

COMPARATIVO ENTRE OS SOFTWARES CYPE 3D E ROBOT STRUCTURAL PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE AÇO

⁽¹⁾ Gabriel Eugênio Garcia Rodrigues

⁽²⁾ Nickolas Ribeiro de Mendonça

⁽³⁾ Daniel Santana de Magalhães

⁽¹⁾ Estudante de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba

⁽²⁾ Estudante de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba

⁽³⁾ Professor substituto do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba

Presidente da banca: Daniel Santana de Magalhães

Membro 1: Simone Rodrigues Campos Ruas

Membro 2: Lucas Martins Guimarães

15 de dezembro de 2020

RESUMO: Atualmente existem inúmeros *softwares* de cálculo estrutural no mercado com diferentes métodos de análise, causando dificuldade na escolha do que melhor atende a necessidade do engenheiro projetista. Por essa razão, o objetivo desse trabalho foi comparar o dimensionamento realizado pelo Cype 3D (do pacote CYPE) e pelo Robot Structural Analysis Professional (da Autodesk), considerando todas as prescrições normativas. Foi modelado o pórtico principal de um projeto adaptado do livro Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo, 2ª edição, de Ildony H. Bellei e da editora PINI (1998), obtendo-se os valores dos esforços, deslocamentos, a verificação dos perfis pré-dimensionados, a ligação entre as barras e o dimensionamento otimizado, no qual o *software* escolhe qual o perfil é o mais econômico para o modelo apresentado. Constatou-se que os valores dos esforços e dos deslocamentos dos dois *softwares* foram bastante próximos, sendo as maiores diferenças de 0,561tf.m no momento fletor e 0,618mm no deslocamento, sendo justificadas pela carga de peso próprio considerada por cada um e pela forma de aplicação do método dos elementos finitos. Ambos consideraram os perfis pré-dimensionados aptos para o modelo estrutural e com relação às ligações, o Cype 3D calculou conexões mais econômicas e forneceu maior detalhamento das mesmas. Para a otimização de perfis, o Robot Structural mostrou-se bastante vantajoso, encontrando um pórtico 401,34kg (19,35%) mais leve que o do Cype 3D. Conclui-se assim que ambos os *softwares* são viáveis para realização do dimensionamento de uma estrutura metálica, sendo que a grande vantagem do Cype 3D é a utilização das normas brasileiras e a do Robot Structural é a maior economia na escolha dos perfis, gerando uma estrutura mais leve.

PALAVRAS-CHAVES: estrutura metálica, programas de dimensionamento estrutural, ligações, perfis metálicos, galpões.

COMPARISON BETWEEN CYPE 3D AND ROBOT STRUCTURAL FOR STEEL STRUCTURE SIZING

ABSTRACT: Currently, there are countless structural calculation software on the market, with different methods of analysis, causing difficulty in choosing what supply the needs of the design engineer. For this reason, the objective of this work was to compare the sizing performed by Cype 3D (from the CYPE package) and using Robot Structural Analysis Professional (from Autodesk), considering all normative prescriptions. The main portico of a project adapted from the book Industrial Steel Buildings: Design and Calculation, 2nd edition, by Ildony H. Bellei and the publisher PINI, was modeled, obtaining the efforts values, displacements, the verification of the pre-dimensioned profiles, the connection between the bars and the optimized design, in which the software chooses which profile is the most economical for the model presented. It was found that the efforts values and displacements on both softwares were very close, with the largest differences being 0.561tf.m in the bending moment and 0.618mm in displacement, being justified by the own weight load considered by each one and by the method application method finite elements. Both considered the pre-dimensioned profiles suitable for the structural model and in relation to the connections, Cype 3D calculated more economical connections and provided greater detail of them. For the optimization of profiles, Robot Structural proved to be quite advantageous, finding a 401.34kg (19.35%) lighter gantry than that of Cype 3D. It is concluded that both softwares are viable for the realization of the design of a metallic structure, with the great advantage of Cype 3D being the use of Brazilian standards and that of Robot Structural is the greatest savings in the choice of profiles, generating a structure lighter.

KEYWORDS: metallic structures, steel gantry, structural design softwares, connections, metallic profiles, sheds.

1 INTRODUÇÃO

O surgimento das ferramentas computacionais para análise e dimensionamento estrutural, possibilitou ganho de produtividade e a realização de análises específicas e complexas, que não poderiam ser realizadas manualmente. Esse mercado está em constante evolução, fazendo com que muitas empresas desenvolvam e aprimorem seus *softwares* (SEBASTIÃO, 2019).

Segundo Braga (2016), para que seja realizado um estudo com aplicação para galpões industriais em aço de uso geral, é necessário o conhecimento sobre os materiais utilizados, os pórticos da estrutura e as formas de ligação que proporcionem aplicabilidade, estabilidade e custo benefício sempre se baseando em documentos normativos. Além disso, no dimensionamento de estruturas de aço, faz-se necessário entender conceitos de cálculos estruturais para o desenvolvimento das especificações de projeto de acordo com a fundamentação teórica proposta pelo documento

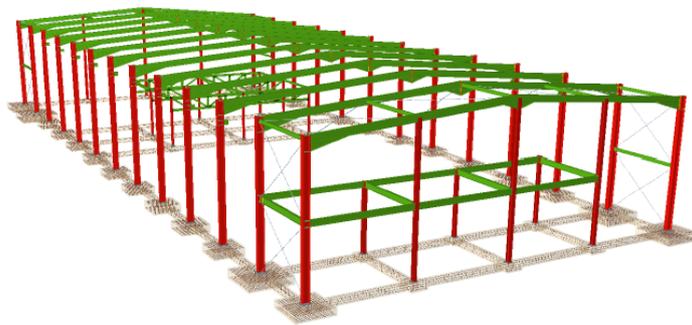
68 normativo da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 – Projetos de estruturas de aço e
69 de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, do ano de 2008 (ABNT NBR 8800:2008).

70 O objetivo do presente trabalho foi realizar um comparativo entre o dimensionamento do
71 pórtico principal de um galpão industrial metálico, modelado nos programas CYPE 3D, da Cype
72 Ingenieros S.A. e ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL, da Autodesk, a partir de
73 uma adaptação do projeto disponível no livro Edifícios Industriais em Aço Projeto e Cálculo, 2ª
74 edição, por Ildony H. Bellei e da editora PINI (1998). Tal comparação permite a escolha do *software*
75 que entrega os melhores resultados e que possibilita ao usuário uma experiência mais satisfatória.

76 1.1 Cype 3D

77 O *software* Cype 3D realiza cálculo de estruturas tridimensionais, inclusive suas ligações e
78 fundações. Permite trabalhar com barras de concreto, aço, mistas de concreto e aço, alumínio, madeira
79 ou qualquer material. O programa funciona independente do CYPECAD ou integrado ao mesmo,
80 permitindo análise de diversas estruturas. Sozinho, também permite a discretização de estruturas
81 como placas (elementos planos de duas dimensões, espessura constante e definidos por um polígono)
82 para calcular as tensões e os esforços. Além disso, faz análise ao sismo da estrutura e da resistência
83 ao fogo dos perfis de madeira e de aço, considerando tais condições no dimensionamento. Com
84 relação ao vento e ao sismo, considera os efeitos de segunda ordem, conhecidos como P- Δ (CYPE,
85 2020). A Figura 1 apresenta uma vista tridimensional do programa com o projeto de um galpão.

86 Figura 1. Vista tridimensional de galpão no programa CYPE 3D



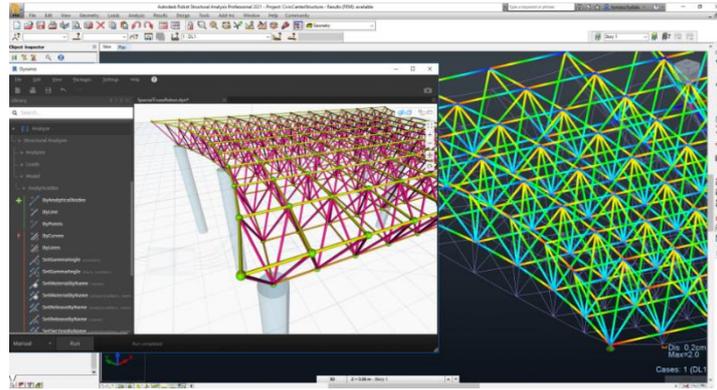
87

88 Fonte: Adaptado do Manual do Utilizador do Cype 3D (2020)

89 1.2 Robot Structural Analysis Professional

90 O Robot Structural realiza cálculos automáticos permitindo simulação e análises de edificações.
91 Quando foi comprado pela Autodesk, a empresa modificou-o promovendo sua integração com o
92 conceito *Building Information Modeling* (BIM). São vários modelos de projeto, que dependem do
93 elemento estrutural a ser projetado e permite a análise de situações comuns até as mais complexas.
94 Várias análises estruturais são possíveis, tais como a análise estática, análise modal, análise modal
95 considerando forças estáticas, análise à encurvadura, análise harmônica e análise *push over*
96 (SEBASTIÃO, 2019). A Figura 2 apresenta a interface de trabalho do programa.

Figura 2. Interface do programa Robot Structural



98

99

Fonte: Página oficial AUTODESK (2020)

100 1.3 Ações e combinações

101 Com relação ao projeto e dimensionamento de estruturas, segundo a NBR 8681 (2003) uma
 102 estrutura pode receber três tipos de carregamento, sendo eles: ações permanentes (F_G) – aquelas que
 103 sempre estarão presentes na estrutura, principalmente o peso próprio; ações variáveis (F_Q) – aquelas
 104 que são provenientes principalmente de uso e ocupação, pressão hidrostática, empuxo de terra, vento
 105 e variação de temperatura e ações excepcionais – provenientes de situações como incêndios,
 106 explosões, choques de veículos, sismos, entre outros.

