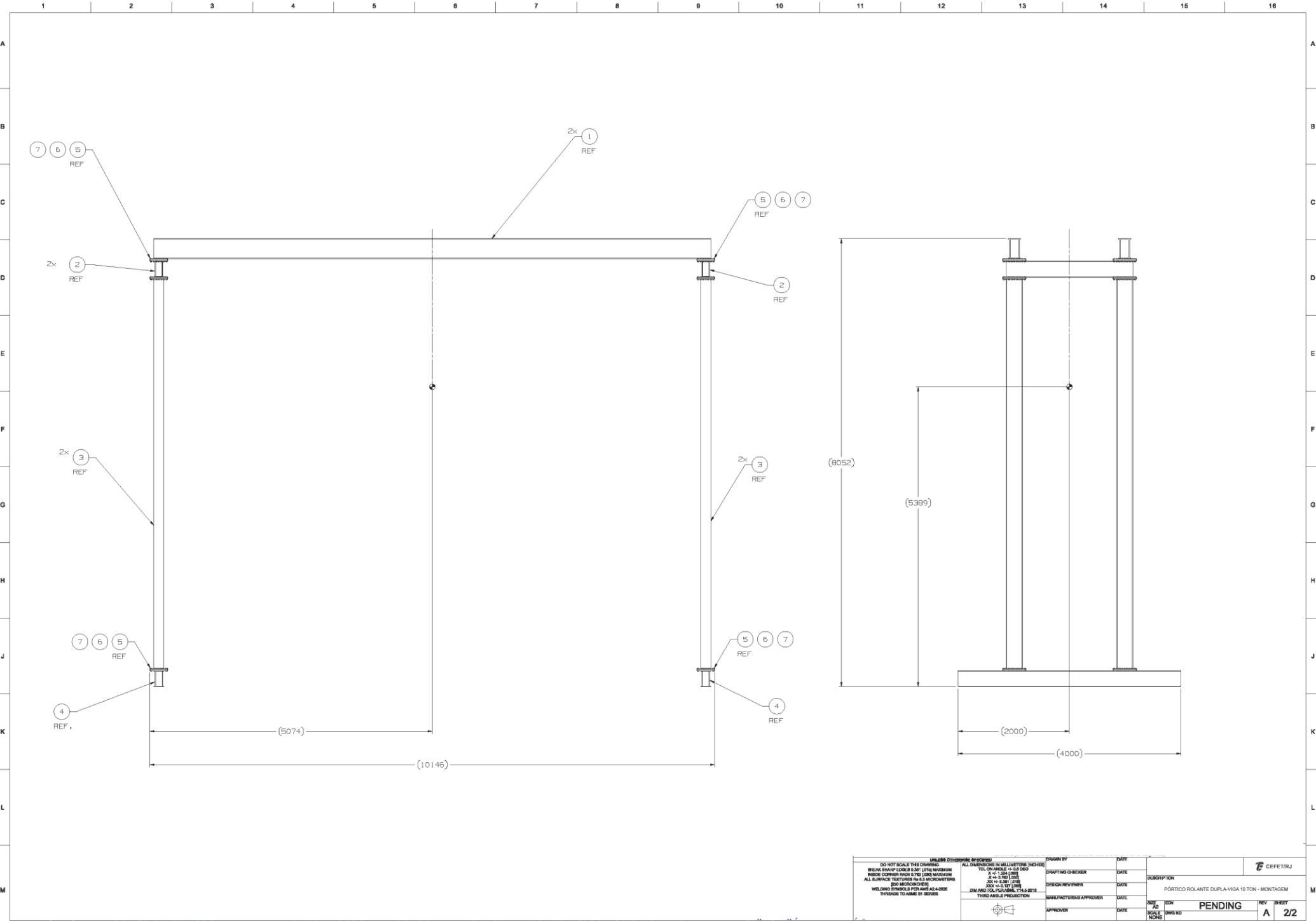
YOU SHOULD KNOW OCEAN ENGINEERING. *Horizontal and Vertical Christmas Tree*. fev. 2016. Disponível em:
<https://youshouldknowoceanengineering.wordpress.com/2016/02/06/horizontal-and-vertical-christmas-tree/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS

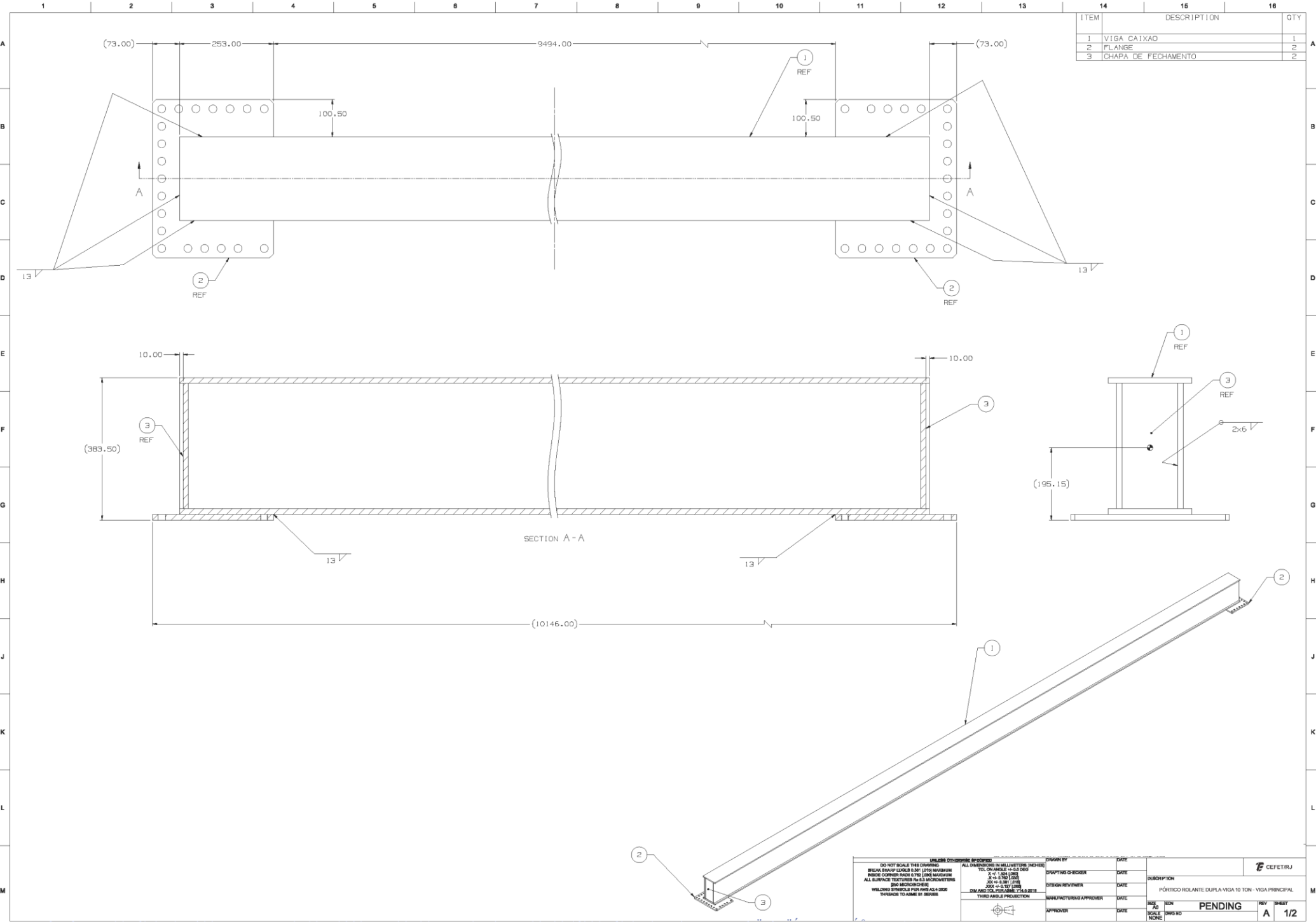


ITEM	DESCRIPTION	QTY
1	VIGA PRINCIPAL	2
2	VIGA DE FECHAMENTO	2
3	VIGA DE APOIO	4
4	VIGA DE APOIO	2
5	HEX HEAD CAP SCREW, .750-10 UNRC-2A X 2.00 LG	230
6	HEX NUT, .750-10 UNC-2B, W/O BRNG FACE	230
7	HEX HEAD CAP SCREW, .750-10 UNRC-2A X 1.25 LG, FULL THD	84