107 De acordo com a NBR 8800 (2008), após a definição das ações, é necessário realizar a
 108 combinação das mesmas para considerar a probabilidade da ocorrência simultânea em certo período
 109 de tempo. Para esse procedimento, são consideradas as equações próprias para o determinado tipo de
 110 combinação, sendo elas últimas (normais, especiais, de construção ou excepcionais) ou de serviço
 111 (frequentes ou raras). Os coeficientes de ponderação utilizados são: γ_g (coeficiente de ponderação
 112 para ações permanentes), γ_q (coeficiente de ponderação para ações variáveis), Ψ_0 (fator de
 113 combinação para ações variáveis), Ψ_1 e Ψ_2 (fatores de redução para ações variáveis). Além disso, os
 114 valores de resistência dos materiais também devem ser reduzidos fazendo sua divisão por um
 115 coeficiente de ponderação das resistências γ_m .

116 1.4 Solicitações

117 Segundo a ABNT NBR 8800 (2008), devem ser consideradas em projeto, as solicitações de
 118 tração, compressão, cisalhamento, flexão e deslocamentos. Para o caso específico da flexão deve-se
 119 atentar ao processo de cálculo do momento fletor resistente, que é determinado utilizando as tabelas
 120 encontradas nos anexos G e H da NBR 8800 (2008). O principal fator a ser considerado é o estado-
 121 limite de flambagem, o qual pode ser dividido em Flambagem Local da Alma (FLA), Flambagem Local
 122 da Mesa (FLM) e Flambagem Lateral com Torção (FLT). Os anexos apresentam toda a formulação
 123 e os parâmetros necessários para determinação do $M_{R,d}$ – Momento Fletor Resistente de Cálculo
 124 (ABNT NBR 8800, 2008).

125 **1.5 Ação do vento**

126 Devido ao uso de conexões flexíveis nos projetos de estrutura metálica e da alta resistência do
127 aço possibilitar trabalhar-se com peças esbeltas, uma ação muito importante a ser considerada para o
128 dimensionamento de galpões metálicos é o vento (ABNT NBR 8800, 2008).

129 Tal ação é resultado de várias condições específicas relacionadas ao local de implantação da
130 obra. O cálculo da ação do vento deve ser realizado a partir do cálculo da força de arrasto (F_A) e
131 também dos coeficientes de pressão e de forma externos e de pressão interna, o qual requer muito
132 cuidado, principalmente no caso de projetos industriais de galpões, que são em geral, muito
133 permeáveis e de grandes dimensões, proporcionando alta pressão interna devido a ação do vento
134 (ABNT NBR 6123, 1988).

135 **2 METODOLOGIA**

136 Primeiramente estudou-se o projeto obtido no livro Edifícios Industriais em Aço, 2ª edição, do
137 autor Ildony H. Bellei e da editora PINI (1998). O anexo D do livro apresenta um projeto completo
138 de um galpão em pórtico de alma cheia, o qual foi adaptado. O pórtico principal da estrutura foi
139 modelado, seus perfis foram pré-dimensionados e os carregamentos inseridos, em ambos os *softwares*
140 específicos para projetos, principalmente para estruturas de aço (Cype3D, do pacote Cype e Robot
141 Structural Analysis Professional, da AUTODESK).

142 **2.1 Descrição do projeto do galpão**

143 O trabalho foi baseado no projeto do livro descrito, no qual o autor fez todo o dimensionamento
144 manualmente.

145 **2.1.1 Características gerais**

146 O projeto de estudo, possui 20 metros de vão entre os eixos das colunas, um total de 48 metros
147 de comprimento, 9 metros de altura para as colunas, um espaçamento de 6 metros entre os pórticos
148 principais e cobertura de chapa zincada trapezoidal.

149 Além disso, o sistema estrutural proposto é dividido em pórticos bi-engastados de alma cheia
150 (transversal) e em contraventamentos verticais e horizontais (longitudinal). Logo o objeto de estudo
151 principal será o sistema transversal, sendo modelado e analisado por meio dos *softwares*, para
152 posterior comparação de resultados.

153 **2.1.2 Materiais**

154 Com relação a especificação dos materiais a serem utilizados, tem-se que toda a estrutura do
155 pórtico foi em aço ASTM A36. As características do material podem ser constatadas na Tabela 1.

156

Tabela 1. Características do material utilizado

Aço	F_U (tf/cm ²)	F_y (tf/cm ²)	F_t e F_b (tf/cm ²)	$F_V < 0,4F_y$ (tf/cm ²)
ASTM A36	$\geq 4,00$	$\geq 2,50$	$\leq 1,50$	$\leq 1,00$

157

Fonte: Adaptado de BELLEI (1998)

158

159

160

As soldas prescritas são com Eletrodo E-70XX com $F_U=4,92$ tf/m². Já os materiais dos parafusos das ligações são ASTM A325 ($F_U=7,25$ tf/m²) para ligações principais e ASTM A307 ($F_U=4,15$ tf/m²) para ligações secundárias.

161

2.1.3 Seção típica e plano de cobertura

162

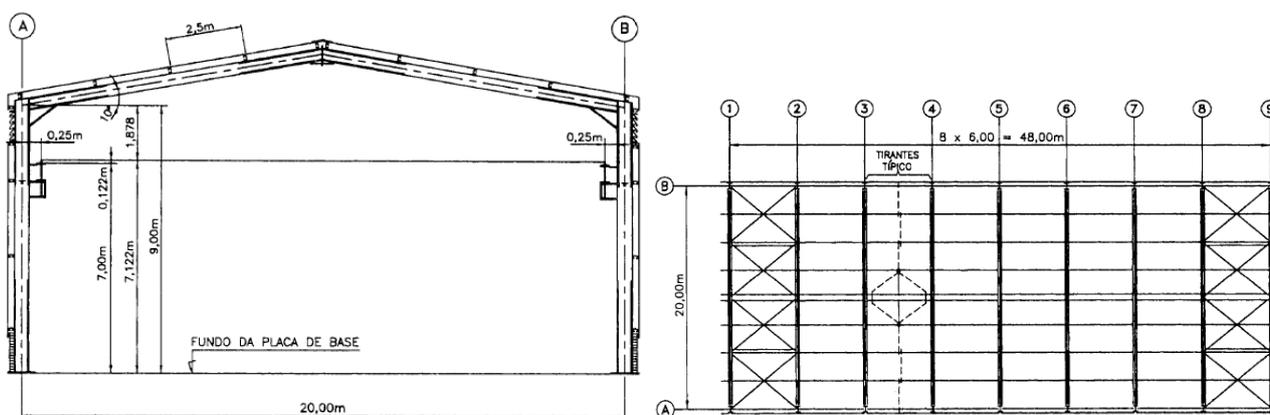
163

164

O projeto possui um pórtico típico que se repete ao longo do galpão, o qual é objeto de estudo principal. A Figura 3 apresenta a seção típica do pórtico e o plano de cobertura do galpão, que mostra a vista superior com o distanciamento entre os pórticos.

165

Figura 3. Seção típica e plano de cobertura



166

167

Fonte: Adaptado de BELLEI (1998)

168

2.1.4 Cargas

169

170

171

172

173

A carga permanente (CP) é estimada para cada parte da estrutura. Para as vigas foi considerado o peso das chapas de tapamento, das terças e dos tirantes, resultando em uma carga distribuída de 77 Kgf/m (quilograma força por metro). Para as colunas, foi considerado o tapamento lateral, resultando em uma carga concentrada no topo de 683 Kgf (quilograma força). Já a carga acidental (CA) é de 90 Kgf/m (quilograma força por metro), aplicada nas vigas.

174

175

176

177

178

179

180

181

Com relação ao vento, o carregamento é calculado conforme as prescrições da ABNT NBR 6123 (1988). Inicialmente adotou-se uma velocidade básica do vento $V_0=35$ m/s (metros por segundo). O fator topográfico foi escolhido considerando o terreno como plano, logo $S_1=1$. Já para o fator de rugosidade, adotou-se Categoria IV, Classe B e maior dimensão entre 20 e 50 metros. Para o fator estatístico, considerou-se que a edificação se enquadrava no grupo 3 (Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação), logo $S_3=0,95$. Com isso, obteve-se os valores para S_2 , para velocidade característica (V_k) e para a pressão dinâmica (q_k), variando com a altura, conforme é apresentado na Tabela 2.

182

Tabela 2. Valores de S_2 , V_k e q_k , variando com a altura

H	S_2	V_k (m/s)	q_k (Kg/m ²)
<5m	0,76	25,27	39,91
10m	0,83	27,60	47,61
11m	0,84	27,93	48,76

183

Fonte: Adaptado de BELLEI (1998)

184

185

186

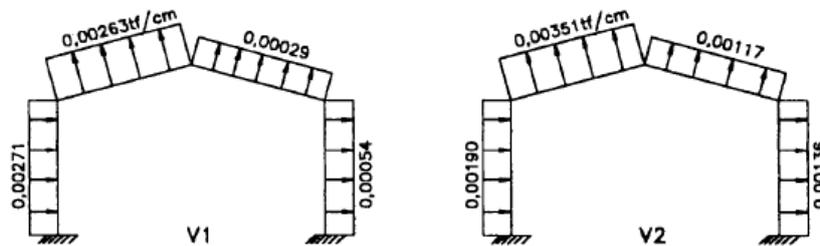
187

188

189

Posteriormente foram calculados os coeficientes de pressão e de forma externos para as paredes laterais e para o telhado, os coeficientes de pressão interna, analisadas as possíveis combinações e obtidos os diagramas finais de vento para o pórtico típico, sendo que como resultado foram obtidos dois diagramas (V1 e V2) para serem combinados com as demais cargas posteriormente. Tais resultados, são apresentados a seguir na Figura 4.