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DO NOT SCALE THIS DRAWING BREAK SHOWN EXCEPT 1/8" (2mm) MINIMUM RADIUS CORNER RADIUS 0.75" (19mm) MINIMUM ALL SURFACE TEXTURES 16 MICRONS (0.4 MICRONS) WELDING SYMBOLS FOR ANGLES AND JOINTS THREADS TO ASME B1 SERIES		ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS (INCHES) TOL. ON ANGLES 1/4-1/2 INCHES 1/4-1/2 INCHES 1/2-1 INCHES 1-2 INCHES 2-4 INCHES 4-6 INCHES 6-10 INCHES 10-16 INCHES 16-25 INCHES 25-40 INCHES 40-60 INCHES 60-100 INCHES 100-150 INCHES 150-200 INCHES 200-250 INCHES 250-300 INCHES 300-400 INCHES 400-500 INCHES 500-600 INCHES 600-800 INCHES 800-1000 INCHES 1000-1500 INCHES 1500-2000 INCHES 2000-2500 INCHES 2500-3000 INCHES 3000-4000 INCHES 4000-5000 INCHES 5000-6000 INCHES 6000-8000 INCHES 8000-10000 INCHES 10000-15000 INCHES 15000-20000 INCHES 20000-25000 INCHES 25000-30000 INCHES 30000-40000 INCHES 40000-50000 INCHES 50000-60000 INCHES 60000-80000 INCHES 80000-100000 INCHES 100000-150000 INCHES 150000-200000 INCHES 200000-250000 INCHES 250000-300000 INCHES 300000-400000 INCHES 400000-500000 INCHES 500000-600000 INCHES 600000-800000 INCHES 800000-1000000 INCHES 1000000-1500000 INCHES 1500000-2000000 INCHES 2000000-2500000 INCHES 2500000-3000000 INCHES 3000000-4000000 INCHES 4000000-5000000 INCHES 5000000-6000000 INCHES 6000000-8000000 INCHES 8000000-10000000 INCHES 10000000-15000000 INCHES 15000000-20000000 INCHES 20000000-25000000 INCHES 25000000-30000000 INCHES 30000000-40000000 INCHES 40000000-50000000 INCHES 50000000-60000000 INCHES 60000000-80000000 INCHES 80000000-100000000 INCHES 100000000-150000000 INCHES 150000000-200000000 INCHES 200000000-250000000 INCHES 250000000-300000000 INCHES 300000000-400000000 INCHES 400000000-500000000 INCHES 500000000-600000000 INCHES 600000000-800000000 INCHES 800000000-1000000000 INCHES 1000000000-1500000000 INCHES 1500000000-2000000000 INCHES 2000000000-2500000000 INCHES 2500000000-3000000000 INCHES 3000000000-4000000000 INCHES 4000000000-5000000000 INCHES 5000000000-6000000000 INCHES 6000000000-8000000000 INCHES 8000000000-10000000000 INCHES 10000000000-15000000000 INCHES 15000000000-20000000000 INCHES 20000000000-25000000000 INCHES 25000000000-30000000000 INCHES 30000000000-40000000000 INCHES 40000000000-50000000000 INCHES 50000000000-60000000000 INCHES 60000000000-80000000000 INCHES 80000000000-100000000000 INCHES 100000000000-150000000000 INCHES 150000000000-200000000000 INCHES 200000000000-250000000000 INCHES 250000000000-300000000000 INCHES 300000000000-400000000000 INCHES 400000000000-500000000000 INCHES 500000000000-600000000000 INCHES 600000000000-800000000000 INCHES 800000000000-1000000000000 INCHES 1000000000000-1500000000000 INCHES 1500000000000-2000000000000 INCHES 2000000000000-2500000000000 INCHES 2500000000000-3000000000000 INCHES 3000000000000-4000000000000 INCHES 4000000000000-5000000000000 INCHES 5000000000000-6000000000000 INCHES 6000000000000-8000000000000 INCHES 8000000000000-10000000000000 INCHES 10000000000000-15000000000000 INCHES 15000000000000-20000000000000 INCHES 20000000000000-25000000000000 INCHES 25000000000000-30000000000000 INCHES 30000000000000-40000000000000 INCHES 40000000000000-50000000000000 INCHES 50000000000000-60000000000000 INCHES 60000000000000-80000000000000 INCHES 80000000000000-100000000000000 INCHES 100000000000000-150000000000000 INCHES 150000000000000-200000000000000 INCHES 200000000000000-250000000000000 INCHES 250000000000000-300000000000000 INCHES 300000000000000-400000000000000 INCHES 400000000000000-500000000000000 INCHES 500000000000000-600000000000000 INCHES 600000000000000-800000000000000 INCHES 800000000000000-1000000000000000 INCHES 1000000000000000-1500000000000000 INCHES 1500000000000000-2000000000000000 INCHES 2000000000000000-2500000000000000 INCHES 2500000000000000-3000000000000000 INCHES 3000000000000000-4000000000000000 INCHES 4000000000000000-5000000000000000 INCHES 5000000000000000-6000000000000000 INCHES 6000000000000000-8000000000000000 INCHES 8000000000000000-10000000000000000 INCHES 10000000000000000-15000000000000000 INCHES 15000000000000000-20000000000000000 INCHES 20000000000000000-25000000000000000 INCHES 25000000000000000-30000000000000000 INCHES 30000000000000000-40000000000000000 INCHES 40000000000000000-50000000000000000 INCHES 50000000000000000-60000000000000000 INCHES 60000000000000000-80000000000000000 INCHES 80000000000000000-100000000000000000 INCHES 100000000000000000-150000000000000000 INCHES 150000000000000000-200000000000000000 INCHES 200000000000000000-250000000000000000 INCHES 250000000000000000-300000000000000000 INCHES 300000000000000000-400000000000000000 INCHES 400000000000000000-500000000000000000 INCHES 500000000000000000-600000000000000000 INCHES 600000000000000000-800000000000000000 INCHES 800000000000000000-1000000000000000000 INCHES 1000000000000000000-1500000000000000000 INCHES 1500000000000000000-2000000000000000000 INCHES 2000000000000000000-2500000000000000000 INCHES 2500000000000000000-3000000000000000000 INCHES 3000000000000000000-4000000000000000000 INCHES 4000000000000000000-5000000000000000000 INCHES 5000000000000000000-6000000000000000000 INCHES 6000000000000000000-8000000000000000000 INCHES 8000000000000000000-10000000000000000000 INCHES 10000000000000000000-15000000000000000000 INCHES 15000000000000000000-20000000000000000000 INCHES 20000000000000000000-25000000000000000000 INCHES 25000000000000000000-30000000000000000000 INCHES 30000000000000000000-40000000000000000000 INCHES 40000000000000000000-50000000000000000000 INCHES 50000000000000000000-60000000000000000000 INCHES 60000000000000000000-80000000000000000000 INCHES 80000000000000000000-100000000000000000000 INCHES 100000000000000000000-150000000000000000000 INCHES 150000000000000000000-200000000000000000000 INCHES 200000000000000000000-250000000000000000000 INCHES 250000000000000000000-300000000000000000000 INCHES 300000000000000000000-400000000000000000000 INCHES 400000000000000000000-500000000000000000000 INCHES 500000000000000000000-600000000000000000000 INCHES 600000000000000000000-800000000000000000000 INCHES 800000000000000000000-1000000000000000000000 INCHES 1000000000000000000000-1500000000000000000000 INCHES 1500000000000000000000-2000000000000000000000 INCHES 2000000000000000000000-2500000000000000000000 INCHES 2500000000000000000000-3000000000000000000000 INCHES 3000000000000000000000-4000000000000000000000 INCHES 4000000000000000000000-5000000000000000000000 INCHES 5000000000000000000000-6000000000000000000000 INCHES 6000000000000000000000-8000000000000000000000 INCHES 8000000000000000000000-10000000000000000000000 INCHES 10000000000000000000000-15000000000000000000000 INCHES 15000000000000000000000-20000000000000000000000 INCHES 20000000000000000000000-25000000000000000000000 INCHES 25000000000000000000000-30000000000000000000000 INCHES 30000000000000000000000-40000000000000000000000 INCHES 40000000000000000000000-50000000000000000000000 INCHES 50000000000000000000000-60000000000000000000000 INCHES 60000000000000000000000-80000000000000000000000 INCHES 80000000000000000000000-100000000000000000000000 INCHES 100000000000000000000000-150000000000000000000000 INCHES 150000000000000000000000-200000000000000000000000 INCHES 200000000000000000000000-250000000000000000000000 INCHES 250000000000000000000000-300000000000000000000000 INCHES 300000000000000000000000-400000000000000000000000 INCHES 400000000000000000000000-500000000000000000000000 INCHES 500000000000000000000000-600000000000000000000000 INCHES 600000000000000000000000-800000000000000000000000 INCHES 800000000000000000000000-1000000000000000000000000 INCHES 1000000000000000000000000-1500000000000000000000000 INCHES 1500000000000000000000000-2000000000000000000000000 INCHES 2000000000000000000000000-2500000000000000000000000 INCHES 2500000000000000000000000-3000000000000000000000000 INCHES 3000000000000000000000000-4000000000000000000000000 INCHES 4000000000000000000000000-5000000000000000000000000 INCHES 5000000000000000000000000-6000000000000000000000000 INCHES 6000000000000000000000000-8000000000000000000000000 INCHES 8000000000000000000000000-10000000000000000000000000 INCHES 10000000000000000000000000-15000000000000000000000000 INCHES 15000000000000000000000000-20000000000000000000000000 INCHES 20000000000000000000000000-25000000000000000000000000 INCHES 25000000000000000000000000-30000000000000000000000000 INCHES 30000000000000000000000000-40000000000000000000000000 INCHES 40000000000000000000000000-50000000000000000000000000 INCHES 50000000000000000000000000-60000000000000000000000000 INCHES 60000000000000000000000000-80000000000000000000000000 INCHES 80000000000000000000000000-100000000000000000000000000 INCHES 100000000000000000000000000-150000000000000000000000000 INCHES 150000000000000000000000000-200000000000000000000000000 INCHES 200000000000000000000000000-250000000000000000000000000 INCHES 250000000000000000000000000-300000000000000000000000000 INCHES 300000000000000000000000000-400000000000000000000000000 INCHES 400000000000000000000000000-500000000000000000000000000 INCHES 500000000000000000000000000-600000000000000000000000000 INCHES 600000000000000000000000000-800000000000000000000000000 INCHES 800000000000000000000000000-1000000000000000000000000000 INCHES 1000000000000000000000000000-1500000000000000000000000000 INCHES 1500000000000000000000000000-2000000000000000000000000000 INCHES 2000000000000000000000000000-2500000000000000000000000000 INCHES 2500000000000000000000000000-3000000000000000000000000000 INCHES 3000000000000000000000000000-4000000000000000000000000000 INCHES 4000000000000000000000000000-5000000000000000000000000000 INCHES 5000000000000000000000000000-6000000000000000000000000000 INCHES 6000000000000000000000000000-8000000000000000000000000000 INCHES 8000000000000000000000000000-10000000000000000000000000000 INCHES 10000000000000000000000000000-15000000000000000000000000000 INCHES 15000000000000000000000000000-20000000000000000000000000000 INCHES 20000000000000000000000000000-25000000000000000000000000000 INCHES 25000000000000000000000000000-30000000000000000000000000000 INCHES 30000000000000000000000000000-40000000000000000000000000000 INCHES 40000000000000000000000000000-50000000000000000000000000000 INCHES 50000000000000000000000000000-60000000000000000000000000000 INCHES 60000000000000000000000000000-80000000000000000000000000000 INCHES 80000000000000000000000000000-100000000000000000000000000000 INCHES 100000000000000000000000000000-150000000000000000000000000000 INCHES 150000000000000000000000000000-200000000000000000000000000000 INCHES 200000000000000000000000000000-250000000000000000000000000000 INCHES 250000000000000000000000000000-300000000000000000000000000000 INCHES 300000000000000000000000000000-400000000000000000000000000000 INCHES 400000000000000000000000000000-500000000000000000000000000000 INCHES 500000000000000000000000000000-600000000000000000000000000000 INCHES 600000000000000000000000000000-800000000000000000000000000000 INCHES 800000000000000000000000000000-1000000000000000000000000000000 INCHES 1000000000000000000000000000000-1500000000000000000000000000000 INCHES 1500000000000000000000000000000-2000000000000000000000000000000 INCHES 2000000000000000000000000000000-2500000000000000000000000000000 INCHES 2500000000000000000000000000000-3000000000000000000000000000000 INCHES 3000000000000000000000000000000-4000000000000000000000000000000 INCHES 4000000000000000000000000000000-5000000000000000000000000000000 INCHES 5000000000000000000000000000000-6000000000000000000000000000000 INCHES 6000000000000000000000000000000-8000000000000000000000000000000 INCHES 8000000000000000000000000000000-10000000000000000000000000000000 INCHES 10000000000000000000000000000000-15000000000000000000000000000000 INCHES 15000000000000000000000000000000-20000000000000000000000000000000 INCHES 20000000000000000000000000000000-25000000000000000000000000000000 INCHES 25000000000000000000000000000000-30000000000000000000000000000000 INCHES 30000000000000000000000000000000-40000000000000000000000000000000 INCHES 40000000000000000000000000000000-50000000000000000000000000000000 INCHES 50000000000000000000000000000000-60000000000000000000000000000000 INCHES 60000000000000000000000000000000-80000000000000000000000000000000 INCHES 80000000000000000000000000000000-100000000000000000000000000000000 INCHES 100000000000000000000000000000000-150000000000000000000000000000000 INCHES 150000000000000000000000000000000-200000000000000000000000000000000 INCHES 200000000000000000000000000000000-250000000000000000000000000000000 INCHES 250000000000000000000000000000000-300000000000000000000000000000000 INCHES 300000000000000000000000000000000-400000000000000000000000000000000 INCHES 400000000000000000000000000000000-500000000000000000000000000000000 INCHES 500000000000000000000000000000000-600000000000000000000000000000000 INCHES 6000000000000	
---	--	--	--