Figura 4. Carregamentos de vento no pórtico



190

191

Fonte: Adaptado de BELLEI (1998)

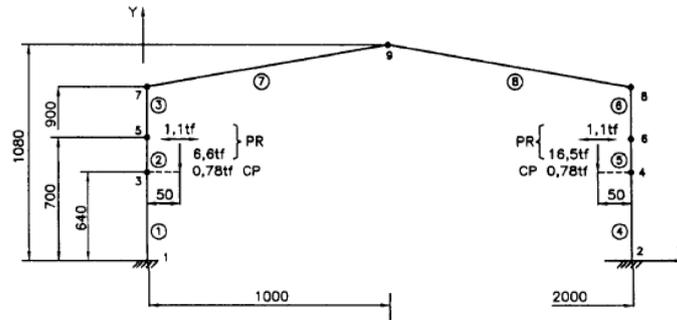
192

193

194

Para a ponte rolante, foram consideradas as cargas apresentadas na Figura 5, sendo que os momentos gerados pela excentricidade do console foram aplicados diretamente na coluna.

Figura 5. Carregamentos devido a ponte rolante



195

196

Fonte: Adaptado de BELLEI (1998)

197

2.2 Dimensionamento utilizando o software Cype 3D

198

199

200

201

No *software* Cype 3D inicia-se criando uma nova obra vazia no programa e fornecendo as configurações iniciais de normas, nesse caso a ABNT NBR 8800:2008, de materiais para os perfis, para esse projeto aço ASTM A36, de hipóteses adicionais de ações e materiais para as ligações, que serão apresentados a seguir.

202

2.2.1 Modelagem no Cype 3D

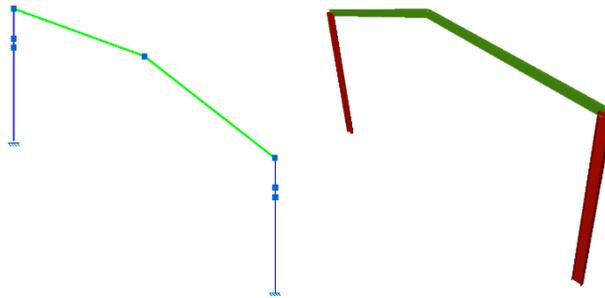
203

204

A modelagem da estrutura é feita com base em um modelo de nós e barras, sendo necessário posteriormente realizar a descrição da disposição dos perfis pensando em um modelo tridimensional.

205 Todo o lançamento da estrutura é realizado fazendo uso de materiais, perfis, coeficientes de
 206 flambagem e flechas admissíveis genéricos, que posteriormente são configurados facilmente. A
 207 Figura 6 apresenta o lançamento de barras e nós, a vinculação externa das colunas (engaste com a
 208 fundação) e a organização da disposição dos perfis.

209 Figura 6. Lançamento de barras e nós, vinculação externa e disposição dos perfis no Cype 3D



210

211 Fonte: Elaborado pelos autores

212 2.2.2 Pré-dimensionamento (perfis utilizados) no Cype 3D

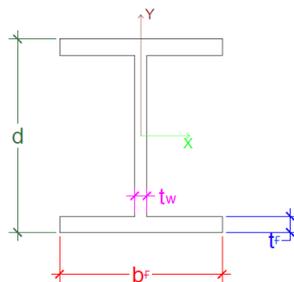
213 A escolha dos perfis baseou-se em uma adaptação do projeto. O autor realiza os cálculos
 214 manualmente, se baseando na norma AISC – ASD 9º/89 – *Specification for Structural Steel Buildings*
 215 – *Allowable Stress Design* (Especificações para edificações de aço estrutural – Projeto de tensão
 216 admissível), documento elaborado pelo Instituto Americano de Construções em Aço. Logo ao
 217 calcular com o Cype 3D, fazendo uso da ABNT NBR 8800:2008, espera-se que os resultados tenham
 218 certa divergência. Apesar disso, as dimensões dos perfis do projeto são utilizadas apenas como pré-
 219 dimensionamento e o objetivo do trabalho é a comparação dos resultados obtidos nos dois *softwares*.
 220 Na Tabela 3, são apresentadas as propriedades principais dos dois perfis definidos para o projeto no
 221 *software* Cype 3D e a Figura 7 mostra a representação genérica das dimensões.

222 Tabela 3. Propriedades principais dos perfis utilizados na estrutura no software Cype 3D

Perfil	Uso	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	A (cm ²)	Massa linear (kg/m)
PS500x85	Colunas principais	500	250	9,5	12,5	45626,37	3258,60	107,63	85
VS400x49	Vigas principais	400	200	6,3	9,5	17393,01	1267,46	62,00	49

223 Fonte: Elaborado pelos autores

224 Figura 7. Representação genérica das dimensões dos perfis



225

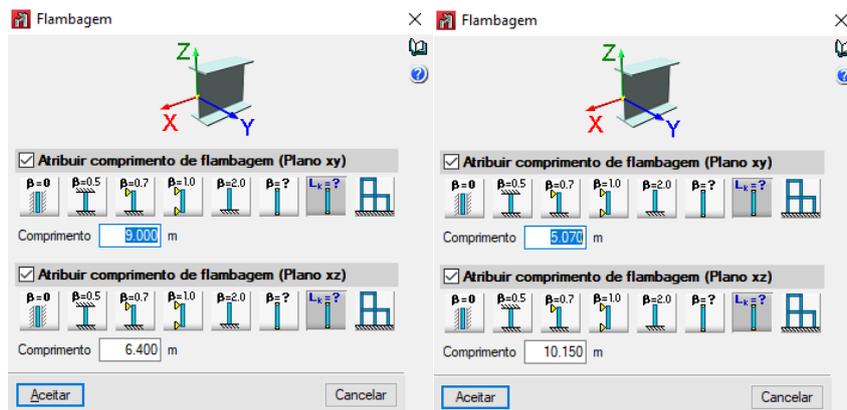
226 Fonte Elaborado pelos autores

227 Ao fim desse processo, faz-se a definição dos materiais para cada perfil, que já foram descritos
228 no item 2.1.2.

229 2.2.3 Efeitos de flambagem no Cype 3D

230 A configuração dos efeitos de flambagem é realizada para cada barra do projeto, por meio da
231 inserção dos comprimentos de flambagem (L_k), retirados do projeto do autor Ildony H. Bellei. A
232 Figura 8 mostra a configuração de flambagem adotada para as colunas e para as vigas,
233 respectivamente. É importante destacar que o programa sempre considera os eixos locais como são
234 mostrados na imagem.

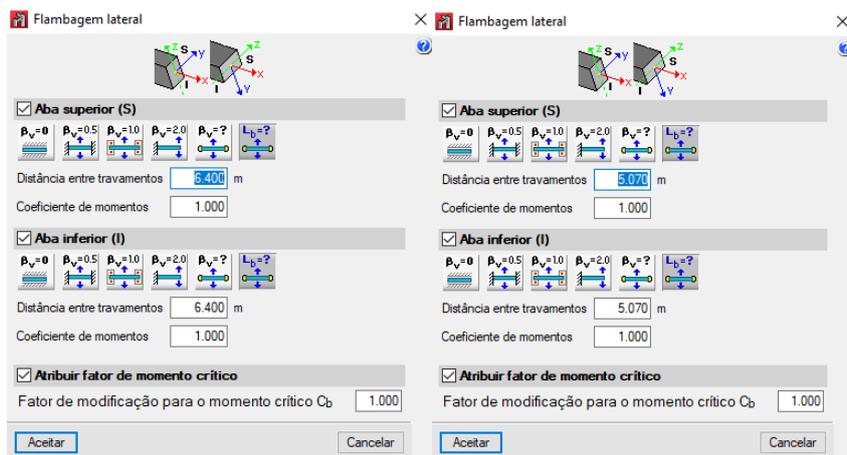
235 Figura 8. Descrição da flambagem das colunas e das vigas, respectivamente, para o Cype 3D



236
237 Fonte: Elaborado pelos autores

238 Para o caso da flambagem lateral, também foi inserido o comprimento destravado (L_b),
239 referente ao projeto. Tal configuração é apresentada na Figura 9, para colunas e vigas,
240 respectivamente.

241 Figura 9. Descrição da flambagem lateral das colunas e das vigas, respectivamente, para o Cype 3D



242
243 Fonte: Elaborado pelos autores

244 Depois de fazer todas as configurações relacionadas a flambagem, é feita a definição das flechas
245 admissíveis.

246 **2.2.4 Flecha máxima admissível no Cype 3D**

247 Para realizar os ajustes de flecha máxima, foi consultada a tabela C.1 do anexo C da ABNT
248 NBR 8800:2008, a qual faz as delimitações adequadas. No programa é possível escolher entre flecha
249 máxima absoluta, ativa absoluta, máxima relativa e ativa relativa. Uma vez que a tabela consultada
250 apresenta as flechas máxima relativas, que são relacionadas ao vão (L), nesse projeto foram utilizadas
251 as mesmas condições. Sendo assim, foi definido para as colunas uma flecha máxima de L/300 e para
252 as vigas L/250. Após configurar os limites para as flechas, faz-se o processo de inserção dos
253 carregamentos.

254 **2.2.5 Ações e combinações no Cype 3D**

255 Inicialmente, é necessário adicionar as hipóteses de carga a serem utilizadas. O programa já
256 considera o peso próprio dos elementos estruturais. Baseando-se nas cargas de projeto apresentadas,
257 foram adicionadas mais uma hipótese para cargas permanentes, duas para ponte rolante, duas para
258 vento e uma para cargas acidentais.