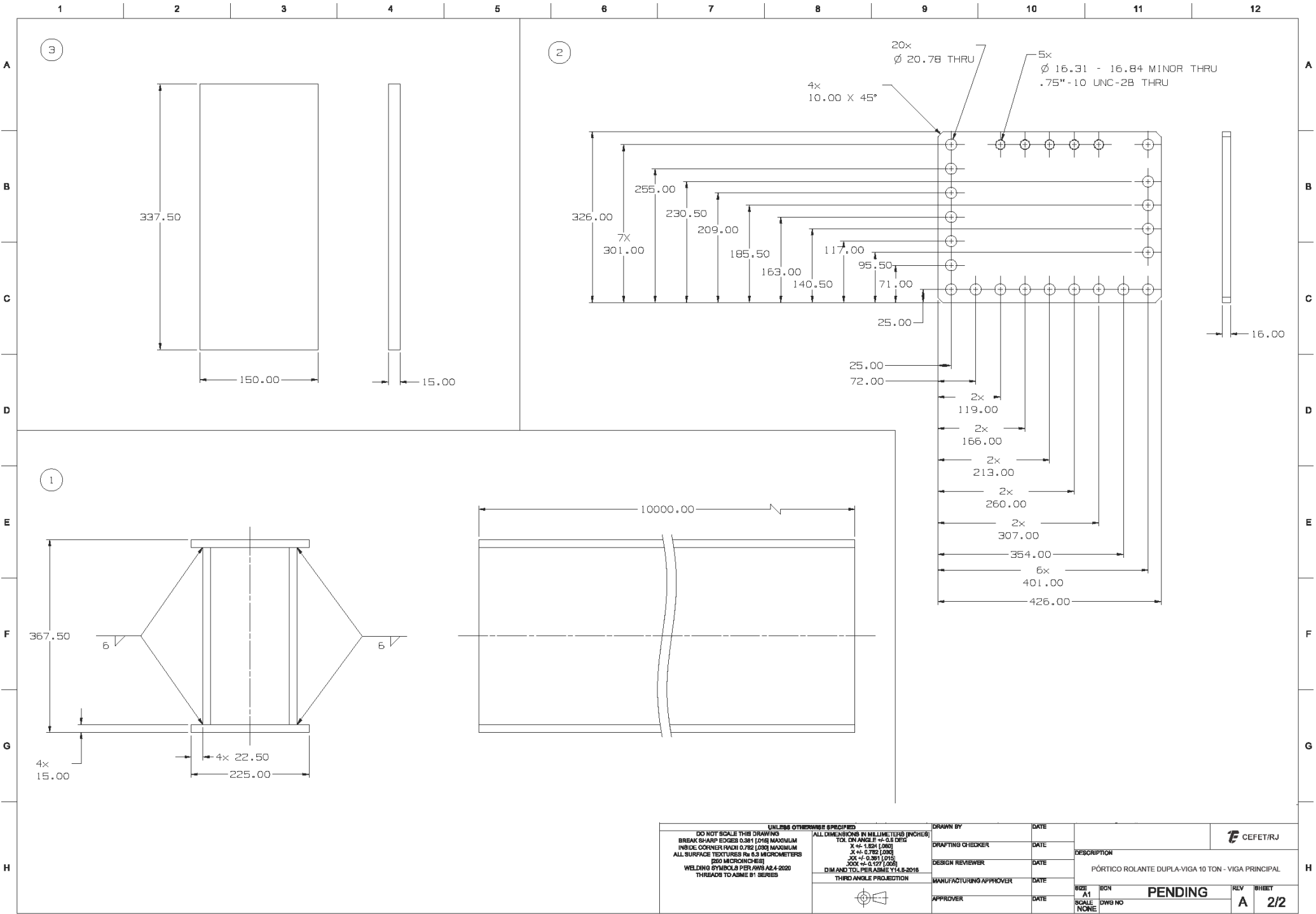


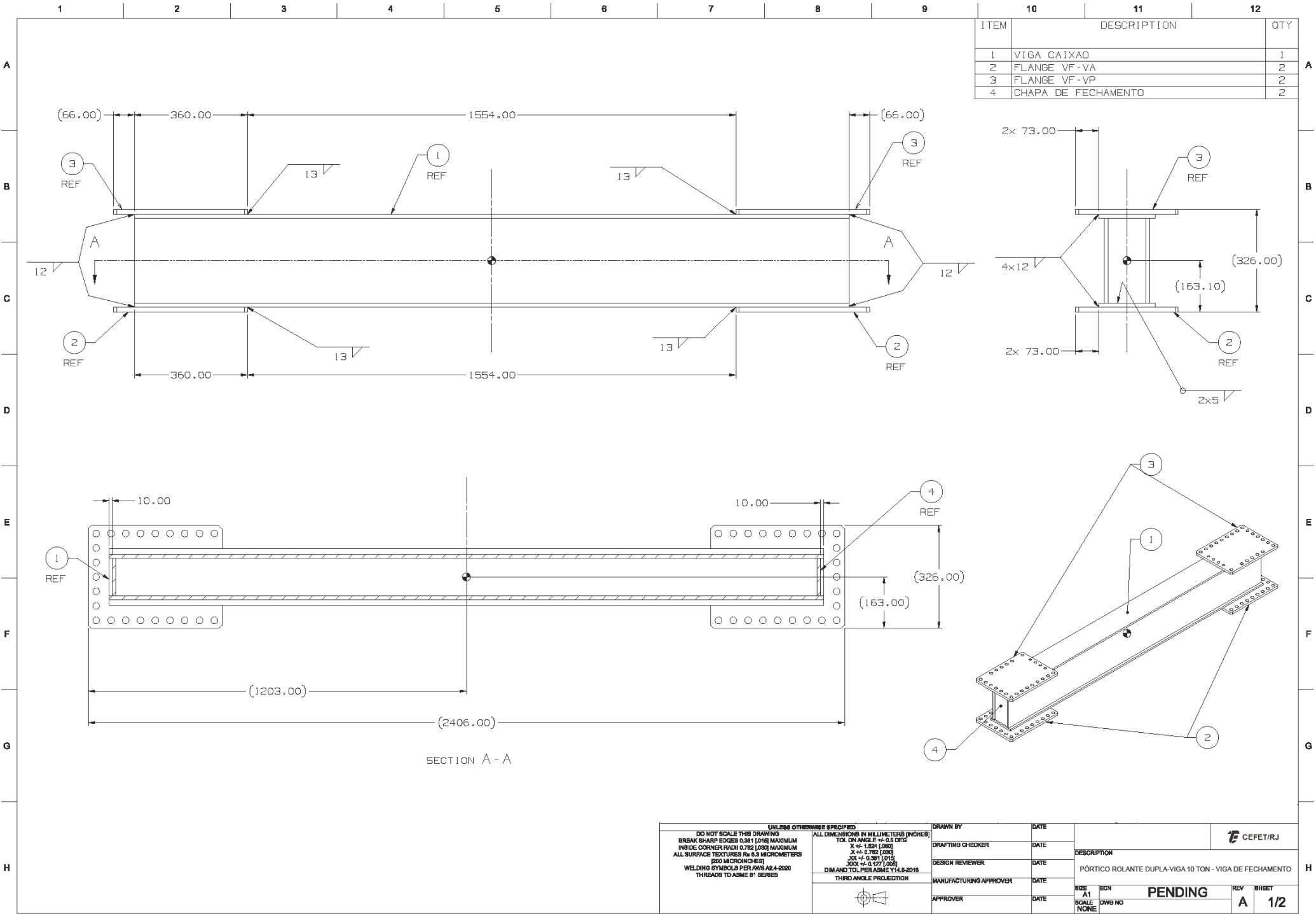
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DRAWN BY		DATE		DESCRIPTION	
DO NOT SCALE THIS DRAWING		ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS (NO DIMS TO CHAIN LINE) UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DRAFTING CHECKER		DATE	
BREAK SHARP CORNERS 0.5X		X 1/2" 1:50 (1:50)		DESIGN REVIEWER		DATE	
INSIDE CORNER RADIUS 0.75X (0.75X) UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		X 1/2" 1:50 (1:50)		MANUFACTURING APPROVER		DATE	
ALL SURFACE TEXTURES R40 (R40) UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		X 1/2" 1:50 (1:50)		APPROVER		DATE	
WELDING SYMBOLS FOR WELDING		THIRD ANGLE PROJECTION		REV		PENDING	
				REV		A	
				SHEET		2/2	



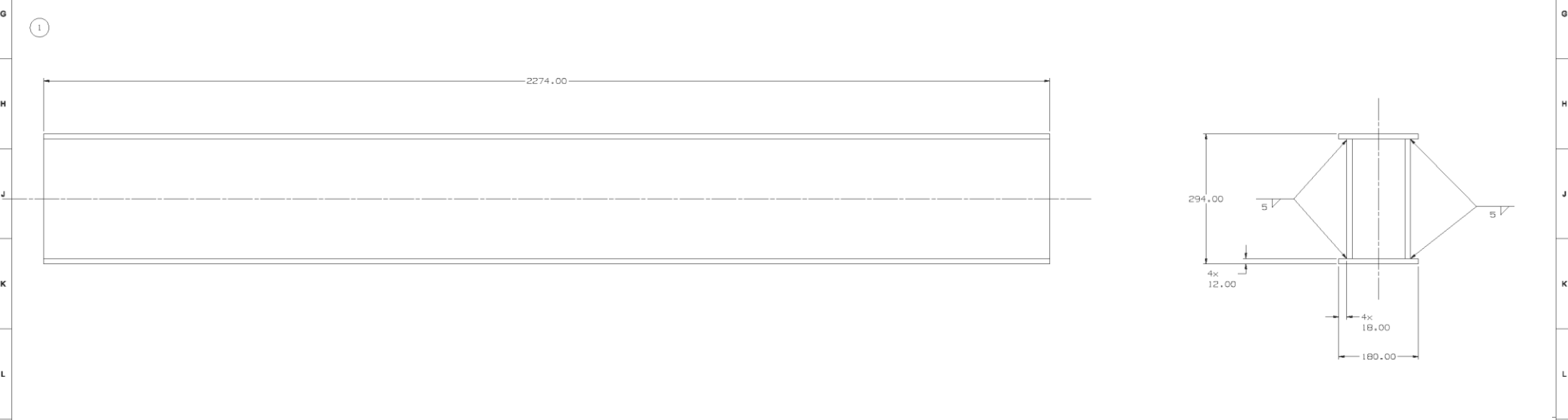
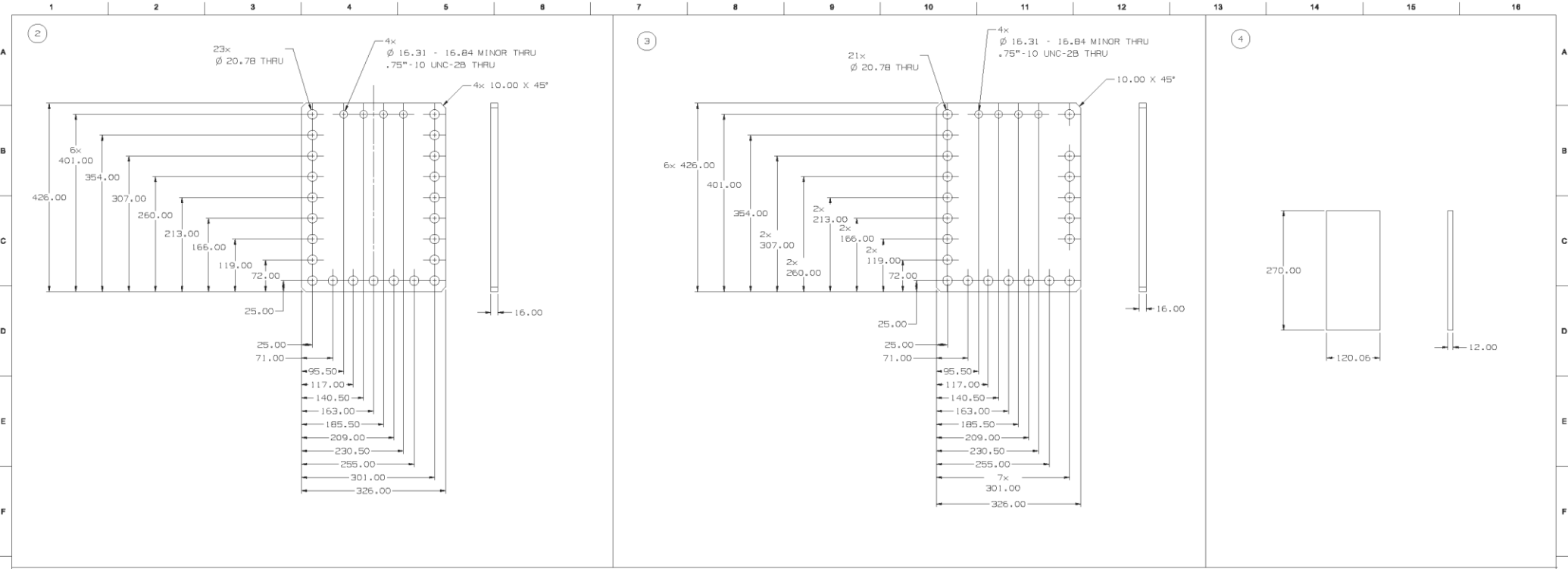
ITEM	DESCRIPTION	QTY
1	VIGA CAIXAO	1
2	FLANGE	2
3	CHAPA DE FECHAMENTO	2

UNIDATA SYSTEMS INCORPORATED		DESIGN BY		DATE	
DO NOT SCALE THIS DRAWING		DRAWING CHECKER		DATE	
BREAK SHARP CORNERS 0.5X		DESIGN REVIEWER		DATE	
INSIDE CORNER RADIUS 0.75X		MANUFACTURER APPROVER		DATE	
ALL SURFACE TEXTURES R=15 MICRONS		APPROVER		DATE	
WELDING SYMBOLS FOR AWS A5.1		SCALE		NONE	
THREADS TO ASME B1.1		REV		A	
		SHEET		1/2	

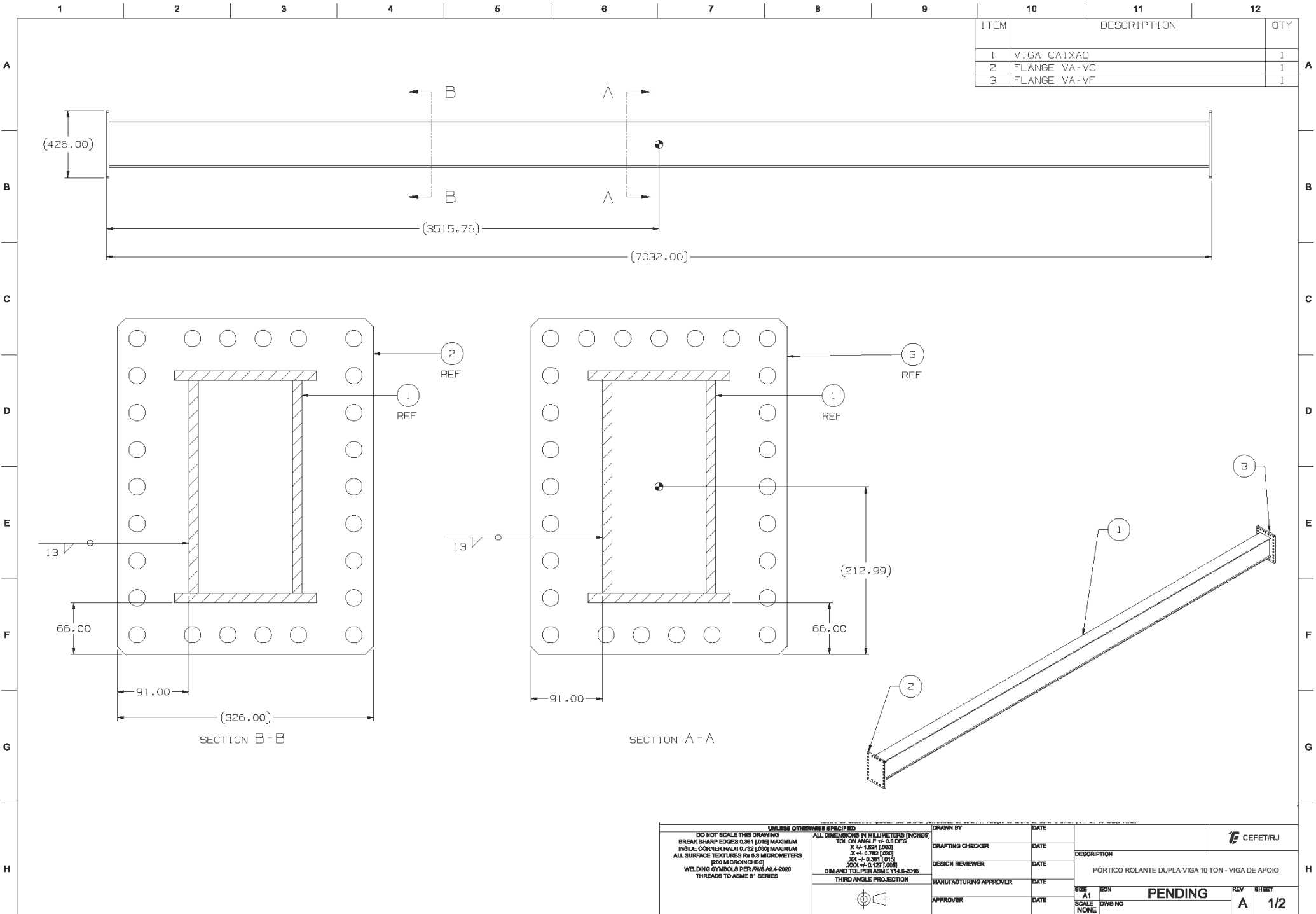




UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DRAWN BY	DATE	CEFET/RJ
DO NOT SCALE THIS DRAWING		DRAFTING CHECKER	DATE	
BREAK SHARP EDGES 0.381 (1/16) MAXIMUM		DESIGN REVIEWER	DATE	PÓRTOCO ROLANTE DUPLA-VIGA 10 TON - VIGA DE FECHAMENTO
INSIDE CORNER RADI 0.762 (3/16) MAXIMUM		MANUFACTURING APPROVER	DATE	
ALL SURFACE TEXTURES Ra 6.3 MICROMETERS		APPROVER	DATE	PENDING
WELDING SYMBOLS PER AWS A2.4-2020				
THREADS TO ASME B1 SERIES				A 1/2
THIRD ANGLE PROJECTION				
ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS (INCHES)				
TOL. DR. ANGLE +/- 0.5 DEG				
X +/- 1.524 (1/16)				
X +/- 0.762 (3/16)				
X +/- 0.381 (1/16)				
X +/- 0.127 (1/32)				
DIM AND TOL PER ASME Y14.5-2018				