259 O vento foi adicionado em duas hipóteses separadas e como carga distribuída linearmente no
260 pórtico, sendo considerados os eixos locais dos perfis, conforme o que foi apresentado na Figura 4.
261 As cargas da ponte rolante também foram inseridas em duas hipóteses separadas, afim de considerar
262 o fato da carga horizontal atuar em sentidos diferentes, sendo cargas pontuais e momentos aplicados
263 diretamente nas colunas, como indicado na Figura 5.

264 Os valores de carregamento permanente e acidental são citados no item 2.1.4, sendo que o
265 carregamento permanente das vigas é inserido como carga distribuída linearmente assim como o
266 acidental. Já o carregamento permanente das colunas é inserido como carga concentrada no topo.
267 Para esses, são considerados os eixos globais da estrutura.

268 Com relação as combinações previstas em norma, o *software* já realiza todas as combinações
269 possíveis e realiza o dimensionamento para o pior caso. Por fim, é realizado o cálculo do pórtico, com
270 a ferramenta automática que faz as verificações de acordo com os documentos normativos e
271 possibilita fazer as verificações, analisar perfis, diagramas de esforços e deformações.

272 **2.3 Dimensionamento utilizando o *software* Robot Structural Analysis Professional**

273 Para se iniciar a modelagem é preciso escolher entre os tipos de projetos disponíveis aquele que
274 mais se adequa ao que irá ser realizado. No caso deste trabalho foi utilizado o projeto de estrutura
275 3D. Após essa escolha, foram definidas as preferências de trabalho, tais como: unidades de medida a
276 serem utilizadas, unidades de força, características mecânicas dos materiais, deslocamento e ângulo
277 de rotação. Por último foi definido o documento normativo para realização das verificações, nesse
278 caso, o ANSI/ AISC 360-05: *Specification for Structural Steel Buildings* (Especificação para edifícios
279 de aço estrutural), elaborado pelo Instituto Americano de Construção de Aço (*American Institute of*
280 *Steel Construction*). Para as ligações, foi usado o Eurocode 3: *Design of steel structures – Part 1-8:*

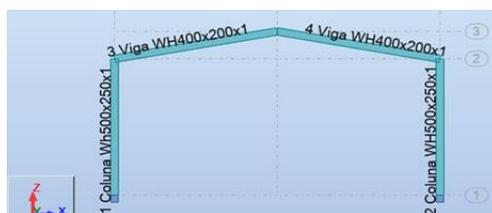
281 *Design of joints* (Projeto de Estruturas de Aço – Parte 1-8: Projeto de ligações), elaborado pelo Comitê
 282 Europeu de Padronização. O motivo dessas escolhas é a ausência das normas brasileiras e o fato de
 283 que a norma de projetos de estruturas de aço vigente no Brasil (ANBT NBR 8800:2008) tem como
 284 referências normativas principais as duas que foram definidas.

285 2.3.1 Modelagem no Robot

286 Finalizada a etapa de definições básicas de trabalho, é possível dar início ao processo de
 287 modelagem. Primeiramente foram definidos os eixos, sendo X e Y os eixos que compõem o plano
 288 horizontal e Z o eixo que define a altura.

289 A modelagem no programa consiste no lançamento de barras, que é feito selecionando o ponto
 290 inicial e final da mesma, que é considerada como uma linha que passa no eixo do centro de gravidade
 291 do perfil escolhido. Em seguida foram lançados os apoios presentes em cada base de pilar, nesse caso,
 292 engastes. A Figura 10 mostra a estrutura modelada e os apoios utilizados.

293 Figura 10. Lançamento do pórtico e dos apoios no Robot



294
 295 Fonte: Elaborado pelos autores

296 2.3.2 Pré-dimensionamento (perfis utilizados) no Robot

297 Os perfis utilizados durante a modelagem do edifício industrial no *software* Robot Structural,
 298 assim como no Cype 3D, foram obtidos no projeto adaptado mencionado anteriormente.

299 Apesar do Robot Structural contar com uma vasta biblioteca de perfis metálicos estruturais, o
 300 mesmo não apresenta perfis brasileiros. Devido a isso, foram buscados dentro dos catálogos
 301 disponíveis, perfis com as características geométricas mais próximas aos perfis descritos no item
 302 2.2.2, para uma comparação mais justa dos resultados. As características dos perfis utilizados estão
 303 dispostas na Tabela 4, também de acordo com a disposição genérica da Figura 7.

304 Tabela 4. Propriedades principais dos perfis utilizados na estrutura no Robot

Perfil	Uso	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	A (cm ²)	Massa linear (kg/m)
WH500x 250x1	Colunas principais	500	250	8	14	48356,0	3647,0	107,0	84,6
WH400x 200x1	Vigas principais	400	200	6	10	17956,0	13340,0	62,8	49,3

305 Fonte: Elaborado pelos autores

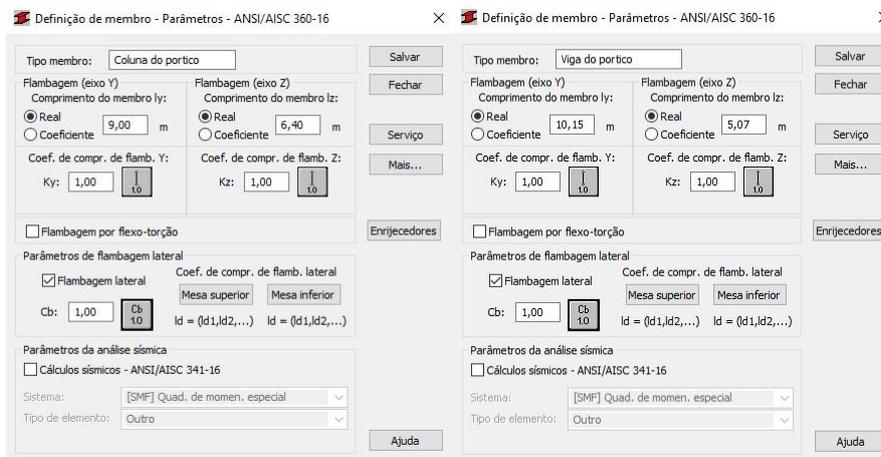
306 2.3.3 Materiais no Robot

307 Seguindo o item 2.1.2, todas as peças que constituem o pórtico modelado neste trabalho, são de
308 aço A-36 250MPa. Por não existir tal material nas bibliotecas do *software*, foi criado um novo aço
309 com características idênticas as descritas per norma ABNT NBR 8800:2008.

310 2.3.4 Efeitos de flambagem no Robot

311 Para que os efeitos da flambagem sejam avaliados, esses devem ser inseridos através da aba
312 “Definição de membro”, onde é possível definir todos os parâmetros necessários para a análise da
313 estrutura com relação a esse quesito. Através dessa, foram inseridos os valores de comprimento de
314 flambagem (L_k), assumidos pelo projeto adaptado já mencionado. Na Figura 11 são mostrados os
315 valores para colunas e vigas, respectivamente.

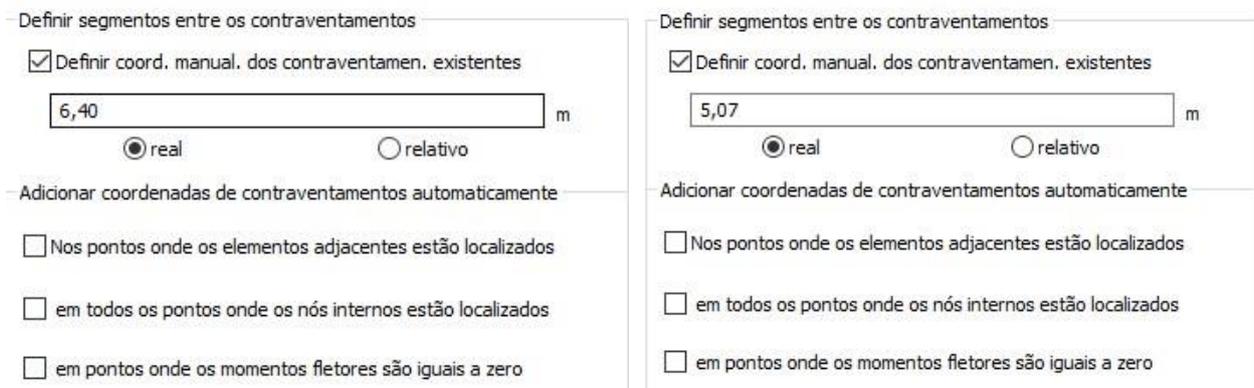
316 Figura 11. Descrição da flambagem das colunas e vigas, respectivamente, no Robot



317
318 Fonte: Elaborado pelos autores

319 Já para a consideração da flambagem lateral, foram adicionados manualmente os valores dos
320 comprimentos destravados (L_b). Os mesmos são demonstrados na Figura 12. Destaca-se que tais
321 valores foram considerados iguais para a mesa superior e inferior de cada perfil.

322 Figura 12. Descrição da flambagem lateral das colunas e das vigas, respectivamente, no Robot



323
324 Fonte: Elaborado pelos autores

325 2.3.5 Flecha máxima admissível no Robot

326 Com o intuito de obedecer aos padrões normativos brasileiros, assim como foi feito no Cype
327 3D, foram adotados os valores de deslocamento máximo disponíveis na tabela C.1 do anexo C da
328 norma ABNT NBR8800:2008I, sendo $L/300$ para as colunas e $L/250$ para as vigas, onde “L” é o
329 comprimento da barra.