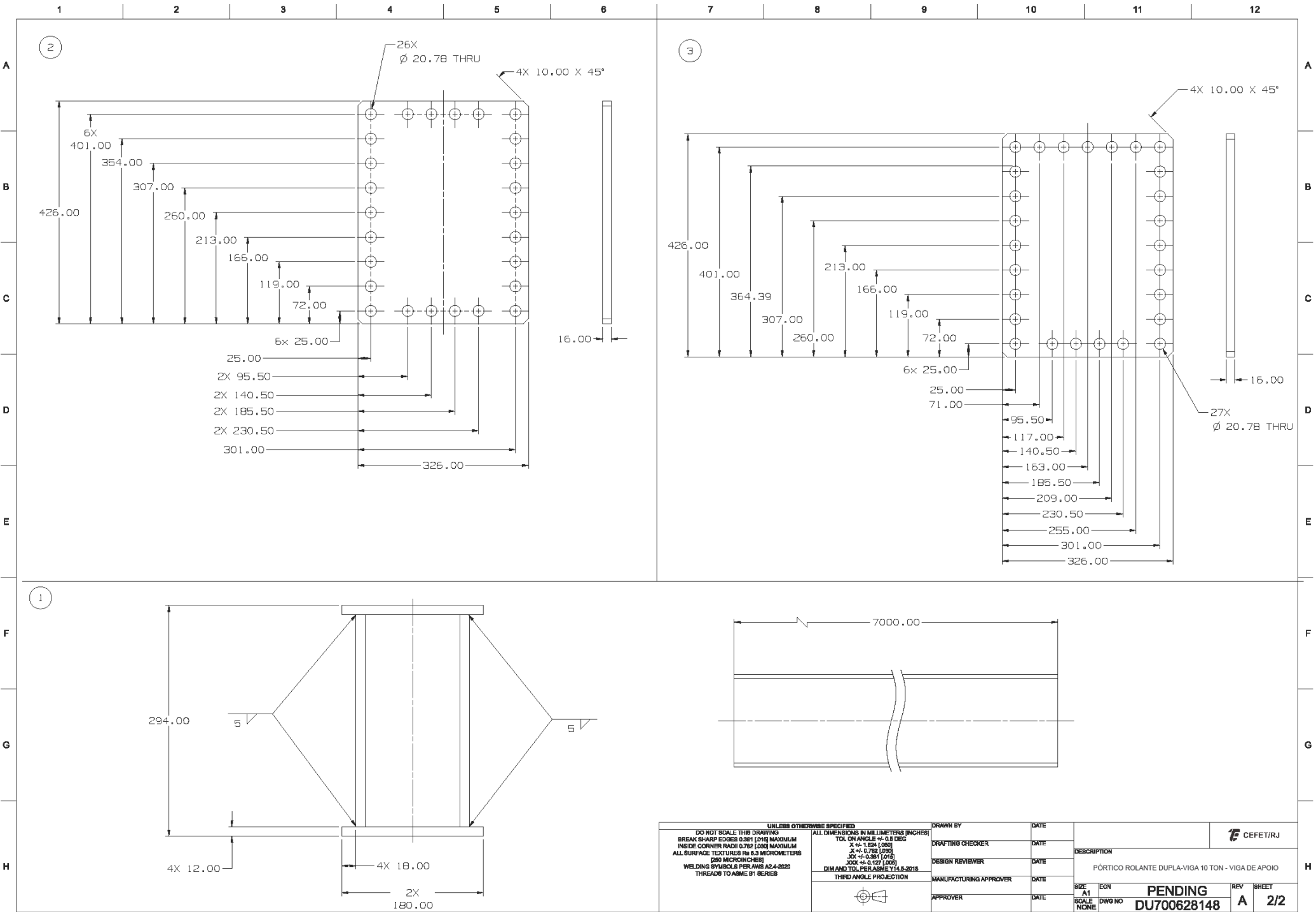


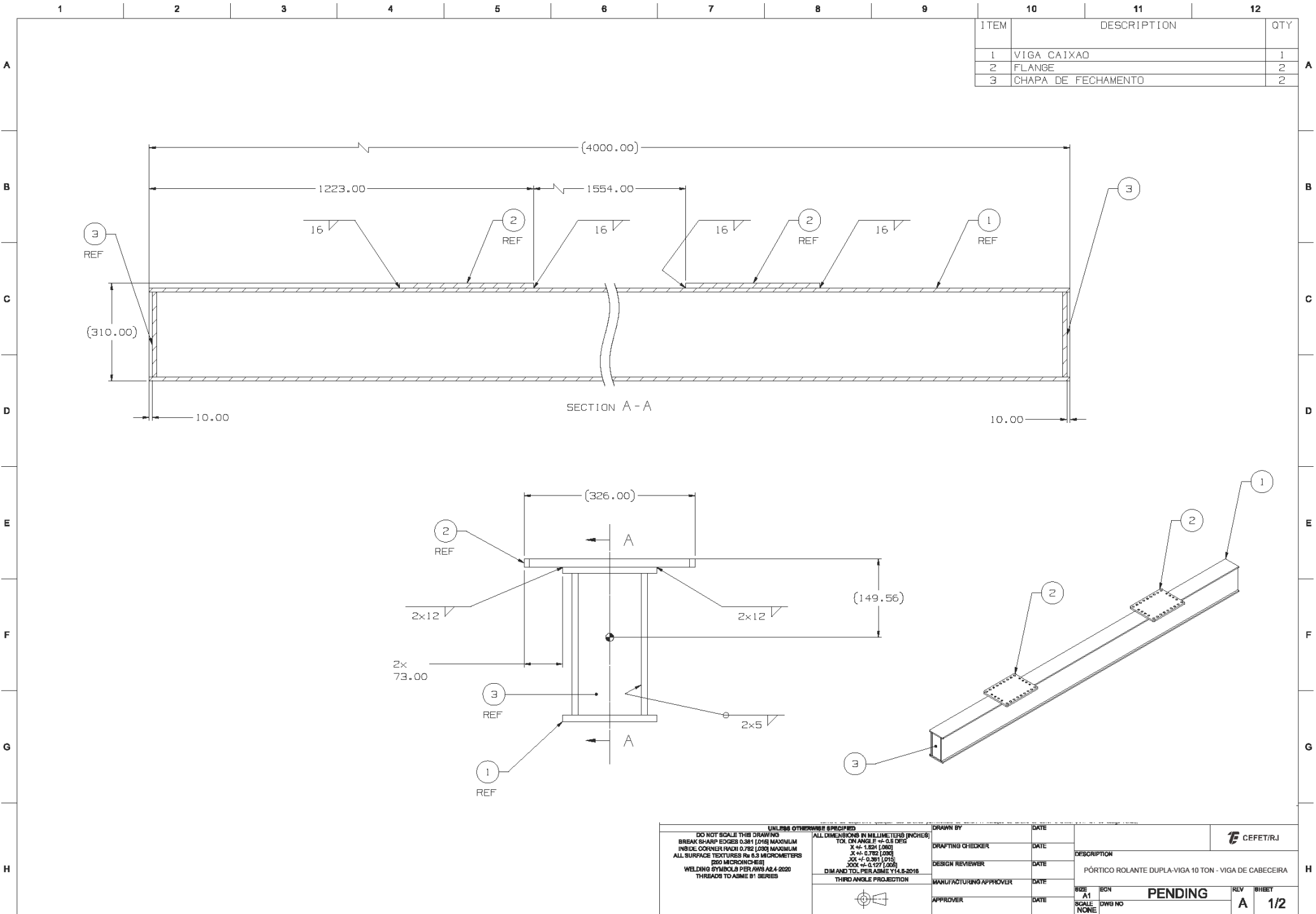
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY				CEMETRY			
DO NOT SCALE THIS DRAWING				DESIGNED BY			
BREAK SYMBOLS: 1/8" (3.18 mm) MINIMUM				DRAWING CHECKER			
INSIDE CORNER RADIUS 0.75" (19.05 mm) MINIMUM				DATE			
ALL SURFACE TEXTURES: R=10 MICRONS				DESIGN REVIEWER			
WELDING SYMBOLS: FILL AND FLARE				DATE			
THREADS TO ASME B1.1				MANUFACTURING APPROVER			
				DATE			
				APPROVER			
				DATE			
				REV			
				A			
				2/2			



ITEM	DESCRIPTION	QTY
1	VIGA CAIXAO	1
2	FLANGE VA-VC	1
3	FLANGE VA-VF	1

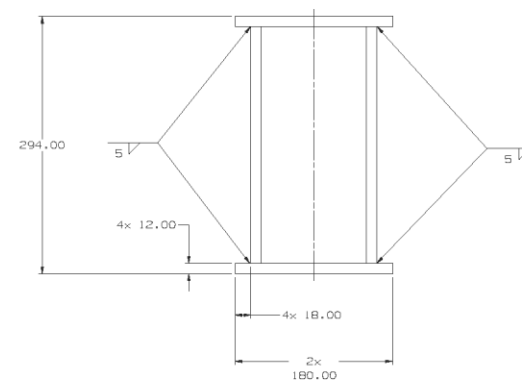
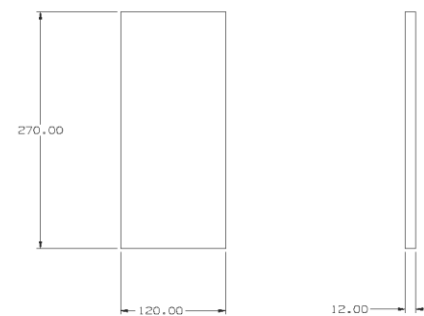
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED				DRAWN BY		DATE		CEFET/RJ	
DO NOT SCALE THIS DRAWING				DRAFTING CHECKER		DATE		PENDING	
BREAK SHARP EDGES 0.381 (016) MAXIMUM				DESIGN REVIEWER		DATE			
INSIDE CORNER RADIUS 0.762 (030) MAXIMUM				MANUFACTURING APPROVER		DATE			
ALL SURFACE TEXTURES Ra 6.3 MICROMETERS (250 MICRONS)				APPROVER		DATE			
WELDING SYMBOLS PER AWS A2.4-2020				THIRD ANGLE PROJECTION		DATE		REV A	
THREADS TO ASME B1 SERIES								SHEET 1/2	





ITEM	DESCRIPTION	QTY
1	VIGA CAIXAO	1
2	FLANGE	2
3	CHAPA DE FECHAMENTO	2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DRAWN BY		DATE		DESCRIPTION		REV		SHEET
DO NOT SCALE THIS DRAWING BREAK SHARP EDGES 0.381 (016) MAXIMUM INSIDE CORNER RADIUS 0.762 (030) MAXIMUM ALL SURFACE TEXTURES Ra 6.3 MICROMETERS (250 MICRONS) WELDING SYMBOLS PER AWS A2.4:2020 THREADS TO ASME B1 SERIES		DRAFTING CHECKER		DATE						
ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS (INCHES) TOL ON ANGLES ± 0.5 DEG X ± 1.524 (0.06) X ± 0.762 (0.03) X ± 0.381 (0.015) X ± 0.127 (0.005) DIM AND TOL PER ASME Y14.5-2016		DESIGN REVIEWER		DATE		PÓRTECO ROLANTE DUPLA-VIGA 10 TON - VIGA DE CABECEIRA		A		1/2
THIRD ANGLE PROJECTION		MANUFACTURING APPROVER		DATE		PENDING		A		1/2
		APPROVER		DATE		SIZE A1 SCALE NONE				



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DO NOT SCALE THIS DRAWING BRICKLAYER CORNER RADIUS 1/8" (20mm) INSIDE CORNER RADIUS 1/4" (6mm) ALL SURFACE TEXTURES ARE 1/8" CONCRETE 300 MICROCONCRETE WELDING SYMBOLS PER AWS A2.4-2005 THREADS TO A/BME 1/8" SERIES		DIMENSIONS IN MILLIMETERS [INCHES] TOL. ON ANGLES ± 0.50 DEG ± 1/4" ± 1/32" (3mm) ± 1/8" ± 1/32" (3mm) ± 1/16" ± 1/32" (3mm) DIM AND TOL. SEE A/BME, T4.2.1.1 THIRD ANGLE PROJECTION		DRAWN BY CHECKED BY DATE DATE DATE DATE DATE DATE		DATE DESCRIPTION PORTICO ROLANTE DÚPLA-VIÇA 10 TON - VISA DE CADEIRA		TEFET RJ	
		MANUFACTURER'S APPROVER APPROVER		DATE DATE		SIZE 1/8" x 11"		PENDING	
						SCALE 1/8" = 1'		NEW SHEET A 2/2	



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO/DIVULGAÇÃO DE DOCUMENTO ELETRÔNICO NO CATÁLOGO DO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO CEFET/RJ E NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação abaixo citada, de acordo com a Lei nº 9610/98, autorizo, a partir da presente data, o CEFET/RJ, a disponibilizar gratuitamente, sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissões assinadas abaixo, no Catálogo Online do Sistema de Bibliotecas e no Repositório Institucional do Cefet/RJ, ou qualquer outro formato de disseminação da informação que a instituição implemente, no formato PDF, para fins de leitura, impressão e/ou download pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada por esta Instituição.

1- Tipo de trabalho: ☒ Projeto Final (Graduação) ☐ Especialização
☐ Dissertação ☐ Tese

2- Identificação do trabalho/autor(es):

Curso: ENGENHARIA MECÂNICA

Título: PÓRTICO ROLANTE PARA MONTAGEM DE UMA ÁRVORE DE NATAL
MOLHADA EM GALPÃO: CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Autor(es): ERIC SARTINI GODOY E HUGO MORAES DE FRIAS CARVALHO

Orientador: RICARDO ALEXANDRE AMAR DE AGUIAR

Co-orientador: LEYDERVAN DE SOUZA XAVIER

3- Informações de acesso ao trabalho:

Este trabalho é confidencial? ☐ Sim ☒ Não

Pode ser liberado para publicação? ☒ Total ☐ Parcial ☐ Não

Justifique: N/A

Em caso de publicação parcial, assinale as permissões:

☐ Sumário

☐ Capítulos. Especifique: _____

☐ Bibliografia

☐ Outras partes do trabalho: _____

Rio de Janeiro, 22/12/2025

Documento assinado digitalmente
gov.br ERIC SARTINI GODOY
Data: 22/12/2025 09:28:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br HUGO MORAES DE FRIAS CARVALHO
Data: 22/12/2025 09:31:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO ALEXANDRE AMAR DE AGUIAR
Data: 23/12/2025 01:06:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(s) autor(es)

Leydervan de Souza
Xavier

Assinatura do orientador
Assinado de forma digital por
Leydervan de Souza Xavier
Dados: 2025.12.23 12:07:29 -03'00'

Assinatura do co-orientador