330 2.3.6 Ações e combinações no Robot

331 O primeiro passo para fazer o lançamento dos carregamentos sobre a estrutura é criar cada uma
332 das hipóteses de cargas atuantes através do menu “Cargas”, na guia “Tipo de carga”. Nessa fase é
333 necessário informar a natureza da carga a ser criada. Feito isso, adiciona-se os carregamentos
334 diretamente aos membros do pórtico. O peso próprio, assim como no Cype 3D, é considerado
335 automaticamente pelo software. Os demais carregamentos foram lançados considerando as mesmas
336 hipóteses utilizadas no Cype 3D.

337 Finalizado o lançamento de todas as cargas em suas respectivas peças, foram criadas as
338 combinações das cargas existentes. O Robot oferece a opção de realizar as mesmas automaticamente,
339 porém optou-se por fazê-las manualmente com a finalidade de obedecer aos parâmetros normativos
340 da ABNT NBR 8800:2008 e se aproximar ao máximo com o que foi feito pelo Cype 3D.

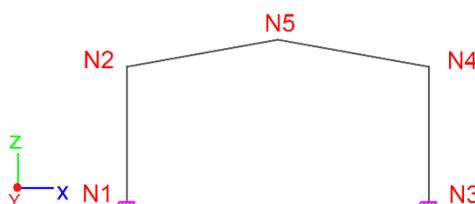
341 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

342 Os *softwares* fazem as análises estruturais pertinentes e as verificações de acordo com os
343 documentos normativos. Após o cálculo, é possível obter-se os esforços na estrutura, os
344 deslocamentos, os relatórios de verificações e as ligações estabelecidas. Também é feito um
345 dimensionamento otimizado, no qual o próprio programa verifica quais são os perfis mais econômicos
346 para o sistema modelado.

347 3.1 Diagramas de esforços solicitantes

348 São gerados diagramas de vários tipos de esforços, tais como axial (N), cortante (V_y e V_z),
349 momento torsor (M_t) e momento fletor (M_y e M_z). Os valores dos máximos e dos mínimos podem
350 ser observados na Tabela 5 a seguir, para ambos os *softwares*, de acordo com a descrição da Figura
351 13.

352 Figura 13. Descrição de pontos do pórtico



353

354

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 5. Esforços solicitantes máximos calculados pelos programas

Barra		N (tf)		V_z (tf)		M_y (tf.m)	
		Cype 3D	Robot	Cype 3D	Robot	Cype 3D	Robot
N1-N2	Mín.	-15,290	-15,286	-3,018	-2,972	-8,772	-8,988
	Máx.	2,296	2,295	3,148	3,166	10,932	11,297
N3-N4	Mín.	-29,861	-29,871	-3,148	-3,166	-7,576	-7,476
	Máx.	0,407	0,417	1,167	1,167	12,257	12,202
N2-N5	Mín.	-3,453	-3,480	-2,309	-2,312	-6,847	-7,283
	Máx.	1,325	1,324	3,001	2,994	7,103	7,664
N4-N5	Mín.	-3,404	-3,433	-2,279	-2,286	-6,576	-7,020
	Máx.	1,553	1,555	1,134	1,131	5,501	5,649

356

Fonte: Elaborado pelos autores

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

Para o esforço cortante no eixo “y” (V_y), o momento torsor (M_t) e o momento fletor no eixo “z” (M_z), foram obtidos valores nulos. Conforme apresentado, os dois *softwares* obtiveram valores de esforços com pequenas diferenças, que variam de um para o outro conforme o ponto analisado. As maiores foram: 0,029tf (tonelada força) para o esforço axial (N), 0,046tf (tonelada força) para o esforço cortante em “z” (V_z) e 0,561tf.m (tonelada força vezes metro) para o momento fletor em “y” (M_y). Isso pode ser justificado pela divergência no carregamento de peso próprio gerado automaticamente, já que os perfis utilizados são semelhantes, mas não idênticos. Além disso, a forma de análise realizada também pode ser considerada, uma vez que mesmo sabendo que os dois *softwares* utilizam o método dos elementos finitos, há a possibilidade de gerarem esforços um pouco diferentes.

3.2 Deslocamentos

367

368

369

370

Em relação aos deslocamentos, são calculados os de translação (D_x , D_y e D_z) e também os de rotação dos pontos (G_x , G_y e G_z). Também de acordo com a descrição apresentada na Figura 13, os valores mínimos e máximos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Deslocamentos calculados pelos programas

Nó	D_x (mm)				D_z (mm)				G_y (mRad)			
	Cype 3D		Robot		Cype 3D		Robot		Cype 3D		Robot	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
N1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2	-12,688	7,713	-12,480	7,540	-0,481	0,360	-0,475	0,126	-2,039	0,894	-1,90	0,799
N3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N4	-9,679	4,911	-9,573	4,882	-1,518	0,107	-0,90	0,067	-2,491	0,525	-2,312	0,642
N5	-8,691	3,862	-8,505	3,772	-28,189	27,791	-28,683	28,320	0	1,552	0	1,531

371

Fonte: Elaborado pelos autores

372

373

374

375

376

Os *softwares* obtiveram valores nulos de deslocamento de translação no eixo “y” (D_y) e de rotação para os eixos “x” e “z” (G_x e G_z). Comparando os valores apresentados, é possível observar que novamente os valores não são idênticos e que variam de um ponto para o outro, porém as diferenças são pequenas, sendo as maiores: 0,208mm para o deslocamento de translação em “x” (D_x), 0,618mm para o deslocamento de translação em “z” (D_z) e de 0,179mm.Rad para o deslocamento de

377 rotação em “y” (G_y). Tal resultado pode-se justificar também pela diferença no carregamento de peso
378 próprio e pelas diferenças na utilização do método dos elementos finitos, da mesma forma como
379 ocorre no caso dos esforços. Como os deslocamentos tem escala pequena, qualquer variação gera
380 alterações em seus valores.

381 **3.3 Verificação dos perfis**

382 O *software* realiza as verificações determinadas em norma, para concluir se o perfil escolhido
383 está apto a ser utilizado ou se há algum problema e o mesmo precisa ser alterado. O Cype 3D verifica:
384 limitação do índice de esbeltez, resistência à tração, resistência a compressão, resistência à flexão
385 eixo X, resistência à flexão eixo Y, resistência ao esforço cortante X, resistência ao esforço cortante
386 Y, resistência ao esforço axial e flexão combinados, resistência à torção, resistência ao momento de
387 torção, força axial, momento fletor e cortante, resistência a interações de esforços e momentos de
388 torção, todos esses relacionados à ABNT NBR 8800:2008.

389 Já o Robot Structural Analysis Professional verifica: índice de esbeltez, flambagem nos eixos
390 Y e Z, flambagem lateral, resistência a compressão, resistência ao cisalhamento, resistência a flexão
391 e resistência a tração.

392 O resultado do programa Cype 3D é que todos os perfis que foram pré-dimensionados (através
393 do cálculo manual) estão aptos para a estrutura. No caso do Robot, o mesmo ocorre, concluindo-se
394 que o sistema está apto para qualquer um dos documentos normativos. Isso não mostra se os perfis
395 são os mais adequados e econômicos, e sim se os utilizados na modelagem são aptos ou não.

396 **3.4 Ligações**

397 Após o cálculo do pórtico, são geradas as ligações automáticas. Feito isso, com a ferramenta de
398 edição, é feita a análise para cada uma delas. Nesse passo, realiza-se as configurações necessárias
399 quanto ao método de ligação (soldada ou aparafusada), ao material utilizado, à disposição de
400 enrijecedores e às características da placa de ancoragem. As ligações de viga com coluna e de viga
401 com viga foram definidas como parafusadas, conforme consultado no projeto base. Com todas as
402 configurações, os programas geram a ligação mais adequada. Para as placas de base dos pilares,
403 também são dimensionados os chumbadores necessários.

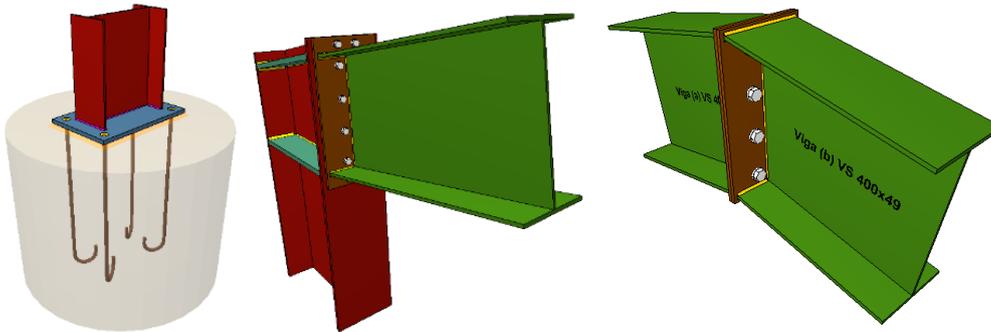
404 Para as ligações geradas pelo Cype 3D, no encontro do pilar com a base da fundação, tem-se a
405 utilização de uma placa base de 450x700mm com espessura de 25mm e quatro parafusos de
406 ancoragem de 25,4mm de diâmetro e comprimento total de 900mm (incluindo a dobra na ponta) em
407 direção ao concreto da fundação. Foi utilizada solda E70XX para unir a coluna na placa base e
408 também para melhorar a ligação dos chumbadores a ela.

409 Já para a ligação entre a coluna e a viga, observa-se uma chapa frontal para a viga, de
410 220x510mm e espessura de 11mm com 12 parafusos M12x50, além de dois enrijecedores, um

411 horizontal e outro inclinado. Para essa, a solda utilizada foi E70XX para unir a viga à chapa frontal e
412 para ligação dos enrijecedores.

413 Por fim, para a ligação entre as duas vigas, também foram utilizadas chapas frontais, de
414 220x430mm com 10mm de espessura, com 8 parafusos M16x55. Para solda dos perfis às chapas, foi
415 usada solda E70XX. As ligações geradas no programa são evidenciadas na Figura 14.

416 Figura 14. Ligações geradas pelo Cype 3D



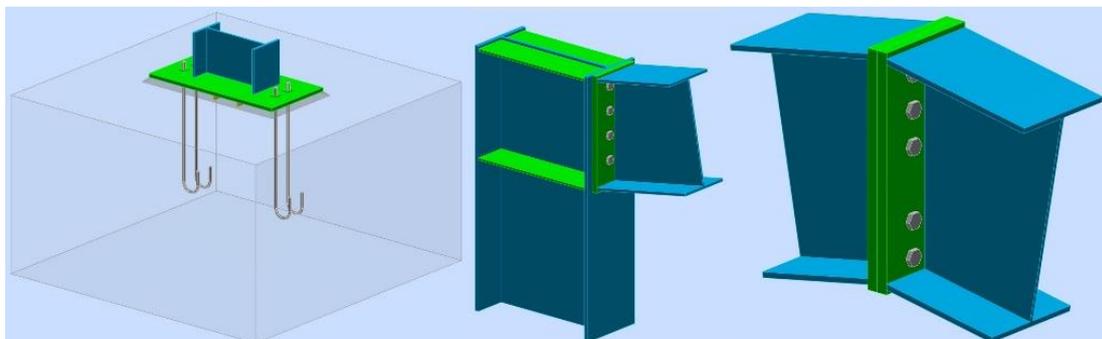
417
418 Fonte: Elaborado pelos autores

419 Em relação as ligações geradas pelo Robot, tem-se para a ligação entre o pilar e a base da
420 fundação, a utilização de uma placa de base de 1000x500mm e espessura de 25mm, ancoragem feita
421 com 4 parafusos, com 22mm de diâmetro e 1016mm de comprimento (incluindo a dobra na ponta),
422 cunha de 100mm e soldas de 5mm com a placa principal e 8mm com a cunha.

423 No caso da ligação entre a coluna e a viga, obteve-se uma placa frontal de 427x200mm com
424 20mm de espessura, 10 parafusos 16mm, classe A307 distribuídos em duas colunas com 5 parafusos
425 em cada, dois enrijecedores de 5mm de espessura, solda no enrijecedores de 5mm, solda na alma com
426 6mm e solda nas mesas superior e inferior com 7mm.

427 Por último, para a ligação entre as duas vigas utilizou-se placa frontal de 526x200mm com
428 20mm de espessura, com 10 parafusos dispostos em duas colunas, os mesmos também foram de
429 16mm classe A307, solda na alma com 5mm e nas mesas com 7mm. A Figura 15 mostra as ligações
430 geradas pelo *software* Robot Structural.

431 Figura 15. Ligações geradas pelo Robot Structural



432
433 Fonte: Elaborado pelos autores

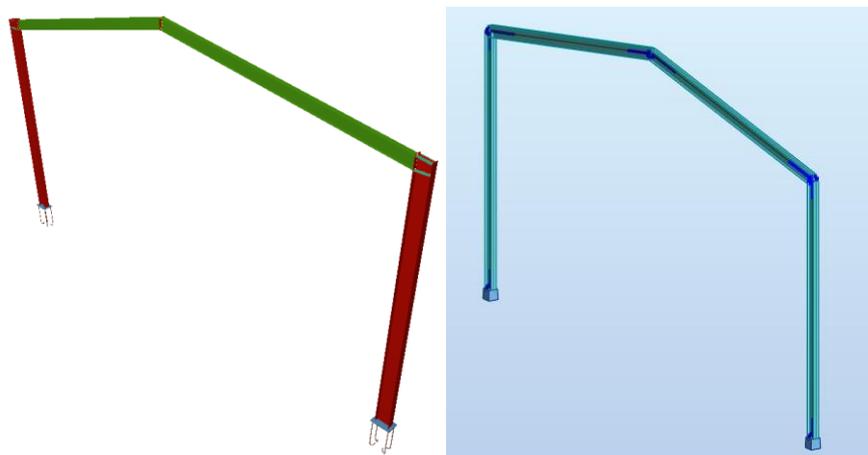
434 No apêndice A, encontra-se os detalhamentos de todas as ligações geradas por ambos os
435 *softwares*, onde observa-se todas as outras dimensões e materiais não descritos anteriormente. É
436 possível observar uma semelhança, inclusive com relação aos materiais e as dimensões dos
437 componentes, porém o Robot Structural foi mais conservador para todas as conexões, sendo essas
438 mais robustas.

439 Primeiramente para a ligação pilar-fundação, o Robot obteve placa base maior (0,185m² a
440 mais), parafusos de menor diâmetro (4mm a menos) porém mais compridos (116mm a mais), além
441 de apresentar necessidade da presença de uma cunha para ancoragem à fundação. Com relação a
442 ligação coluna-viga, o mesmo calculou uma chapa frontal menor (0,03m² a menos) porém bem mais
443 espessa (9mm a mais) e uma menor quantidade de parafusos (2 a menos), porém de maior diâmetro
444 (4mm a mais). Por fim, para a ligação viga-viga, o Robot calculou uma placa frontal maior (0,01m²)
445 e bem mais espessa (10mm a mais) e a quantidade de parafusos também foi maior (2 a mais) sendo
446 esses de mesmo diâmetro. Essas diferenças podem ser justificadas pela forma com que o programa
447 realiza as análises para geração da ligação ou pela pequena diferença das duas normativas utilizadas.

448 O Cype 3D se apresenta mais eficiente que o Robot Structural na geração dos relatórios e
449 detalhamentos automáticos dessas ligações além de possibilitar a configuração do tipo de solda a ser
450 utilizado nas conexões. Com isso, o Cype se faz mais viável do ponto de vista profissional e executivo.

451 Ao fim de todo esse processo (modelagem e cálculo), é possível gerar a vista tridimensional do
452 pórtico em ambos os *softwares*. A Figura 16 mostra os pórticos finais gerados.

453 Figura 16. Estrutura 3D do pórtico final gerado pelo Cype 3D e pelo Robot Structural



454
455 Fonte: Elaborado pelos autores

456 3.5 Dimensionamento otimizado

457 Como mencionado anteriormente, os dois *softwares* realizam um cálculo de forma a encontrar
458 os perfis mais econômicos que satisfazem as condições impostas pelos carregamentos, de acordo com
459 as verificações exigidas pelos documentos normativos.

460 Dessa forma, a Tabela 7 mostra os perfis escolhidos pelos programas para substituírem os pré-
 461 dimensionados da forma mais eficiente possível.

462 Tabela 7. Perfis otimizados pelos programas

Software	Perfil	Uso	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	A (cm ²)	Massa linear (kg/m)
Cype 3D	VS400x78	Colunas principais	400	200	6,3	19,0	30093,94	2534,09	98,81	78
	VS400x33	Vigas principais	400	180	4,8	6,3	11090,63	612,71	41,08	33
Robot	WH350x250	Colunas principais	350	250	6,0	10,0	16251,0	2604,0	69,8	54,8
	WH350x175x1	Vigas principais	350	175	4,5	8	9586,0	714	43	33,8
Cálculo Manual	PS500x85	Colunas principais	500	250	9,5	12,5	45626,37	3258,60	107,63	85
	VS400x49	Vigas principais	400	200	6,3	9,5	17393,01	1267,46	62,00	49

463 Fonte: Elaborado pelos autores

464 Observa-se que foi possível tornar a estrutura mais leve e conseqüentemente mais econômica
 465 com a mudança dos perfis, visto que agora a resistência dos mesmos é aproveitada de forma
 466 otimizada, quando comparado aos perfis utilizados no pré-dimensionamento.

467 Avaliando primeiramente as barras que constituem as vigas, é possível constatar que o perfil
 468 gerado pelo Cype 3D é 0,8kg/m (quilogramas por metro) mais leve quando comparado ao perfil
 469 estabelecido pelo Robot Structural. Já para os perfis utilizados nas colunas, vê-se que o Robot
 470 Structural utiliza um perfil que é 23,2 kg/m (quilogramas por metro) mais leve quando comparado ao
 471 perfil produzido pelo Cype 3D, logo observa-se uma grande discrepância entre a massa linear dessas
 472 peças.

473 Considerando que o pórtico possui duas colunas de 9 metros e duas vigas de 10,16 metros de
 474 comprimento, tem-se para o Cype 3D um peso total do pórtico de 2074,56 kg (quilogramas) e para o
 475 Robot Structural, tem-se 1673,22kg (quilogramas). Logo o segundo foi mais econômico, sendo
 476 401,34kg mais leve no total, ou seja, 19,35%.

477 4 CONCLUSÕES

478 Uma grande dificuldade encontrada atualmente por engenheiros projetistas é a escolha de um
 479 *software* de cálculo estrutural que proporcione agilidade e possibilite fazer análises mais complexas,
 480 com a segurança requerida. A grande maioria, tende a trabalhar ao longo da vida profissional com o
 481 primeiro programa que aprendeu, devido à dificuldade em aprender diversos deles. O objetivo desse
 482 estudo foi entender as diferenças entre o Cype 3D e o Robot Structural, nos quesitos de modelagem
 483 e também nos resultados encontrados.

484 Ambos os programas proporcionam grande facilidade no processo de modelagem, porém o
485 Cype 3D possui interface mais intuitiva, que mostra claramente as configurações e descrições a serem
486 realizadas. Por outro lado, o Robot tem a vantagem de se modelar diretamente no modelo
487 tridimensional da estrutura e não com a utilização de nós e barras. Além disso, tem-se o fato de estar
488 integrado com o conceito *Building Information Modeling* (BIM) e com isso apresentar a possibilidade
489 do uso conjunto com o *software* Revit, também da Autodesk.

490 Outro ponto a ser destacado é o que *software* Cype 3D possui a norma brasileira NBR
491 8800:2008 para realização das verificações, já o Robot possui somente as normas que são referências
492 para a brasileira, sendo elas a americana ANSI/ AISC 360-05 e a europeia Eurocode 3. Também
493 devido a isso, o primeiro conta com os catálogos de perfis nacionais, proporcionando maior facilidade
494 no momento do dimensionamento, enquanto para o Robot há a necessidade da criação de um perfil
495 ou da busca por um perfil de mesmas características em catálogos de outros países.

496 Consta-se que no quesito da obtenção de resultados, ambos os *softwares* são próximos,
497 apresentando pequenas diferenças. Para os esforços, a diferença máxima obtida foi de 0,561tf.m a
498 mais no momento fletor em “y” calculado pelo Robot. Já para os deslocamentos, o máximo foi de
499 0,618mm a mais no deslocamento em “z” calculado pelo Cype. Com relação as ligações, o Cype 3D
500 é mais eficiente, gerando ligações menos robustas e entregando detalhamentos e relatórios mais
501 completos, enquanto o Robot se destaca na otimização dos perfis da estrutura, encontrando um pórtico
502 401,34kg (19,35%) mais leve.

503 Conclui-se então que qualquer um dos *softwares* estudados proporcionará bons resultados e
504 permitirá ao projetista ser muito mais ágil e preciso ao realizar um projeto estrutural de estrutura de
505 aço. A grande vantagem do Cype 3D é a presença dos documentos normativos nacionais e por outro
506 lado, a do Robot Structural é a maior economia na escolha dos perfis, gerando uma estrutura mais
507 leve.

508 **4.1 Recomendações para trabalhos futuros**

509 Uma possibilidade é a análise da estrutura do galpão como um todo, considerando uma
510 modelagem de forma tridimensional com os demais pórticos principais, contraventamento, os
511 tirantes, as colunas frontais e os tapamentos frontal, lateral e superior.

512 Além disso, pode ser feita a análise referente aos custos das estruturas geradas por cada
513 *software*, afim de descobrir qual oferece uma opção mais viável de ser executada. Outra opção, é a
514 adição de mais programas para uma comparação mais vasta, como o SAP2000, por exemplo. O tema
515 é pouco estudado e apresenta inúmeras opções para pesquisas futuras.

516 **5 REFERÊNCIAS**

517 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (NBR 6123). **Forças devidas ao vento**
518 **em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

519 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (NBR 8681). **Ações e segurança nas**
520 **estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

521 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (NBR 8800). **Projeto de estruturas de**
522 **aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

523 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC. (AISC – ASD 9º/89). **Specification**
524 **for Structural Steel Buildings – Allowable Stress Design and Plastic Design**. Chicago, Estados
525 Unidos da América, 1989.

526 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC. (ANSI/ AISC 360-05).
527 **Specification for Structural Buildings**. Chicago, Estados Unidos da América, 2005.

528 BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo**. 2. ed. São Paulo (SP): PINI, 1998.

529 BRAGA, B. K. G. **Projeto Estrutural de Galpão Metálico Segundo as Recomendações da**
530 **NBR8800**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) –
531 Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

532 CYPE INGENIEROS, S.A. **Manual do utilizador Cype 3D: exemplo prático**. Braga, Portugal,
533 2020.

534 EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EN 1993). **Eurocode 3: Design of steel**
535 **structures – Part 1-8: Design of joints**. Bruxelas, Bélgica, 2005.

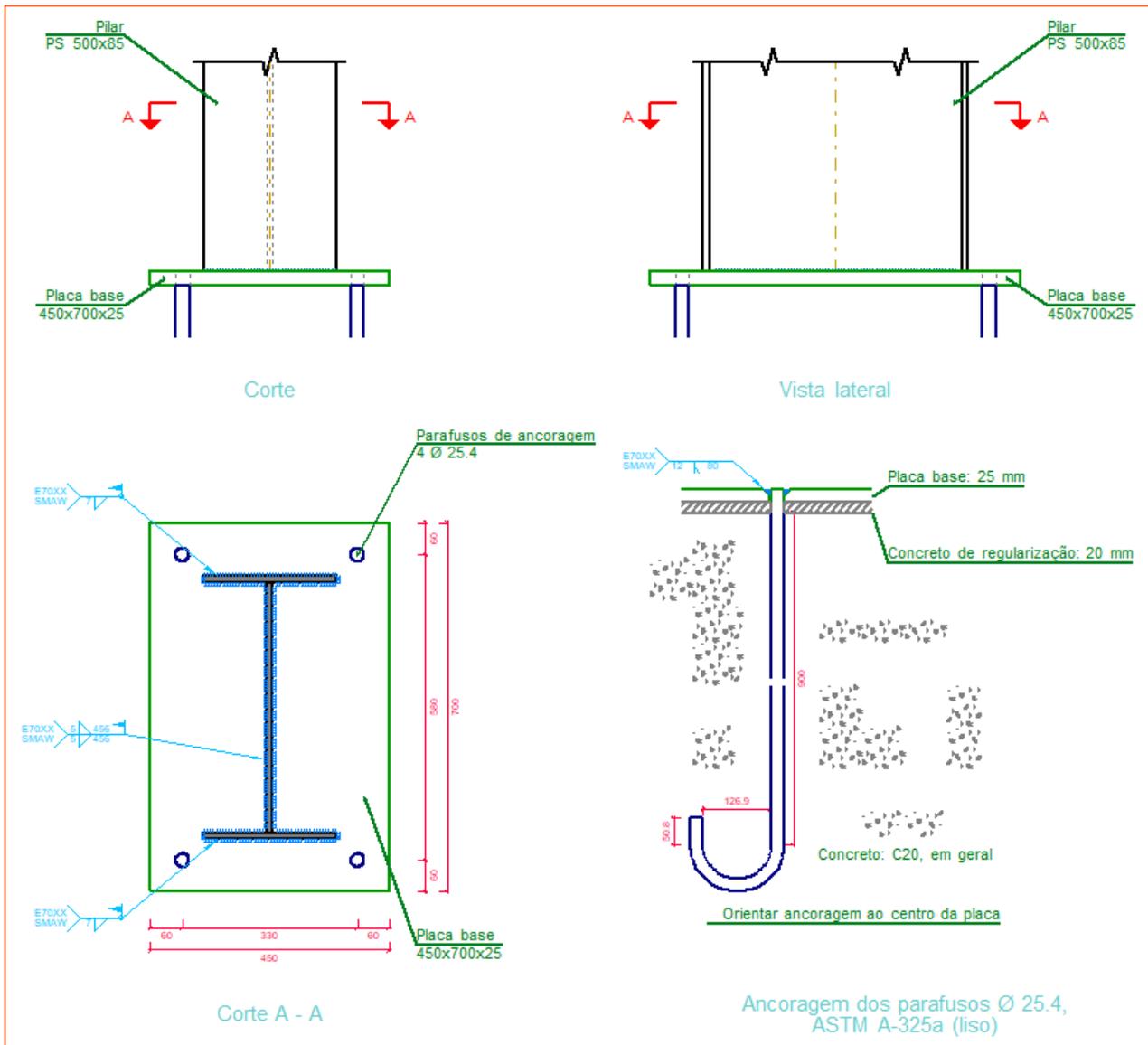
536 SEBASTIÃO, L. J. D. **Análise comparativa entre dois softwares de cálculo estrutural**. 2019.
537 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Leiria, Escola Superior de
538 Tecnologia e Gestão, Leiria, Portugal, 2019.

539

APÊNDICE A – Ligações

540

Figura A-1. Ligação base e coluna Cype 3D



541

542

Fonte: Elaborado pelos autores

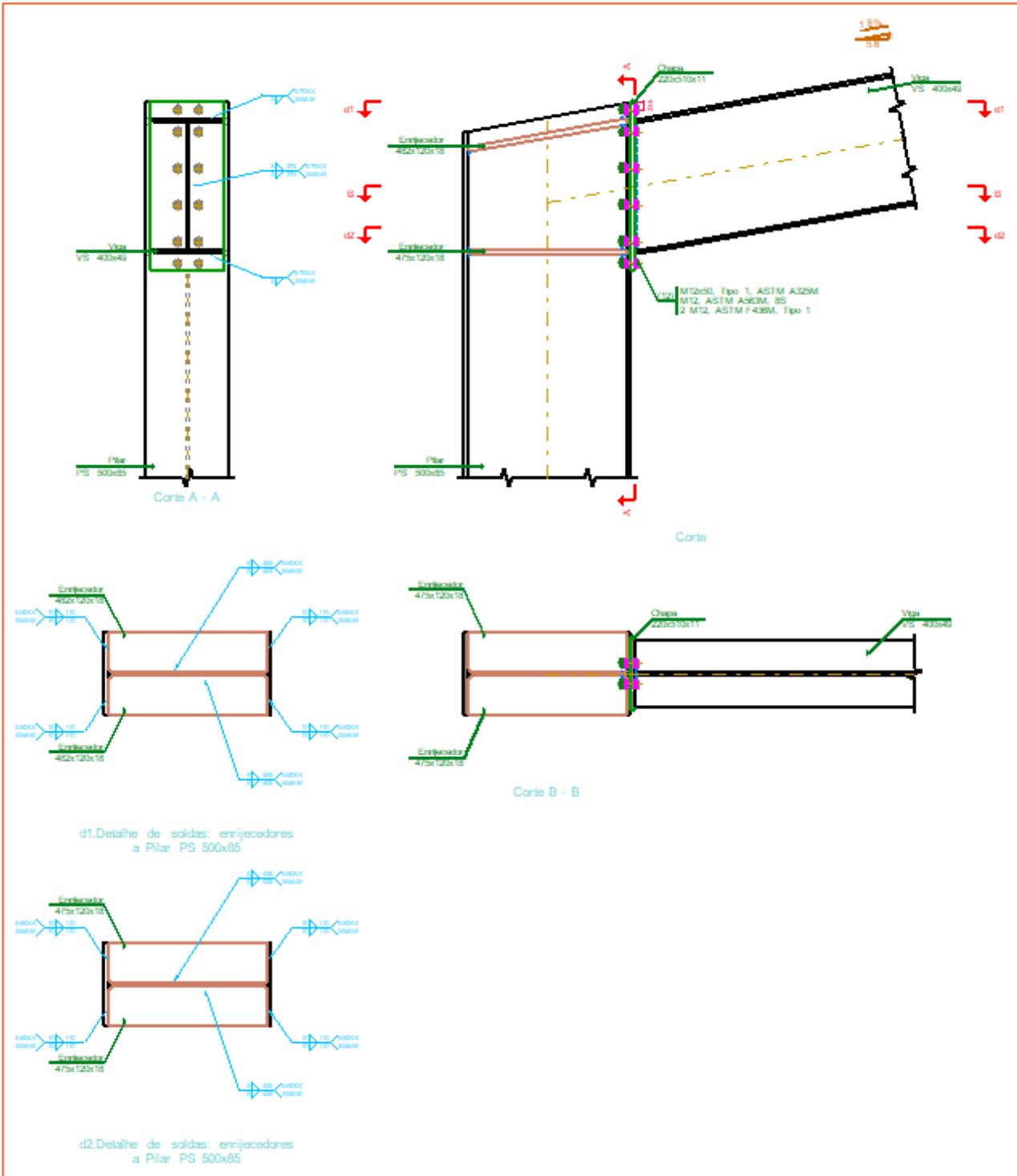
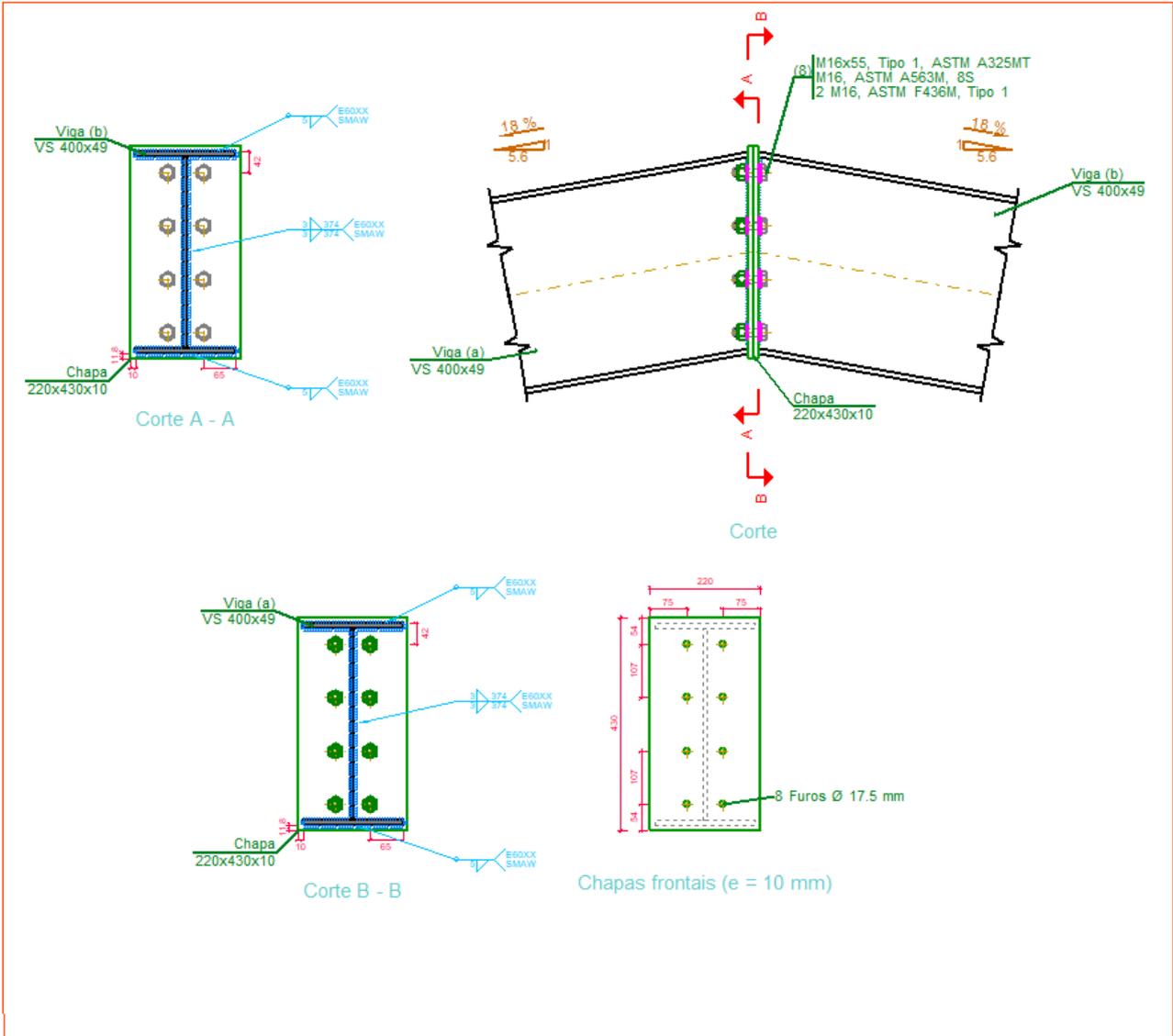


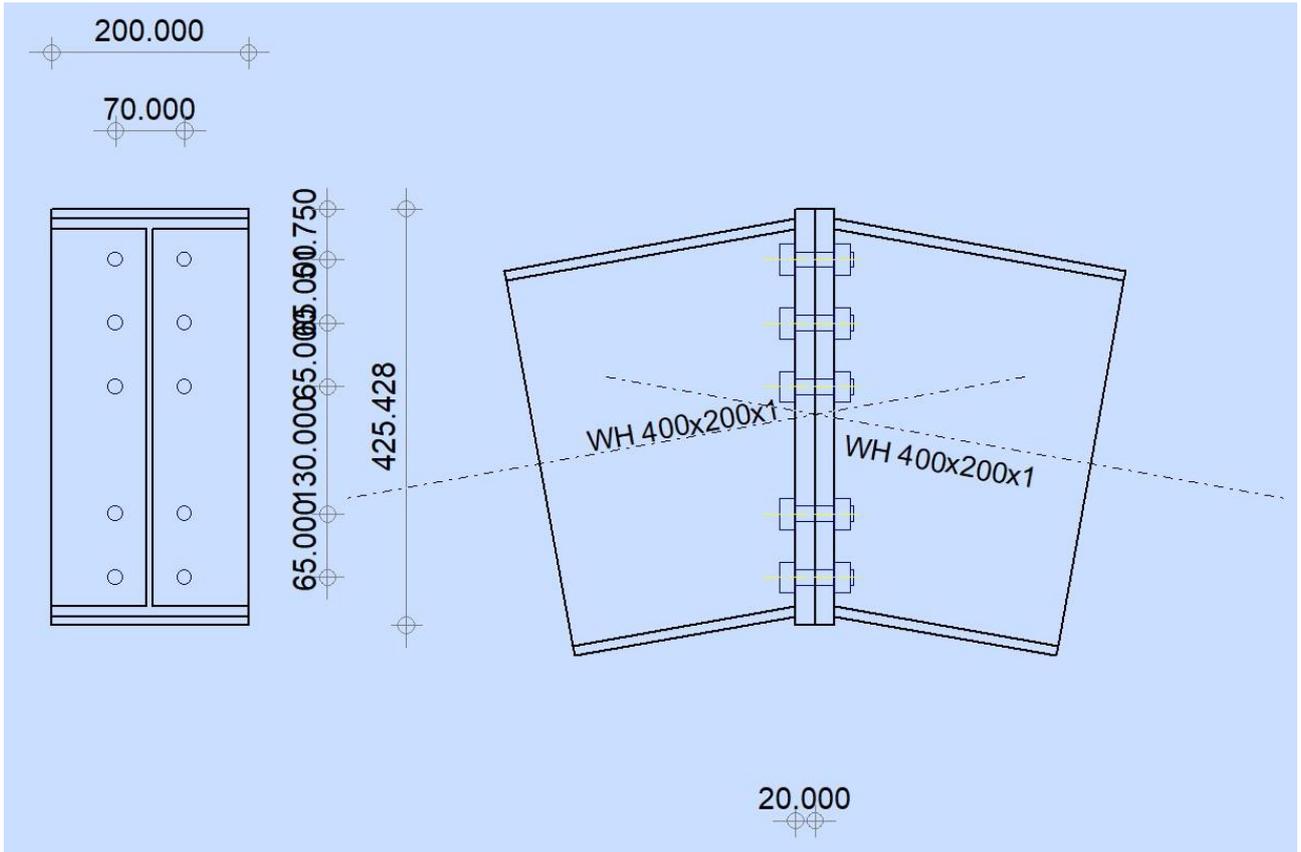
Figura A-3. Ligação viga e viga Cype 3D



Fonte: Elaborado pelos autores

555

Figura A-6. Ligação viga e viga Robot Structural



556

557

Fonte: Elaborado pelos autores